



- ۶۴۷..... بررسی ضرایب ورودی گیاهی مدل WOFOST در شرایط کم آبیاری بخشی ریشه برای گیاه آفتابگردان  
سیده فاطمه هاشمی- علی شاهنظری- محمود رایینی- علی قدیمی فیروز آبادی- ابراهیم امیری
- ۶۶۱..... اثر آبیاری سطحی و زیرسطحی با آب شور و مالچ بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت و توزیع املاح در خاک  
عبدالمجید لیاقت- مسعود پورغلام آمیجی- پوریا مشهوری نژاد
- ۶۷۵..... اثر آبیاری بخشی منطقه ریشه و زئولیت بر کارایی مصرف آب و خصوصیات فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای  
پروین دانش‌پژوه- احمد رضا قاسمی- محمد رضا نوری- رحیم برزگر
- ۶۹۱..... شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک و گیاه توسط مدل CERES-Wheat  
فرزاد مندنی- بابک غلامی- علیرضا باقری- غلامرضا محمدی
- ۷۰۹..... تأثیر بیوجار و کمپوست ضایعات هرس و تلقیح میکروبی بر فراهمی فسفر  
میرحسن رسولی صدقیانی- رقیه واحدی- محسن برین
- ۷۲۳..... بررسی تغییرات اندازه ذرات با استفاده از روش نوین پراش لیزری و کانی‌شناسی رسی خاک‌های مدرن لسی  
در طول گرادان اقلیمی در شمال ایران  
جعفر شریفی گرم‌دره- فرهاد خرمالی- کرستین رلف- مارتین کهل- علی شهریار- مانفرد فرشن
- ۷۳۷..... نقش‌برداری رقومی کربن آلی خاک (مطالعه موردی: مریوان، استان کردستان)  
شلیر اسکندری- کمال نبی‌اللهی- روح‌الله تقی‌زاده مهرجودی
- ۷۵۱..... تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تأثیر شدت چرای دام در مراتع مغان  
سیما جعفری- اردوان قربانی- کاظم هاشمی‌مجد- سحر غفاری
- ۷۶۳..... تأثیر زئولیت، ورمی‌کمپوست و کود حیوانی بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در ذرت  
سیده زهره تقدیسی حیدریان- رضا خراسانی- حجت امامی
- ۷۷۹..... اثر زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف بر قابلیت استفاده روی و پاسخ‌های ذرت در یک  
خاک آلوده به روی  
پروین کبیری- حمیدرضا متقیان- علیرضا حسین پور
- ۷۹۵..... ارزیابی زمین‌آماری پایداری خاکدانه‌ها و نسبت جذبی سدیم در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه  
شکراه اصغری- محمود شهابی
- ۸۰۹..... تأثیر همزیستی میکوریزی بر جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی  
مرتضی پوزش شیرازی- حسن حقیقت‌نیا- رحیم خادمی
- ۸۲۱..... بررسی رابطه تغییرات رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در رویشگاه جنگلی مله سیاه در استان ایلام  
جعفر حسین زاده- افسانه تنگو- علی نجفی‌فر- احمد حسینی
- ۸۳۱..... ارزیابی عملکرد روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه دو اقلیم متفاوت  
جواد رمضان‌مقدم- مصطفی یعقوب زاده- احمد جعفرزاده

## Contents

- Evaluation of Plant Input Coefficient of WOFOST in PRD Condition for Sunflower ..... 660  
S.F. Hashemi-A. Shahnazai- M. Raeini- A. Ghadami Firouzabadi- E. Amiri
- The Effect of Surface and Subsurface Irrigation with Saline Water and Mulch on Corn Yield, Water Productivity and Solute Distribution in the Soil ..... 674  
A. Liaghat - M. Pourgholam Amiji - P. Mashhoury Nejad
- The Effect of Partial Root-Zone Drying and Zeolite on Water Use Efficiency and Physiological Characteristics of Sweet Pepper ..... 690  
P. Daneshpazhoh - A. R. Ghasemi- M. R. Noori- R. Barzegar
- Simulation of Changes in Soil and Plant Nitrogen by CERES-Wheat Model ..... 707  
F. Mondani - B. Gholami- A.R. Bagheri- Gh.R. Mohammadi
- Effect of Pruning Waste Biochar and Compost and Microbial Inoculation on Phosphorus Availability ..... 722  
M.H. Rasouli-Sadaghiani - R. Vahedi- M. Barin
- Grain Size and Mineralogy Variations along the Climatic Gradient on the Surface Loess-Derived Soils in Northern Iran ..... 736  
J. Sharifi Garmdash - F. Khormali - M. Kehl - C. Rolf - A. Shahriari - M. Frechen
- Digital Mapping of Soil Organic Carbon (Case Study: Marivan, Kurdistan Province) ..... 750  
Sh. Eskandari - K. Nabiollahi - R. Taghizadeh-Mehrjardi
- The Effects of Livestock Grazing Intensity on Soil Physicochemical Properties in Moghan Rangelands ..... 762  
S. Jafari - A. Ghorbani- K. Hashemimajd- S. Ghafari
- The Effect of Zeolite, Manure and Vermicompost on Growth and Micronutrients Uptake by Corn ..... 778  
S.Z. Taghdisi Heydarian - R. Khorassani - H. Emami
- Effect of Biochars Produced at Different Temperatures on the Availability of Zinc and Maize (*Zea mays* L.) Responses in a Contaminated Soil ..... 793  
P. Kabiri - H.R. Motaghian- A.R. Hosseinpour
- Geostatistical Assessment of Aggregates Stability and Sodium Adsorption Ratio in Salt-Affected Soils Around Urmia Lake ..... 807  
Sh. Asghari - M. Shahabi
- Effects of Mycorrhizal Symbiosis on Nutrient Uptake and Water Use Efficiency of Tomato under Drought Stress ..... 820  
M. Pouzesh Shirazi - H. Haghighatnia - R. Khademi
- Relationship between Soil Moisture Changes and Climatic Indices in the Mele-Siah Forest Site of Ilam Province ..... 830  
J. Hosseinzadeh - A. Tongo- A. Najafifar- A. Hosseini
- Examination of Feature Selection Methods for Downscaling of Daily Precipitation in Two Different Climates ..... 848  
J.RamezaniMoghadam - M.Yaghoobzadeh - A. Jafarzadeh

# آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی - پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۲ شماره ۴ مهر - آبان ماه سال ۱۳۹۷

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

آستارائی، علیرضا

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

ثنائی نژاد، سید حسین

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

خرمالی، فرهاد

استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

علیزاده، امین

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

قائمی، علی اصغر

دانشیار - آبیاری و زهکشی (دانشگاه شیراز)

کمالی، غلامعلی

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)

کیانی، علیرضا

استاد - آبیاری و زهکشی (مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی گلستان)

لکزیان، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

مساعدی، ابوالفضل

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مهدیان، محمد حسین

استاد - آبیاری و زهکشی (پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

این نشریه در پایگاههای زیر نمایه شده است:

پایگاه استنادی علوم ایران (ISC) پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID) بانک اطلاعات نشریات کشور (MAGIRAN)

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

مقاله های این شماره در سایت <http://jm.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شش شماره در سال) منتشر می شود.

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## مندرجات

- ۶۴۷ بررسی ضرایب ورودی گیاهی مدل WOFOST در شرایط کم آبیاری بخشی ریشه برای گیاه آفتابگردان  
سیده فاطمه هاشمی - علی شاهنظری - محمود راینی - علی قدمی فیروز آبادی - ابراهیم امیری
- ۶۶۱ اثر آبیاری سطحی و زیر سطحی با آب شور و مالچ بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت و توزیع املاح در خاک  
عبدالمجید لیاقت - مسعود پورغلام آمیجی - پوریا مشهوری نژاد
- ۶۷۵ اثر آبیاری بخشی منطقه ریشه و ژئولیت بر کارایی مصرف آب و خصوصیات فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای  
پروین دانش‌پژوه - احمد رضا قاسمی - محمد رضا نوری - رحیم برزگر
- ۶۹۱ شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک و گیاه توسط مدل CERES-Wheat  
فرزاد مندنی - بابک غلامی - علیرضا باقری - غلامرضا محمدی
- ۷۰۹ تأثیر بیوجار و کمپوست ضایعات هرس و تلقیح میکروبی بر فراهمی فسفر  
میرحسن رسولی صدقیانی - رقیه واحدی - محسن برین
- ۷۲۳ بررسی تغییرات اندازه ذرات با استفاده از روش نوین پراش لیزری و کانی‌شناسی رسی خاک‌های مدرن لسی در طول گرادبان اقلیمی در شمال ایران  
جعفر شریفی گرم‌دره - فرهاد خرمالی - کریستین رلف - مارتین کهل - علی شهریاری - مانفرد فرشن
- ۷۳۷ نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک (مطالعه موردی: مریوان، استان کردستان)  
شلیر اسکندری - کمال نبی‌اللهی - روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی
- ۷۵۱ تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تأثیر شدت چرای دام در مراتع مغان  
سیما جعفری - اردوان قربانی - کاظم هاشمی‌مجد - سحر غفاری
- ۷۶۳ تأثیر ژئولیت، ورمی‌کمپوست و کود حیوانی بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در ذرت  
سیده زهره تقدیسی حیدریان - رضا خراسانی - حجت امامی
- ۷۷۹ اثر زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف بر قابلیت استفاده روی و پاسخ‌های ذرت در یک خاک آلوده به روی  
پروین کبیری - حمیدرضا متقیان - علیرضا حسین پور
- ۷۹۵ ارزیابی زمین‌آماری پایداری خاکدانه‌ها و نسبت جذبی سدیم در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه  
شکراه اصغری - محمود شهابی
- ۸۰۹ تأثیر همزیستی میکوریزی بر جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی  
مرتضی پوزش شیرازی - حسن حقیقت‌نیا - رحیم خادمی
- ۸۲۱ بررسی رابطه تغییرات رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در رویشگاه جنگلی مله سیاه در استان ایلام  
جعفر حسین زاده - افسانه تنگو - علی نجفی‌فر - احمد حسینی
- ۸۳۱ ارزیابی عملکرد روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه دو اقلیم متفاوت  
جواد رمضان‌مقدم - مصطفی یعقوب زاده - احمد جعفرزاده





## بررسی ضرایب ورودی گیاهی مدل WOFOST در شرایط کم آبیاری بخشی ریشه برای گیاه آفتابگردان

سیده فاطمه هاشمی<sup>۱</sup> - علی شاهنظری<sup>۲\*</sup> - محمود رایینی<sup>۳</sup> - علی قدمی فیروز آبادی<sup>۴</sup> - ابراهیم امیری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

### چکیده

پژوهش‌هایی که تاکنون در پیوند با مدل WOFOST منتشر شده است، به روش‌های سنتی کم آبیاری معطوف بوده که یا به صورت درصد کم آبیاری در شرایط بهینه لحاظ می‌شده یا بر اساس بررسی شرایط رشد در روزهای معینی پس از آبیاری است. همچنین بررسی این پژوهش‌ها نشان می‌دهد با وجودی که گیاهان یکساله زیادی مبنای بررسی‌ها بوده‌اند، اما هیچ کدام شامل گیاه آفتابگردان نبوده است. لذا در این پژوهش آخرین نسخه مدل WOFOST در برآورد ضرایب گیاهی برای هر تیمار شبیه‌سازی واکنش آفتابگردان در طی دو سال زراعی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ در شرایط کم آبیاری بخشی ریشه و خشکی ریشه در دو سطح ۵۵ و ۷۵ درصد در مقایسه با شرایط آبیاری کامل مورد بررسی قرار گرفت. ضریب‌های به دست آمده مبنایی برای محاسبات میزان بهره‌وری مصرف آب در مزرعه پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری می‌باشد. نتایج حاصل از واسنجی نشان داد که ضرایب گیاهی وابسته به شرایط آب و هوایی، طول و عرض جغرافیایی منطقه و خصوصیات فنولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه برای یک گیاه خاص در طول شبیه‌سازی ثابت مانده و ضرایب آبیاری وابسته به نوع تیمارهای آبیاری بوده و رفتار آنها در طول دوره رشد توانایی تغییر دارد. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش حجم آب داده شده به گیاه، ضریب بیشینه آهنگ جذب دی‌اکسیدکربن در برگ و ضریب خاموشی کاهش و برعکس ضریب کارایی مصرف نور افزایش یافت. همچنین ارزیابی تمامی پارامترهای مورد بررسی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای نشان می‌دهد که شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نسبی (nRSME) عملکرد دانه و زیست توده کل در هر دو رقم مورد بررسی کمتر از ۱۰ درصد، شاخص ضریب جرم باقی مانده‌ها (CRM) نزدیک به صفر، ضریب کارایی مدل (EF) ۰/۸۹ و ضریب همبستگی (R) ۰/۹۶ بدست آمده و مدل به خوبی توانسته است با استفاده از ضرایب واسنجی شده، پاسخ گیاه آفتابگردان را در تیمارهای کم آبیاری شبیه‌سازی کند.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌وری مصرف آب، بیوماس، ضریب خاموشی، عملکرد دانه، مدل شبیه‌سازی رشد

### مقدمه

مدیریت کشاورزی شبیه‌سازی نماید (۲۲ و ۳۳). از عمده‌ترین این مدل‌ها می‌توان به WOFOST (۳۴)، EPIC (۳۰)، CERES (۲۴)، SPASS (۳۵)، STICS (۸)، SIMULAT (۱۳)، WARM (۱۴) و AquaCrop (۱۶) اشاره نمود.

از میان مدل‌های موجود، WOFOST<sup>۶</sup>، که مبتنی بر برهمکنش بین محصولات تولیدی و فاکتورهای اکولوژیکی بوده، از جمله مدل‌های گیاهی خانواده واخنینگن است که با مشارکت مرکز بیولوژیکی کشاورزی و حاصلخیزی خاک واخنینگن ایجاد گردید. این مدل از جمله مدل‌های علت و معلولی است که رشد و نمو محصولات را تابعی از دما، تابش خورشیدی و بارش در نظر می‌گیرد و توانایی شبیه‌سازی رشد گیاه را در بازه زمانی روزانه در شرایط آبیاری کامل و

مدل‌های گیاهی در مطالعه اثرات مختلف و در عین حال متقابل استراتژی‌های مدیریتی و محیطی مورد استفاده قرار گرفته و می‌تواند سناریوهایی مختلفی را تحت شرایط مختلف خاک، هوا، آبیاری و

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشیار و استاد دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری  
(\*)- نویسنده مسئول:  
(Email: Aliponh@yahoo.com)

۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

۵- استاد گروه کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.64170

و ۵۵ درصد در مقایسه با آبیاری کامل مورد استفاده قرار گرفته است و بعد از بررسی نتایج هر تیمار ضرایب گیاهی را برای هر تیمار محاسبه نموده تا مبنایی برای محاسبات میزان بهره‌وری مصرف آب در مزرعه پژوهشی دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

اطلاعات موردنیاز این مقاله، از یک پژوهش مزرعه‌ای انجام شده در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در استان مازندران (۱۷) با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۳/۰۴ درجه شرقی و ۳۶/۳۹ درجه شمالی و با ارتفاع ۱۳/۵ متر از سطح دریا، در طی دو فصل زراعی ۹۲-۱۳۹۱ و ۹۳-۱۳۹۲ روی گیاه آفتابگردان رقم آذر گل به دست آمد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده بر حسب نوع داده ورودی مدل به صورت روزانه در طی یک سال یا محدود به فصل رشد بوده که در جدول ۱، به صورت مجموع سالانه یا میانگین ارایه شده است که از ایستگاه هواشناسی دشت ناز واقع در ۱۵ کیلومتری مزرعه پژوهشی برداشت شد.

جدول ۱- پارامترهای هواشناسی در منطقه ساری

| پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد                                                                             | 2012<br>1391 | 2013<br>1392 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|
| Weather data in growth season                                                                                  |              |              |
| MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> میانگین تابش با طول موج کوتاه، MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> Irradiation | 13.77        | 14.02        |
| C میانگین کمینه دمای روزانه، C Minimum temperature                                                             | 13.4         | 12.9         |
| C میانگین بیشینه دمای روزانه، C Maximum temperature                                                            | 23.6         | 22.9         |
| Early morning vapour pressure (%) میانگین رطوبت نسبی (درصد)                                                    | 75           | 75           |
| mm تبخیر سالانه، mm Annual evaporation                                                                         | 1146         | 1222         |
| mm بارش سالانه، mm Precipitation                                                                               | 590.7        | 568          |
| km/hr میانگین سرعت باد، km/hr Mean wind speed                                                                  | 2            | 2            |

### خصوصیات فیزیکی خاک منطقه

با توجه به اینکه مدل WOFOST تنها یک لایه عمق ریشه‌دوانی را در نظر می‌گیرد، اعماق ۲۰-، ۴۰- و ۶۰- سانتی‌متری مبنای شبیه‌سازی قرار گرفته است. برخی از خصوصیات خاک مزرعه پژوهشی به‌عنوان اطلاعات ورودی بخش خاک مدل WOFOST در جدول ۲ ارایه شده است.

محدود شده (کم‌آبیاری) داراست. اساساً این مدل برای مناطقی توسعه یافته است که اقلیم، خاک و داده‌های گیاهی در آن همگن فرض شده و در دوره رشد با رویکرد فتوسنتزی خود، می‌تواند بطور روزانه تجمع زیست‌توده و چگونگی توزیع آن را در اندام‌های گیاهی محاسبه نماید (۶).

از اولین کارهای شبیه‌سازی که با این مدل انجام گرفته شبیه‌سازی رشد گیاه در کشورهای آفریقایی بوركینافاسو، غنا و کنیا بود که عملکرد پتانسیل گیاهان را در این کشورها مورد بررسی قرار داده و منجر به افزایش استفاده از کود شیمیایی در این کشورها شده است (۱۲). با انتشار این مدل، توانایی قدرتمند این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده گیاهان مختلف تحت بیلان‌های مختلف آبی و شرایط محیطی مختلف و رژیم‌های آبیاری گزارش شده است. در بخشی از این تحقیقات، به شبیه‌سازی محصولات عمده سالانه تحت شرایط فعلی یا آینده (۳۴) یا در طی چند سال متوالی (۴ و ۲۷) پرداخته شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی با WOFOST با نتایج حاصل از بسیاری از مطالعات آزمایشگاهی (۲۵) و مزرعه‌ای (۱۵، ۲۲ و ۲۶) اعتبارسنجی شده است. بخشی از این تحقیقات، به ارزیابی کارایی مدل WOFOST در کنار سایر مدل‌های شبیه‌سازی رشد فیزیکی گیاه اختصاص دارد (۴ و ۳۴). در زمینه شبیه‌سازی فرایند رشد و تاثیر آب بر عملکرد و بهره‌وری، شاهین‌رخسار و امیری (۳۲) دو رقم سویا را تحت مدیریت کم‌آبیاری ۵۰ و ۷۵ درصد و تیمار شاهد آبیاری کامل در منطقه گرگان در سال ۱۳۹۰ اجرا نمودند که کارایی مطلوب مدل WOFOST را در شبیه‌سازی سویا نشان داد. همچنین می‌توان به شبیه‌سازی فرایند رشد و نمو برنج در منطقه رشت طی دو سال ۱۳۸۳-۱۳۸۲ اشاره نمود (۲۷). تلفیق مدل WFOSOT و سیستم پایش عملکرد رشد<sup>۱</sup> در محاسبه شکاف عملکرد گندم پاییزه در محدوده اروپا به‌کار گرفته شد که در نهایت به‌علت اشتباه در برآورد مقادیر فنولوژیکی، تخمین پایین‌تر از حد معمول بوده ولی به‌خوبی توانسته شکاف‌های عملکردی را تحت پوشش قرار دهد (۶).

تحقیقاتی که تاکنون در ارتباط با استفاده از مدل WOFOST منتشر شده است، به روش‌های سنتی کم‌آبیاری معطوف بوده که یا به‌صورت درصد کم‌آبیاری در شرایط بهینه لحاظ می‌شده (۲) یا بر اساس بررسی شرایط رشد در روزهای معین بعد از آبیاری است (۵)، (۲۱ و ۲۷). همچنین بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد که با وجودی که گیاهان یکساله زیادی مبنای تحقیقات بوده‌اند، اما در مورد گیاه آفتابگردان، چیزی منتشر نشده است. لذا در این تحقیق آخرین نسخه مدل WOFOST در شبیه‌سازی واکنش آفتابگردان در شرایط کم‌آبیاری تنظیم شده (DI<sup>۲</sup>) و بخشی ریشه (PRD<sup>۳</sup>) در دو سطح ۷۵

1- Crop Growth Monitoring System

2- Regulated Deficit Irrigation

3- Partial root- zone drying

## تیمارهای آبیاری و شیوه اجرای طرح

قدمی (۱۷) به منظور بررسی اثر کم آبیاری تنظیم شده و بخشی بر عملکرد محصول و شاخص برداشت این پژوهش را در قالب طرح های بلوک کامل تصادفی با پنج تیمار آبی آبیاری کامل، کم آبیاری تنظیم شده و کم آبیاری خشکی ناحیه ریشه در دو سطح ۵۵ و ۷۵ درصد نیاز

آبی در سه تکرار در زمینی به مساحت کلی حدود ۸۰۰ متر مربع انجام داده است. از داده های این پژوهش برای تیپ رشدی و مراحل فنولوژیکی و همین طور ارزیابی آماری پارامترهای گیاهی آفتابگردان و مدل WOFOST استفاده شده است. زمان وقوع مراحل فنولوژیکی برای گیاه آفتابگردان در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۲- خصوصیات خاک منطقه مطالعاتی در عمق ریشه دوانی

Table 2- Soil characteristic of research region in rooting depth

| وزن مخصوص ظاهری                    | رطوبت در نقطه پژمردگی دائم  | رطوبت در حد ظرفیت زراعی | بافت        | عمق (cm)   |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|------------|
| Bulk Density (gr/cm <sup>3</sup> ) | Permanent Wilting Point (%) | Field Capacity (%)      | Texture     | Depth (cm) |
| 1.46                               | 15.4                        | 30.3                    | Sandy- Loam | 0-20       |
| 1.36                               | 15.6                        | 32.5                    | Clay- loam  | 20-40      |
| 1.35                               | 14                          | 32                      | Clay- loam  | 40-60      |

جدول ۳- اطلاعات مربوط به تاریخ کاشت و برداشت

Table 3- Data about Sowing and harvesting

| رسیدگی کامل فیزیولوژیکی | تاریخ گل دهی   | تاریخ جوانه زنی | تاریخ کاشت  | سال  |
|-------------------------|----------------|-----------------|-------------|------|
| Maturity date           | Flowering date | emergence date  | Sowing date | year |
| ۳ شهریور                | ۲۷ تیر         | نهم خرداد       | سوم خرداد   | ۱۳۹۱ |
| 25 August               | 14 July        | 30 May          | 24 May      | 2012 |
| روز از سال میلادی       | 244            | 206             | 157         | 151  |
| day number of the year  |                |                 |             |      |
| ۲۴ مرداد                | ۲۱ تیر         | ۳۱ اردیبهشت     | ۲۵ اردیبهشت | ۱۳۹۲ |
| 15 August               | 12 July        | 21 May          | 15 May      | 2013 |
| روز از سال میلادی       | 235            | 202             | 156         | 150  |
| day number of the year  |                |                 |             |      |

در زمان رسیدگی فیزیولوژیکی، در هر کرت با حذف ردیف های کناری و ابتدا و انتها، از کرت های وسط برای هر تیمار ۱۵ گیاه به طور تصادفی انتخاب گردید (۱۷). ارزیابی ها در ۵ دوره زمانی که به ترتیب ۵۲، ۵۹، ۶۶، ۷۳ و ۸۰ روز بعد از کاشت بود، انجام شد.

## رویکرد WOFOST

در این مطالعه سعی شده است تا شبیه سازی الگوی رشد گیاه آفتابگردان تحت تیمارهای کم آبیاری، پُرآبیاری و آبیاری بخشی ریشه با استفاده از مدل WOFOST نسخه ۷.۱.۳ مورد ارزیابی قرار گیرد. WOFOST مدلی مبتنی بر فرایندهای مکانیکی است که رشد گیاه را بر اساس جداسازی نور و جذب CO<sub>2</sub> به عنوان فرایند رشد و توسعه فنولوژیکی را به عنوان فرایند کنترل کننده رشد بیان می کند. برای گیاه آفتابگردان دو مرحله توسعه گیاهی با استفاده از متغیرهای بدون بعد بیان می شود که عدد صفر و دو به ترتیب نشان دهنده جوانه زنی و برداشت می باشد. این مدل می تواند عملکرد نهایی، شاخص سطح برگ، سرعت رشد محصول، میزان تجمع ماده خشک در هر یک از اندام ها، میزان تابش جذب شده و مراحل رشد را با فواصل یک روزه

به عنوان خروجی در وضعیت پتانسیل رشد گیاه بدون عوامل محدود کننده رشد، وضعیت محدودیت آب و محاسبه مواد غذایی در شرایط محدودیت آبی را شبیه سازی نماید (۷ و ۳۳). از آنجایی که مدل میزان تعرق پتانسیل را مبتنی بر روش پنمن (۲۳) از یک سو و از سویی دیگر تبخیر روزانه خاک را توسط رابطه جارویس و همکاران (۱۸) محاسبه می کند، توانایی جداسازی تبخیر از تعرق را دارد. تخمین میزان جذب و میزان رشد گیاه بر اساس رابطه ۱ محاسبه می شود (۳۴).

$$A = \frac{T_a}{T_p} * A_p \quad (1)$$

که A میزان جذب واقعی، A<sub>p</sub> میزان جذب پتانسیل، T<sub>a</sub> میزان تعرق واقعی، T<sub>p</sub> میزان تعرق پتانسیل است.

## شبیه سازی الگوی رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از مدل WOFOST

اگرچه مدل مبتنی بر فرایندهای بیوفیزیکی پیچیده است، اما نیاز به پارامترهای ورودی کمی دارد (۶). عمده ترین داده های ورودی شامل: موقعیت مکانی، پارامترهای هواشناسی، گیاهی، خاک و مواد

اندام‌های ذخیره ( $\text{kg. ha}^{-1}$ ) و در ۵ دوره زمانی که به ترتیب ۵۲، ۵۹، ۶۶، ۷۳ و ۸۰ روز بعد از کاشت است، استفاده شد. سپس مدل با استفاده از دو روش ترسیمی و شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطای نرمال (nRMSE)، خطای متوسط (ME)، ضریب جرم باقی‌مانده (CRM)، معیار خطای نسبی (RE)، کارایی مدل (EF) و آزمون F مورد ارزیابی قرار گرفت.

## نتایج و بحث

### نتایج واسنجی مدل

از آن‌جایی که مدل مذکور در شبیه‌سازی شرایط کم‌آبیاری نمی‌تواند تفاوت روش‌های DI و PRD را در هر یک از سطوح کاربردی آن در میزان عملکرد به خوبی توصیف نماید و میزان کم‌آبیاری را تنها وابسته به عمق نیاز آبی در نظر می‌گیرد، بنابراین مدل برای هر کدام از تیمارها برای سال زراعی ۱۳۹۱ مورد واسنجی قرار گرفت و در ادامه مدل برای هر دو سال زراعی ارزیابی شد. بایستی توجه نمود که واسنجی در طی دو مرحله انجام شد. در مرحله اول، ضرایب گیاهی‌ای واسنجی شد که با توجه به منطقه مورد مطالعه، شرایط آب و هوایی و گیاه آفتابگردان در طی این پژوهش متغیر بوده و لذا برای همه تیمارها ثابت در نظر گرفته شد. نتایج این ضرایب در جدول ۴ ارائه شده است.

در مرحله دوم، سایر پارامترهای ضروری که مدل به آنها حساسیت بیشتری داشته و مستقیماً بر میزان شاخص برداشت، عملکرد توده زنده و متوسط عملکرد تاثیرگذار بوده مشخص شده است. این ضرایب که مشخص‌کننده نوع تیمارها هستند، در شکل ۱ ارائه شده است. عبارات  $L_1$ ،  $L_2$  و  $L_3$  به ترتیب به سطور یک، دو و سه که برای هر ضریب در مدل وجود دارد، اشاره دارد. بررسی ضرایب گیاهی شکل ۱ نشان می‌دهد که هر چه درصد اعمال کم‌آبیاری بیشتر شود یا به عبارت دیگر میزان آبیاری کاهش یابد،  $KDFTB$  و  $AMAXTB$  روند نزولی یافته و کاهش می‌یابد.

برای نمونه پارامتر  $AMAXTB$  در هر سه سطر، در آبیاری کامل بیشترین میزان بوده و با کاهش میزان آب داده شده به گیاه، کاهش خواهد یافت، به طوری که در تیمار DI 55 کمترین میزان را در تمامی سطور به خود اختصاص می‌دهد. بررسی جزئیات در اثرات سطور مختلف هم نشان می‌دهد که سطر اول این پارامتر، تاثیر زیادی بر میزان عملکرد متوسط محصول داشته و دو سطر دیگر بر میزان عملکرد زیست‌توده و شاخص برداشت تاثیرگذار است، به طوری که با

غذایی موجود در خاک است که در طی چند مرحله در مدل ویرایش می‌شود. هدف از این پژوهش، به دست آوردن پارامترهای گیاهی آفتابگردان برای هر یک از تیمارهای آبیاری کامل (FI)، کم‌آبیاری تنظیم‌شده در سطح ۷۵ و ۵۵ (PRD 55, 75) و آبیاری بخشی ریشه (DI 55, 75) است که در روش اول ۷۵ و ۵۵ درصد آب مورد نیاز در دوره‌های غیر حساس به گیاه داده می‌شود تا از کاهش معنادار محصول جلوگیری نماید و در روش دوم منطقه ریشه به نواحی مختلف تقسیم شده و در هر بار آبیاری یک یا چند ناحیه به میزان ۷۵ و ۵۵ درصد بر حسب نوع تیمار آبیاری شده و نواحی دیگر خشک رها می‌شود و این عمل به صورت تناوبی تکرار می‌گردد (۲). از آن‌جایی که مدل، میزان آب آبیاری را مستقیماً در نظر نمی‌گیرد، لذا مقدار آب آبیاری، بر حسب نوع تیمار اعمال شده، در تاریخ‌های اعمال تیمار، به بارندگی روزانه اضافه می‌شود. لذا به تعداد تیمارهای آبیاری، بایستی فایل‌های هواشناسی مجزایی در مدل تعریف گردد. بایستی توجه نمود که در سطوح ۵۵ درصد و ۷۵ درصد، میزان آب ورودی در روزهای آبیاری، در هر یک از تیمارهای PRD و DI برابر خواهد شد، لذا مدل تمایزی بین این روش‌ها قایل نخواهد شد و نمی‌تواند برخی از خصوصیات روش‌های PRD را نسبت به روش‌های سنتی گفته شده توصیف نماید که می‌تواند از جمله کاستی‌های مدل شبیه‌ساز WOFOST باشد و مستلزم در نظر گرفتن سایر مدل‌های شبیه‌سازی تفکیک‌کننده نظیر روش‌های مختلف کم‌آبیاری از جمله روش بخشی یا تنظیم شده است. بر همین اساس با توجه به ماهیت PRD و DI که متمایز از روش‌های سنتی اعمال کم‌آبیاری هستند، به میزان ۰/۰۲ در هر یک از سطوح به تیمارهای PRD اضافه شد تا بتوان تمایز مورد بحث را پوشش داد. از سویی دیگر، اجزای بهره‌وری آب که شامل  $WP_I$  (بهره‌وری بر اساس میزان آب آبیاری) و  $WP_{I+R}$  (بهره‌وری بر اساس مجموع آب آبیاری و بارش) است بررسی شد که در روابط ۲ و ۳ به ترتیب بیان شده است (۲۸). شاخص برداشت نیز از جمله پارامترهای مهم در تحلیل‌های زراعی است که توسط دونالد و هامبلین (۱۴) طبق رابطه ۴ قابل محاسبه است. در نهایت، بیان آب در طول فصل زراعی طبق رابطه ۵ آورده شده است.

$$WP_I = \frac{Y_g}{I} \quad (2)$$

$$WP_{I+R} = \frac{Y_g}{I+R} \quad (3)$$

$$HI = \frac{Biomass}{Seed} \quad (4)$$

$$I+R = E+T+D+\Delta W \quad (5)$$

در این روابط،  $Y_g$  مقدار عملکرد ( $\text{kg/ha}$ )،  $E$  و  $T$  به ترتیب مقدار تعرق و تبخیر شبیه‌سازی شده مدل ( $\text{mm}$ )،  $R$  و  $I$  میزان بارش ( $\text{mm}$ ) و میزان آبیاری ( $\text{mm}^3$ )،  $Biomass$  و  $Seed$  به ترتیب عملکرد محصول و عملکرد دانه ( $\text{kg. ha}^{-1}$ )،  $D$  و  $\Delta W$  به ترتیب نفوذ عمقی و تغییرات آب ذخیره شده در منطقه ریشه ( $\text{mm}$ ) است. برای صحت‌سنجی مدل از ۷۵ مقدار عملکرد دانه و عملکرد زیست‌توده کل که مشتمل بر وزن خشک برگ، وزن خشک ساقه و وزن خشک

1- Extinction coefficient for diffuse visiblelight [-] as function of DVS

2- Maximum leaf CO2 assimilation as function of DVS

کاهش سطر اول، عملکرد تا حد زیادی کاهش یافته ولی دو شاخص دیگر، تغییرات کمی دارند. چنین روندی مستقیماً بر سطرهای دوم و سوم هم نیز حاکم است.

جدول ۴- ضرایب گیاهی آفتابگردان واسنجی شده توسط مدل  
Table 4-Plant coefficient of Sunflower calibrated by model

| پارامتر<br>Parameter                                                                                | مقدار<br>Value                                                           | واحد<br>Unit        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| TSUM1<br>مجموع دما روزانه از جوانه زنی تا گلدهی<br>temperature sum from emergence to anthesis       | 1300                                                                     | °Cday               |
| TSUM2<br>مجموع دما روزانه از گلدهی تا رسیدن<br>temperature sum from anthesis to maturity            | 1000                                                                     | Cday°               |
| DVSI<br>مرحله توسعه رشد اولیه<br>initial DVS                                                        | 0                                                                        | -                   |
| DVSEND<br>مرحله توسعه برداشت<br>development stage at harvest                                        | 2                                                                        |                     |
| SLATB<br>سطح ویژه برگ به صورت تابعی از مراحل رشد<br>specific leaf area as a function of DVS         | 0, 0.0025<br>0.002, 1<br>0.002, 2X                                       | ha kg <sup>-1</sup> |
| SPAN<br>طول عمر برگ در حال رشد<br>life span of leaves growing                                       | 85                                                                       | day                 |
| RDI<br>عمق اولیه ریشه<br>initial rooting depth                                                      | 10                                                                       | cm                  |
| RRI<br>بیشینه افزایش روزانه در عمق ریشه<br>maximum daily increase in rooting depth                  | 1.2                                                                      | cm/day              |
| RDMCR<br>حد اکثر عمق ریشه در دوران بلوغ<br>maximum rooting depth                                    | 150                                                                      | cm                  |
| FOTB<br>کسر ماده خشک بالای سطح زمین به اندامهای ذخیره<br>fraction of above-gr. DM to storage organs | 0, 0.85<br>0, 0.91<br>0, 1<br>0, 1.22<br>1, 1.55<br>1, 2                 | kg kg <sup>-1</sup> |
| FSTB<br>کسر ماده خشک بالای سطح زمین به ساقه<br>fraction of above-gr. DM to stems                    | 0, 0.5<br>0.8, 0.5<br>0.91, 0.51<br>1, 0.8<br>1.22, 1<br>1.55, 0<br>0, 2 | kg kg <sup>-1</sup> |
| LAIEM<br>شاخص سطح برگ در جوانه زنی<br>leaf area index at emergence                                  | 0.0053                                                                   | ha ha <sup>-1</sup> |
| TSUMEM<br>زمان حرارتی از کاشت تا جوانه زنی<br>temperature sum from sowing to emergence              | 130                                                                      | °Cday <sup>1</sup>  |

اثرات کلی بر هم داشته و لازم است که هم به صورت مجزا و هم به صورت کلی با هم سنجیده شود.

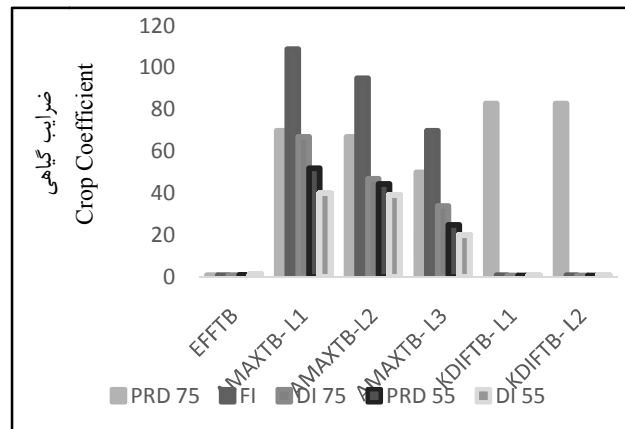
#### نتایج ارزیابی مدل

نتایج پارامترهای آماری که برای ارزیابی مدل WOFOST استفاده شد، در جدول ۵ ارائه شده است. بررسی RMSE پارامترهای مورد بررسی در طی دو سال زراعی، در تمام تیمارها نشان می‌دهد که پارامتر زیست توده کل کمترین میزان RMSE را دارا بوده که در اکثر تیمارها نزدیک به صفر می‌باشد، به ویژه در تمام تیمارهای سال ۱۳۹۲ که بهترین تطابق بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای وجود

از سویی دیگر پارامتر KDIFTB نیز از جمله پارامترهایی است که مستقیماً بر شاخص عملکرد متوسط موثر است اما بررسی نتایج حاصل از واسنجی این پارامتر نشان داد که تاثیر چشمگیری بر میزان زیست توده کل و شاخص برداشت ندارد. این پارامتر نیز با کاهش میزان آبیاری، کاهش می‌یابد. همچنین پارامتر<sup>۱</sup> EFFT<sup>۱</sup> نیز بر زیست توده کل و شاخص برداشت موثر است و با کاهش میزان آبیاری، مقادیر آن افزایش یافته است. البته باید توجه داشت این اعداد

1- Initial light-use efficiency of CO<sub>2</sub> assimilation of single leaves as function of daily temperature

دارد. همچنین نتایج RMSE پارامتر متوسط عملکرد ارقام قابل قبولی بوده که در بازه ۰/۲ تا ۰/۳۸ تن در هکتار متغیر است.



شکل ۱- نمودار ضرایب گیاهی تیمارهای مختلف آبیاری  
Figure 1- Crop Coefficient of each treatments

می‌دهد. همچنین بررسی اجمالی مقادیر RMSE و nRMSE سه پارامتر شاخص سطح برگ، عملکرد متوسط و زیست‌توده کل در طی دو سال زراعی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد در هر دو سال، زیست‌توده کل نسبت به عملکرد متوسط تطابق بهتری بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده وجود دارد. به‌طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت nRMSE زیست‌توده در هر ۵ تیمار در طی دو سال مورد بررسی کمتر از ۱۰ درصد بوده که در دامنه عالی قرار دارد (۱۹) که با نتایج تحقیقات صورت گرفته مرتبط با مدل WOFOST مطابقت دارد (۴، ۲، ۵، ۲۷ و ۳۲). بررسی CRM نیز نشان می‌دهد که این آماره در اکثر موارد نزدیک به صفر یا صفر بوده که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل است. بررسی دقیق‌تر این آماره نشان می‌دهد که شاخص سطح برگ در تمام این موارد اختلاف ناچیزی با صفر داشته که نشان‌دهنده دقت بالای مدل است، اما در اکثر موارد این آماره منفی بوده که گویای این حقیقت است که مدل برآورد کمتری از مقدار مشاهده‌ای دارد. همچنین بررسی اجمالی این آماره نشان می‌دهد که دقت شبیه‌سازی در سال ۱۳۹۱ نسبت به سال ۱۳۹۲ بیشتر بوده است. RE نیز در محدوده قابل قبولی بوده که در اکثر تیمارها در سال‌های زراعی نزدیک به صفر بوده که کارایی خوب مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با نتایج تحقیقات صورت گرفته مطابقت دارد (۴، ۲، ۵، ۲۷ و ۳۲). همچنین نتایج ارزیابی کارایی مدل در برآورد سه پارامتر نشان داد اگرچه بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده مطابقت مطلوبی وجود دارد که نشان دهنده کارایی بالای مدل می‌باشد، با این حال، کارایی مدل در سال ۱۳۹۲ بهتر از ۱۳۹۱ بوده است. چنین روندی در مورد خطای نسبی بین تیمارها و تمام پارامترها نیز قابل مشاهده و استناد است. از این میان، تیمار DI 55 در سال

از این میان شاخص سطح برگ، نسبت به دو پارامتر دیگر در هر دو سال و برای همه تیمارهای مورد بحث ارقام بالاتر از این دامنه را به خود اختصاص داده (۰/۳۶-۱/۲۶ هکتار در هکتار  $ha\ ha^{-1}$ ) که اگرچه این اعداد همواره نزدیک به یک می‌باشند و نشان‌دهنده اختلاف کم بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای است، با این حال با سایر ارقام در این مقایسه، اختلاف بیشتری دارند. بالا بودن RMSE در شاخص سطح برگ نشان می‌دهد که مدل شاید نتواند این پارامتر را به دقت سایر موارد شبیه‌سازی نماید که از این جهت با نتایج امیری و همکاران (۴) که روی گیاه برنج و در شرایط غرقاب دائم و آبیاری پس از ۱، ۳ و ۵ روز محو شدن آب از سطح زمین و آبیاری با دوره‌های ۵ و ۸ روزه بوده مطابقت دارد. البته بایستی سایر آزمون‌های آماری را نیز مورد بررسی قرار داد. بررسی nRMSE برای همه تیمارها و همه پارامترهای مورد بررسی در هر دو سال زراعی، روند معکوسی داشته است. به‌طوری‌که شاخص سطح برگ همواره کمتر از ۱۰ درصد بوده که آن‌را در دامنه عالی قرار می‌دهد (۱۹) که با نتایج بررسی آماره RMSE در همین پژوهش و همچنین امیری و همکاران (۴ و ۵) و تودوروویچ و همکاران (۳۵) همخوانی ندارد. چنین روندی کم‌وبیش در پارامترهای زیست‌توده کل هم مشاهده شده است که همواره این آماره کمتر از ۱۰ درصد و یا نزدیک به آن (حدوداً ۱۱ درصد) بوده و از این میزان فراتر نرفته که آن‌را در محدوده خوب تا عالی قرار می‌دهد. همچنین بررسی اعداد این آماره در تمام تیمارها در دو طی دو سال زراعی نشان می‌دهد که مدل در ارزیابی متوسط زیست‌توده کل در تمام تیمارها تا حدی نسبت به سایر پارامترها ضعیف عمل کرده است و nRMSE آن بیشتر از ۱۰ درصد و در تعدادی از آنها بیشتر از ۲۰ درصد هم بوده که آن‌را در رده خوب جای



۱۳۹۲، بهترین تطابق را بین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده دارد. از سویی دیگر، نتایج آزمون  $t$  در سطح احتمال ۹۵ درصد نشان داد که تفاوت معناداری بین مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای وجود ندارد ( $T_{test} > 0.05$ ). البته این روند در تیمارهای 55، 75 DI در سال ۱۳۹۲

جدول ۵- نتایج ارزیابی شبیه سازی حاصل از مدل WOFOST

Table 5- Result of evaluation of WOFOST Model

|                                                            | سال  | تیمار     | RMSE<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | nRMSE<br>(%) | CRM<br>(%) | RE<br>(%) | ME<br>(%) | EF<br>(%) | T <sub>test</sub> |
|------------------------------------------------------------|------|-----------|-------------------------------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
|                                                            | Year | Treatment |                               |              |            |           |           |           |                   |
| total above ground product<br>مجموعه عملکرد                | ۱۳۹۱ | FI        | 0.25                          | 13.35        | -2.44      | 0.08      | 0.02      | 4.89      | 0.07              |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.38                          | 27.2         | -1.35      | 0.07      | 0.08      | 12.2      | 0.08              |
|                                                            |      | DI 75     | 0.2                           | 15.82        | -1.03      | 0.08      | -0.04     | 6.8       | 0.057             |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.28                          | 26.6         | -2.04      | 0.13      | -0.06     | 13.8      | 0.032             |
|                                                            |      | DI 55     | 0.33                          | 22.9         | -7.87      | 0.14      | 0.01      | 7.9       | 0.07              |
|                                                            | ۱۳۹۲ | FI        | 0.34                          | 20.66        | -2.73      | 0.06      | 0         | 7.8       | 0.033             |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.38                          | 23           | 1.15       | 0.02      | -0.09     | 10.7      | 0.052             |
|                                                            |      | DI 75     | 0.37                          | 28           | 1.37       | 0.03      | -0.09     | 9.63      | 0.053             |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.33                          | 27           | 3.17       | 0.01      | -0.08     | 9.1       | 0.052             |
|                                                            |      | DI 55     | 0.26                          | 28.41        | -0.68      | 0.07      | -0.05     | 9.4       | 0.044             |
| total dry weight of storage organs<br>مجموعه وزن خشک اندام | ۱۳۹۱ | FI        | 0.09                          | 4.12         | -1.85      | 0.02      | 0.01      | 0.61      | 0.079             |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.04                          | 1.01         | 0.09       | 0         | 0         | 0.23      | 0.06              |
|                                                            |      | DI 75     | 0.03                          | 1.03         | 0.11       | 0         | 0         | 0.25      | 0.317             |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.01                          | 0.95         | 0          | 0         | 0         | 0.17      | 0.426             |
|                                                            |      | DI 55     | 0.2                           | 11           | -7.05      | 0.08      | 0.04      | 3.08      | 0.061             |
|                                                            | ۱۳۹۲ | FI        | 0.1                           | 3.8          | -1.95      | 0.03      | 0.01      | 1.23      | 0.321             |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.16                          | 3.9          | 2.9        | 0.08      | -0.04     | 3.5       | 0.03              |
|                                                            |      | DI 75     | 0.15                          | 4.56         | 3.2        | -0.07     | -0.03     | 2.6       | 0.051             |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.14                          | 6.5          | 4.73       | -0.07     | -0.03     | 3.13      | 0.09              |
|                                                            |      | DI 55     | 0.07                          | 3.57         | 1.25       | -0.01     | 0         | 0.8       | 0.056             |
| leaf area index<br>شاخص سطح برگ                            | ۱۳۹۱ | FI        | 1.26                          | 4.3          | -0.02      | 0.05      | -0.02     | 3.87      | 0.93              |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.69                          | 2.25         | 0.03       | -0.06     | 0.03      | 2.86      | 0.09              |
|                                                            |      | DI 75     | 0.52                          | 2.2          | -0.07      | 0.12      | -0.06     | 2.13      | 0.06              |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.46                          | 1.18         | 0.04       | -0.07     | 0.03      | 1.19      | 0.09              |
|                                                            |      | DI 55     | 0.36                          | 1.83         | -0.08      | 0.11      | -0.05     | 0.93      | 0.05              |
|                                                            | ۱۳۹۲ | FI        | 1.24                          | 4.16         | 0.1        | -0.2      | 0.1       | 2.72      | 0.09              |
|                                                            |      | PRD 75    | 0.95                          | 3.7          | 0.11       | -0.23     | 0.11      | 1.64      | 0.41              |
|                                                            |      | DI 75     | 0.8                           | 3.46         | -0.02      | 0.03      | -0.01     | 1.31      | 0.47              |
|                                                            |      | PRD 55    | 0.77                          | 3.32         | 0          | 0.02      | -0.01     | 1         | 0.42              |
|                                                            |      | DI 55     | 0.5                           | 2.64         | 0          | 0         | 0         | 0.7       | 0.94              |

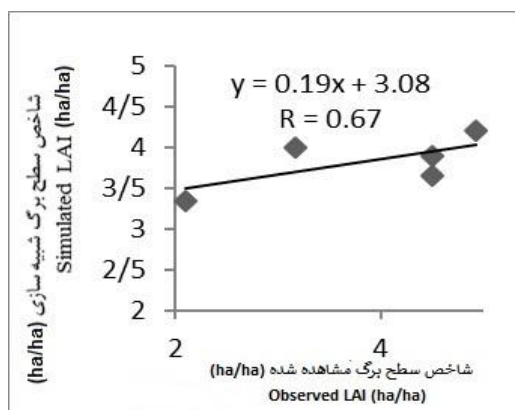
نشان داد که مدل توانایی کمی در شبیه سازی شاخص سطح برگ دارد که با نتایج آمیری و همکاران (۴ و ۵) مطابقت دارد که در ارزیابی RMSE نیز چنین مشاهده شده است.

در جدول ۶ عملکرد دانه، زیست توده، شاخص سطح برگ و شاخص برداشت شبیه سازی شده و مشاهده شده ای (۱۷) تیمارهای مختلف در سال ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ مشاهده می شود. بر اساس نتایج جدول ۶، مدل تمام تیمارهای آبیاری پارامترهای شبیه سازی شده در سال ۱۳۹۲ را کمتر از مقدار مشاهده شده تخمین زده است که روند آن مطابق با خطای نسبی محاسبه شده در جدول ۵ است که با توجه به آزمون های ارزیابی، نتایج همچنان قابل استناد و در محدوده قابل قبولی قرار دارد. لازم به توضیح است که شاخص سطح برگ اشاره شده در جدول ۶، برای مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی مربوط به بیشینه دوره رشد گیاه است.

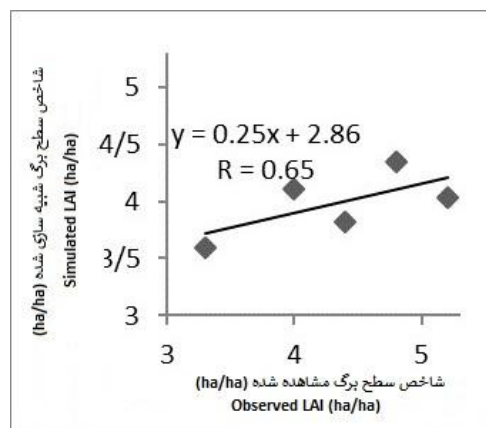
مقایسه مقادیر مشاهده شده عملکرد دانه، شاخص سطح برگ و زیست توده با مقادیر شبیه سازی شده ای آن به وسیله مدل، با خط یک به یک در شکل ۲ الف، ب و ج نشان داده شده است. ضریب همبستگی ( $R$ ) یک به یک محاسبه شده بین عملکرد دانه، بیوماس کل و شاخص سطح برگ شبیه سازی شده و مشاهده شده برای سال ۱۳۹۱ به ترتیب برابر با ۰/۹۴، ۰/۹۷ و ۰/۴۳ حاصل شد که کارکرد این مدل را در پیش بینی عملکرد آفتابگردان مورد تأیید قرار می دهد. همچنین همین آماره برای سال ۱۳۹۲ به ترتیب برای عملکرد دانه، بیوماس کل و شاخص سطح برگ شبیه سازی شده و مشاهده شده برابر با ۰/۷۱، ۰/۹۲ و ۰/۴۶ به دست آمد. بررسی نمودارها همچنین نشان می دهد که زیست توده شبیه سازی شده در اکثر تیمارها کمتر از مقادیر مشاهده شده است که با نتایج سعادت و همکاران (۲۷) مطابقت دارد. همچنین بررسی شاخص سطح برگ در طی دو سال زراعی نیز

بین این دو تیمار به خوبی در مقادیر اندازه‌گیری کارایی و برتری اعمال تیمار PRD 75 را نشان می‌دهد. همین مسئله مبنای مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی شده بین این دو تیمار شده است که نتایج آزمون  $T_{test}$  در سطح احتمال ۹۵٪ در جدول ۷ آورده شده است ( $T_{test} > 0/05$ ).

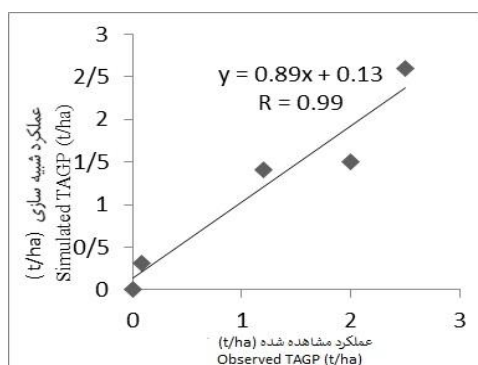
از آنجایی که مقاله حاضر مبتنی بر کار تحقیقاتی انجام شده قدمی (۱۷) می‌باشد و از نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده آن در تحلیل نتایج شبیه‌سازی مدل استفاده شد، بررسی نتایج در میزان متوسط عملکرد، زیست‌توده کل و شاخص سطح برگ نشان داد که اگرچه بین تیمارهای PRD، DI 55، DI 75 و تیمار آبیاری کامل (FI) اختلاف معناداری مشاهده شده است، ولی بین تیمارهای FI و PRD 75 اختلافی وجود نداشته و در واقع طبق انتظار میزان عملکرد



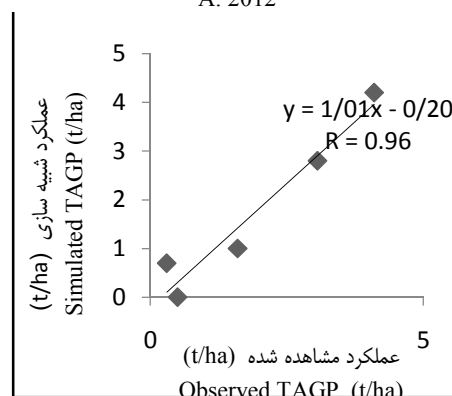
ب: ۱۳۹۲  
B: 2013



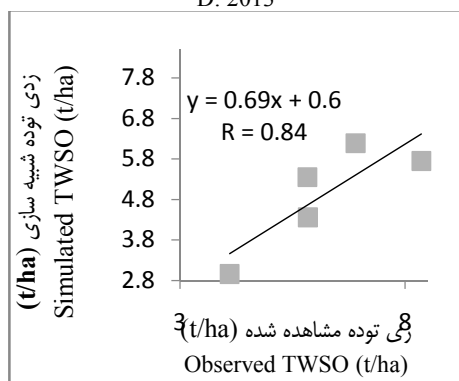
الف: ۱۳۹۱  
A: 2012



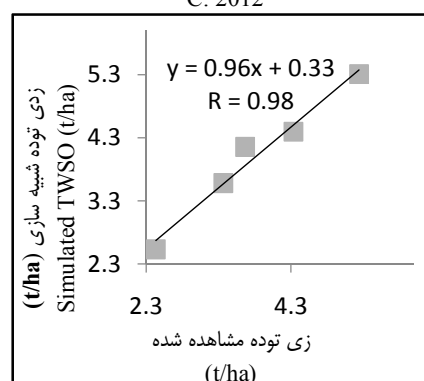
ج: ۱۳۹۲  
D: 2013



پ: ۱۳۹۱  
C: 2012



ه: ۱۳۹۲



د: ۱۳۹۱

H: 2013

E: 2012

شکل ۲- نمودارهای یک به یک پارامترهای مورد بررسی

Figure 2- 1:1 figures of evaluated parameters

جدول ۶- مقادیر شبیه سازی و مشاهده ای پارامترهای گیاهی با استفاده از مدل WOFOST

Table 6- Simulated and Observed values of crop parameters by WOFOST

| سال<br>Year  | تیمار<br>Treatment | شبیه سازی<br>Simulated                                                    |                                                                            |                                 |                                                                      | مشاهده شده<br>Observed                                                    |                                                                        |                                 |                                                                         |
|--------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
|              |                    | متوسط<br>عملکرد<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>TAGP<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | عملکرد زیست<br>توده (t ha <sup>-1</sup> )<br>TWSO<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | شاخص<br>برداشت<br>(%)<br>HI (%) | شاخص سطح برگ<br>(ha ha <sup>-1</sup> )<br>LAI (ha ha <sup>-1</sup> ) | متوسط<br>عملکرد<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>TAGP<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | زیست<br>توده<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>TWSO<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | شاخص<br>برداشت<br>(%)<br>HI (%) | شاخص سطح<br>برگ<br>(ha ha <sup>-1</sup> )<br>LAI (ha ha <sup>-1</sup> ) |
| ۱۳۹۱<br>2012 | FI                 | 20.74                                                                     | 5.30                                                                       | 0.26                            | 7.99                                                                 | 20.74                                                                     | 5.31                                                                   | 0.25                            | 7.6                                                                     |
|              | PRD 75             | 16.45                                                                     | 5.27                                                                       | 0.32                            | 7.08                                                                 | 16.56                                                                     | 4.96                                                                   | 0.3                             | 6.9                                                                     |
|              | DI 75              | 14.09                                                                     | 4.3                                                                        | 0.31                            | 5.74                                                                 | 14.07                                                                     | 4.14                                                                   | 0.29                            | 6.1                                                                     |
|              | PRD 55             | 12.33                                                                     | 3.4                                                                        | 0.28                            | 5.47                                                                 | 12.47                                                                     | 3.28                                                                   | 0.26                            | 6                                                                       |
|              | DI 55              | 10.21                                                                     | 3.05                                                                       | 0.3                             | 4.38                                                                 | 10.11                                                                     | 2.93                                                                   | 0.29                            | 5.2                                                                     |
| ۱۳۹۲<br>2013 | FI                 | 18.52                                                                     | 4.31                                                                       | 0.23                            | 7.95                                                                 | 18.24                                                                     | 5.14                                                                   | 0.28                            | 7.2                                                                     |
|              | PRD 75             | 14.61                                                                     | 4.07                                                                       | 0.28                            | 7                                                                    | 15.60                                                                     | 4.7                                                                    | 0.3                             | 7.1                                                                     |
|              | DI 75              | 12.38                                                                     | 3.16                                                                       | 0.26                            | 5.65                                                                 | 13.76                                                                     | 4.42                                                                   | 0.32                            | 6.5                                                                     |
|              | PRD 55             | 10.92                                                                     | 2.47                                                                       | 0.23                            | 5.32                                                                 | 11.79                                                                     | 3.62                                                                   | 0.3                             | 6.64                                                                    |
|              | DI 55              | 9.56                                                                      | 2.32                                                                       | 0.24                            | 4.23                                                                 | 9.96                                                                      | 3.18                                                                   | 0.32                            | 5.7                                                                     |

جدول ۷- آزمون T<sub>test</sub> در سطح ۹۵ درصد در مقادیر شبیه سازی دو تیمار PRD 75 و FI

Table 7- T<sub>test</sub> in 95% level in simulated parameters in FI and PRD 75 treatments

| سال<br>Year | شاخص سطح برگ<br>LAI | متوسط عملکرد<br>TAGP | زیست توده کل<br>TWSO |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| ۱۳۹۱        | ۰/۶۹                | ۰/۰۴                 | ۰/۰۵۱                |
| 2012        | 0.69                | 0.04                 | 0.05                 |
| ۱۳۹۲        | ۰/۸۶                | ۰/۰۹۷                | ۰/۳۸                 |
| 2013        | 0.86                | 0.097                | 0.38                 |

وضعیت رطوبتی خاک، کم آبی و میزان پوشش گیاهی می باشد. از این میان تیمار FI در سال زراعی ۱۳۹۱ بیشترین میزان تبخیر - تعرق را به میزان ۳۰۳ میلی متر به خود اختصاص داده است. از سویی دیگر نتایج پژوهش حاضر نشان داد که با اعمال کم آبیاری تلفات (نفوذ عمقی و رواناب) کاهش یافته است که با نتایج تحقیقات پیشین در این زمینه مطابقت دارد (۴ و ۲۷).

#### بهره‌وری آب

به منظور تخمین اجزای بهره‌وری آب (WP<sub>I</sub>, WP<sub>I+R</sub>) برای مدیریت‌های آبیاری از پارامترهای بیلان آب و مقدار عملکرد اندازه‌گیری شده استفاده شد که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آبیاری، شاخص بهره‌وری مجموع آبیاری و بارش (WP<sub>I+R</sub>) و بهره‌وری مقدار آبیاری (WP<sub>I</sub>) مبتنی بر عملکرد و بیوماس کل در تیمارها در هر دو سال کاهش داشته که با نتایج امینی‌فر و همکاران (۳) روی گیاه سویا مطابقت ندارد. بررسی

بررسی جدول بالا نشان می‌دهد که مدل مذکور با تغییر ضرایب تیمارهای آبیاری توانسته به خوبی شرایط کم آبیاری را لحاظ نموده و تفاوت روش‌های مختلف را در میزان عملکرد به خوبی توصیف نماید. بدین ترتیب تا حدودی این نقص که مدل پیش از این میزان کم- آبیاری را تنها وابسته به عمق نیاز آبی در نظر می‌گرفته مرتفع شده است. بررسی اعداد و ارقام در جدول ۷ نشان می‌دهد که در سطح احتمال ۹۵ درصد بین عملکرد، شاخص سطح برگ و زیست توده کل تفاوت معناداری وجود دارد و روش PRD 75 می‌تواند جایگزین روش‌های FI شود که با نتایج قدمی (۱۷) همخوانی دارد.

#### بیلان آب

بررسی اجمالی نتایج جدول ۸ در طی دو سال زراعی ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ نشان داد در تیمارهای کم آبیاری به دلیل تنش آبی تعرق گیاه کاهش یافته است. مقدار تعرق در دوره رشد، تحت تأثیر شرایط و

سال ۱۳۹۲ روندی معکوس مشاهده شده است و در آن میزان خطای نسبی بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی در تیمار DI 55 به ۲۴ درصد می‌باشد و بیشترین میزان اختلاف بین تیمار FI و در سال ۱۳۹۲ اتفاق افتاده و میزان خطای نسبی آن ۳۴ درصد است. اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهداتی مقادیر  $WP_1$  در طی دو سال زراعی نسبتاً کمتر بوده و برای تیمار PRD 75 و FI در هر دو سال کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده و در مواردی نظیر تیمار DI 75 و PRD 55 این اختلاف به کمترین میزان خود (۱/۵- درصد) رسید.

جزئیات در این زمینه نشان می‌دهد که این اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت در تیپ رشدی آفتابگردان و سویا باشد. زیرا سویا دوره کشت طولانی‌تری داشته و از نظر تیپ شاخه‌بندی نیز تعداد شاخه بیشتر در مقایسه با آفتابگردان داشته که منجر به افزایش عملکرد و بیوماس می‌شود و همین مسئله موجب کاهش بهره‌وری آب در شرایط تنش خشکی شده است. همچنین بررسی اجمالی جدول ۸ نشان می‌دهد، در طی سال ۱۳۹۱،  $WP_{I+R}$  همواره میزان شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار مشاهداتی است که اختلاف آن در دامنه ۲۶-۱۳ درصد بوده که در تیمار DI 55 این اختلاف به ۲۶ درصد هم رسیده است. برای

جدول ۸- اجزای بیلان آب و عملکرد آفتابگردان در شرایط شبیه‌سازی با مدل WOFOST

Table 8- Water bilan and TAGP in simulated of WOFOST

| سال  | تیمار     | تعرق (mm)     | تبخیر (mm)  | تبخیر - تعرق (mm) | تلفات (mm) | بارش + آبیاری (mm)           |
|------|-----------|---------------|-------------|-------------------|------------|------------------------------|
| Year | Treatment | Transpiration | Evaporation | ET                | Loss       | Precipitation and irrigation |
| ۱۳۹۱ | FI        | 220           | 83          | 303               | 284        | 530                          |
|      | PRD 75    | 167           | 94          | 261               | 229        | 418                          |
|      | DI 75     | 180           | 97          | 277               | 231        | 430                          |
|      | PRD 55    | 168           | 93          | 261               | 170        | 353                          |
|      | DI 55     | 158           | 108         | 226               | 164        | 354                          |
| ۱۳۹۲ | FI        | 227           | 75          | 302               | 150        | 319                          |
|      | PRD 75    | 174           | 109         | 283               | 135        | 290                          |
|      | DI 75     | 187           | 101         | 288               | 129        | 286                          |
|      | PRD 55    | 108           | 174         | 282               | 103        | 253                          |
|      | DI 55     | 164           | 116         | 280               | 100        | 246                          |

جدول ۹- مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بهره‌وری بر اساس آب آبیاری و بارندگی و بهره‌وری بر اساس آب آبیاری، با مدل WOFOST

Table 9- Simulated and observed productivity of irrigation and precipitation and productivity of irrigation by WOFOST

| سال  | تیمار  | بهره‌وری بر اساس آب آبیاری و بارندگی (kg. m <sup>-3</sup> )(WP(I+R)) |           | بهره‌وری بر اساس آب آبیاری (kg. m <sup>-3</sup> )(WP(I)) |           | خطای نسبی (درصد) |        |
|------|--------|----------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------------|-----------|------------------|--------|
|      |        | مشاهده‌ای                                                            |           | شبیه‌سازی                                                |           | Relative error   |        |
|      |        | Observed                                                             | Simulated | Observed                                                 | Simulated | WP(I+R)          | WP(I)  |
| ۱۳۹۱ | FI     | 3.54                                                                 | 4.1       | 4.32                                                     | 4.3       | 13               | -4.6   |
|      | PRD 75 | 3.26                                                                 | 3.95      | 4.12                                                     | 4.1       | 17               | -0.48  |
|      | DI 75  | 2.77                                                                 | 3.26      | 3.49                                                     | 3.4       | 15               | -2.6   |
|      | PRD 55 | 2.79                                                                 | 3.52      | 3.65                                                     | 3.63      | 20               | -0.55  |
|      | DI 55  | 2.27                                                                 | 3.10      | 2.9                                                      | 3.21      | 26               | 9.65   |
| ۱۳۹۲ | FI     | 3.82                                                                 | 5.8       | 4.26                                                     | 4.32      | 34               | -7.07  |
|      | PRD 75 | 3.86                                                                 | 5.03      | 4.39                                                     | 4.1       | 23               | -7.07  |
|      | DI 75  | 3.39                                                                 | 4.3       | 3.86                                                     | 3.47      | 21               | -11.23 |
|      | PRD 55 | 3.38                                                                 | 4.31      | 3.95                                                     | 3.64      | 21               | -8.51  |
|      | DI 55  | 2.86                                                                 | 3.8       | 3.34                                                     | 3.2       | 24               | -4.37  |

## نتیجه‌گیری

دیگری ضرایب آبیاری است که وابسته به نوع تیمارهای آبیاری و رفتار آنها در طول دوره رشد قابل تفسیر می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از واسنجی آنها نشان داد که با کاهش میزان حجم آب داده شده به زمین، ضرایب AMAXTB و KDIFTB کاهش یافته و برعکس ضریب EFFTB افزایش یافته است. موارد برشمرده بایستی با توجه به همپوشانی اثرات این ضرایب بر میزان عملکرد دانه، زیست‌توده کل و شاخص برداشت در نظر گرفته شود. اما نکته قابل توجه این است که KDIFTB به طور مستقیم بر میزان عملکرد دانه موثر بوده و آن

نتایج حاصل از واسنجی نشان داد که ضرایب اساساً در این مدل به دو گروه عمده قابل تفکیک است. ضرایب گیاهی که وابسته به شرایط آب و هوایی، طول و عرض جغرافیایی منطقه و خصوصیات فنولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه واسنجی شده و تحلیل نتایج آنها در این پژوهش نشان داد که با تغییر هر کدام از این موارد تغییر خواهد یافت.

آفتابگردان را در تیمارهای کم‌آبیاری شبیه‌سازی نماید.

دو پارامتر دیگر با اثرات KDIFTB همپوشانی داشته و بایستی هر سه آنها با هم بررسی شوند. همچنین بررسی نتایج ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای نیز نشان می‌دهد که در اکثر آزمون‌های آماری، نتایج در محدوده قابل قبولی قرار داشته و مدل به خوبی توانسته است با استفاده از ضرایب واسنجی شده، عکس‌العمل گیاه

## منابع

- Ahmadi S.H., Andersen M.N., Plauborg F., Poulsen R.T., Jensen C.R., Sepaskhah A.R. and Hansen S. 2010. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Gas exchange and xylem [ABA]. *Agricultural Water Management*, 97: 1486-1494.
- Ahmadi M., Farhadi B. and Ghobadi M. 2014. Regional transferring of barley yield and Water Productivity in deficit irrigation. *Water research in agriculture*, 28: 201- 211. (In Persian)
- Amini Far J., Bigloee M. H. Mohsen Abadi Gh. And Samizade H. 2011. Effect of deficit irrigation on yield and productivity in 7 type of soybean in Rasht region. *Soil and water knowledge*, 21: 81-92. (In Persian)
- Amiri E. Kavosi M. and Kaveh F. 2009. Evaluation of plant growth model ORYZA2000, SWAP and WOFOST in different irrigation management. *Agricultural and engineering research*, 10: 13- 28. (In Persian)
- Amiri E., Rezaii M., Mo'tamed M. K. and Emami S. 2011. Evaluation of crop growth of WOFOST model in irrigation management condition. *Agronomy*, 90: 9-17. (In Persian)
- Boogaard H., Wolf J., Supitc I., Niemeyer S., Ittersuma M. v. 2013. A regional implementation of WOFOST for calculating yield gaps of autumn-sown wheat across the European Union. *Field Crops Research*, 143: 130-142.
- Bouman B. A. M., Van Keulen H., Van Laar H. H. and Rabbinge R. 1996. The "School of de Wit", crop growth simulation models: pedigree and historical overview. *Agricultural System*, 52: 171-198.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussiere F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillere J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet H. 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal Agronomy*, 18: 309-332.
- Choisnel E., Villele O., Lacroze F. 1992. Une approche de uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne. Joint Research Centre, Commission of the European Communities, EUR 14223 FR, Luxembourg, 176 pp.
- Confalonieri R., Acutis M., Bellocchi G., Cerrani I., Tarantola S., Donatelli M., Genovese G. 2006b. Exploratory sensitivity analysis of CropSyst WARM and WOFOST: a case-study with rice biomass simulations. *Italian Journal Agrometeorol*, 11: 17-25.
- Confalonieri R., Acutis M., Bellocchi G. and Donatelli M. 2013. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Model*, 220: 1395-1410.
- CWFS. 1985. Potential food production increases from fertilizer aid: a case study of Burkina Faso, Ghana and Kenya. CWFS, Wageningen.
- Diekkrüger B., Arning M. 1995. Simulation of water fluxes using different methods for estimating soil parameters. *Ecological Model*, 81: 83-97.
- Donald C.M. and Hamblin J. 1976. The biological yield and harvest index of cereal as Agronomic and plant breeding criteria. *Adv Agronomy*, 28:361-405.
- Eitzinger J., Thaler S., Schmid E., Strauss F., Ferrise R., Moriondo M., Bindi M., Palosuo T., Rotter R., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Patil R.H., Saylan L., C, alda g, B., C, aylak, O. 2012. Sensitivities of crop models to extreme weather conditions during flowering period demonstrated for maize and winter wheat in Austria. *Agricultural Science*: 1-23.
- Geerts S. D., Raes M., Garcia R., Miranda J.A., Cusicanqui C., Taboada J., Mendoza R., Huanca A., Mamani O., Condori, J., Mamani, B., Morales, V. and Steduto P. 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101(3): 499-508.
- Ghadami A. 2015. Water Management and Soil Moisture Changes in Full, Regulated Deficit and Partial Root Zone Deficit Irrigations in Sunflower Plant. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Agriculture Engineering Faculty Water Engineering Department, Ph.D thesis in irrigation and drainage engineering. (In Persian)
- Jarvis P.G. 1981. Stomatal conductance, gaseous exchange and transpiration. In: *Plants and Their Atmospheric Environment*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 175-214.
- Kiani A. R. 2010. Optimal irrigation scheduling base on water yield relations in soybean cultivars. *Agricultural engineering research*, 11: 85-112. (In Persian)
- Kloss S, Pushpalatha R, Kamoyo KJ, Schütze N (2012) Evaluation of crop models for simulating and optimizing deficit irrigation systems in arid and semi-arid countries under climate variability. *Water Resour Management*, 26: 997-1014.

- 21- Khoshravesht M., Ghadami Firouzabadi A., Shirazi P. and Najafi-Mood M. H. 2015. Cotton Response Simulation to Dry and Salinity Stress by using of AquaCrop Model. *Water and irrigation engineering*, 21: 166- 179. (In Persian)
- 22- Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models. *European Journal Agronomy*, 35, 103-114.
- 23- Penman H.L. 1956. Evaporation, an introductory survey. *Neth. Agricultural Science*, 4: 9-29.
- 24- Ritchie J.T. 1998. Soil water balance and plant water stress. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thorton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 41-55.
- 25- Rötter R.P.; Palosuo T.; Pirttioja N.K.; Dubrovsky M.; Salo T.; Fronzek S.; Aikasalo R.; Trnka M.; Ristolainen A. and Carter T.R. 2011. What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4 °C? A model-based assessment. *European Journal of Agronomy*, 35: 205-214.
- 26- Rotter R., Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C., Bindi M., Ewert F., Ferrise R., Hlavinka P., Moriondo M., Nendel C., Olesen J.E., Patil R.H., Ruget F., Takař J. and Trnka M., 2012. Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models. *Field Crops Resource*, 133: 23-36.
- 27- Saadati A., Pirmoradian N., Amiri E. and Rezaii M. 2012. Evaluation of WOFOST model in rice under different regimes of irrigation management. *Water research in agriculture*, 26: 323- 337. (In Persian)
- 28- Sepaskhah A., Tavakoli A. and Mosavi S. F. 2005. Principle and application of deficit irrigation. *National irrigation and drainage committee*, 10021. (In Persian)
- 29- Singh A.K., Tripathy R., and Chopra U. K. 2008. Evaluation of CERES Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management*, 95: 776-786.
- 30- Singh A. 2014. Irrigation planning and management through optimization modelling. *Water Resour Manag* 28: 1-14
- 31- Sharpley A.N., Wiliams J.R. 1990. EPIC The Erosion Productivity Impact Calculator. 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture, Technical Buletin No. 1768.
- 32- Sharma A., Bharat R., Roak K. V., Vittal, P. R., Ramakrishna Y. S. and Amarasinghr U. 2010. Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements. *Agric Water manage*, 97: 23-30.
- 33- Shahin Rokhsar p and Amiri E. 2016. Evaluating WOFOST Model under Water Limited Conditions for Soybean Cultivars. Simulation of growth and development of plants, Sabz shomal. (In Persian)
- 34- Supit I., Van Diepen C.A., De Wit A.J.W., Kabat P., Baruth B. and Ludwig F. 2010. Recent changes in the climatic yield potential of various crops in European Agricultural System, 103: 683-694.
- 35- Todorovic M. R., Albrizio L., Zivotic M., Abi Saab C. and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal*, 101: 509-521.
- 36- Wang E., Engel T. 2002. Simulation of growth, water and nitrogen uptake of a wheat crop. *Environemt Model. Software*, 17: 387-402.



## Evaluation of Plant Input Coefficient of WOFOST in PRD Condition for Sunflower

S.F. Hashemi<sup>1</sup> - A. Shahnazai<sup>2\*</sup> - M. Racini<sup>3</sup> - A. Ghadami Firouzabadi<sup>4</sup> - E. Amiri<sup>5</sup>

Received: 23-05-2017

Accepted: 02-07-2018

**Introduction:** This research as reported issimulation study by WOFOST and was focused on traditional methods of deficit irrigation such as terms of percentage in full irrigation conditions or as evaluation of growth and development in certain days after irrigation. WOFOST is the crop growth simulation model was originally developed to simulate crop yield for a single location where weather, soil and crop data are assumed homogeneous and is a member of the family of Wageningen crop models.

**Materials and Methods:** This research was conducted at the research farm of Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University, in 2012 and 2013, with 5 treatments. The experiments were arranged as randomized complete block design with three replications. The irrigation treatments consisted of full irrigation (FI), regulated deficit (DI75, DI55) and partial root zone drying irrigation (PRD75, PRD55). The WOFOST software was also used to determine the growth and development of crops in compare with measured data on sunflower of Azargol variety. The crop input parameters of the selected models were based on previous field experiments. The soil condition were ranging from sandy loam to clay loam. By this specification FC, PWP and  $\rho$  could be calculated. To ensure an accurate simulation of crop growth, phenological parameters for each crop model were adjusted according to the anthesis and maturity dates in the field experiment. In this study, WOFOST model was used to simulate performance under deficit irrigation (50, 75% water requirement compare with full irrigation) and FI. Also, in this research the ability of the last version of WOFOST in simulating of sunflower in DI and PRD in %75 and %55 levels is carried out in contrast to FI so that crop coefficient of sunflower could be calculated and by this, the productivity of yield in Sari agricultural and natural resources research field could be achieved.

**Results and Discussion:** The results showed that the application of DI75 and PRD75 treatments relative to full irrigation reduced the whole growth period in the years 2012 and 2013, respectively. LAI showed that the model relatively was able to adjust the observed and simulated parameter in contrast to the other parameter (HI, TAGP and TWSO). Also it should be noted that the results of simulation of WOFOST in 2013 is more close to measured data. Totally it could be concluded that DI 55 in 2013 has the best correspondence among observed and simulation data. The results of calibrations showed that the most significant coefficients in WOFOST could be divided into 2 categories: First crop coefficient which depends on weather, coordinates of region and physiologic and phenologicof plant that is fixed among the simulation and second coefficient is irrigation coefficient that is depends on irrigation treatment and their response in development of growth. Also the results showed that by decreasing the volume of water which given to plant, AMAXTB and KDIFTB decreased and adversely EFFTb increased. By using the measured and simulated water balance components of model, with increasing water stress, water productivity base on total irrigation and rainfall (WPI+R) and the water productivity base on irrigated (WPI) of both cultivars decreased and FI water productivity was higher than the treatment under drought stress. Simulated seed yield and total biomass had normalized root mean square error (nRMSE) index less than 10%, coefficient of residual mass (CRM) index near zero, modeling efficiency (ME) about 0.98 and coefficient of determination ( $R^2$ ) about 0.93. The Effect of different treatments on seed yield, biomass yield, leaf area index and water productivity was highly significant ( $P \leq 0.05$ ). Also the results showed that FI has the highest ET among 2 years cultivating and PRD 55 in 2012 has the lowest ET. The maximum of

1, 2 and 3- PhD student, Associate Professor and Professor, Department of Irrigation, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari

(\* - Corresponding Author Email: Aliponh@yahoo.com)

4- Assistant Professor, Department of Agricultural Engineering Research, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran

4- Professor, Department of Irrigation, Lahijan Azad University, Lahijan

crop yield in both years 2012 and 2013 belong to FI with 5313 and 5148 kg. ha<sup>-1</sup> respectively, which showed no significant difference relative to PRD75 treatment. This trend could be seen in the other parameter.

**Conclusions:** Generally our findings showed the WOFOST model provides reasonable accuracy in simulating growth and yield under water limited conditions. It seems that we can use this model for determining optimal strategies in water management and on water scarcity conditions for sunflower cultivation.

**Keywords:** Extinction Coefficient, Growth Simulation Model, Grain Yield, Water use efficiency



## اثر آبیاری سطحی و زیرسطحی با آب شور و مالچ بر عملکرد و بهره‌وری آب ذرت و توزیع املاح در خاک

عبدالمجید لیاقت<sup>۱\*</sup> - مسعود پورغلام آمیجی<sup>۲</sup> - پوریا مشهوری نژاد<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۷

### چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران و شرایط خاص جغرافیایی کشور، استفاده از شیوه‌های نوین آبیاری با مصرف کمتر آب امری بدیهی خواهد بود. با اعمال مدیریت صحیح در سیستم آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش محصول، یک کشاورزی پایدار ایجاد کرد. بدین منظور در این پژوهش، ۱۲ عدد لایسیمتر بتنی به ابعاد  $2 \times 2 \times 1/25$  متر استفاده شد تا اثر پوشش گیاهی (مالچ) روی راندمان مصرف آب و عملکرد محصول برای گیاه ذرت، تجمع نمک و همچنین میزان شستشوی نیترات در پروفیل خاک تحت دو سیستم آبیاری سطحی و آبیاری زیرزمینی تراوا مورد بررسی قرار گیرد. برای آبیاری از آبی با هدایت الکتریکی  $4 \text{ dS/m}$  استفاده شد. طرح مذکور دارای دو تیمار اصلی (آبیاری سطحی و زیرزمینی تراوا) و دو تیمار فرعی (مالچ و بدون مالچ) با آزمایش به صورت فاکتوریل و در در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار در مرکز تحقیقات آب و هواشناسی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج در سال ۱۳۸۹ اجرا گردید. آبیاری سطحی بر اساس رطوبت مورد نیاز خاک و آبیاری زیرزمینی تراوا روزانه به اندازه مقدار آب مصرف شده، صورت گرفت. نتایج نشان داد که سیستم آبیاری زیرزمینی اثر بسیار معنی‌داری در کاهش آب مصرفی (۵۳ درصد با مالچ و ۴۰ درصد بدون مالچ) و افزایش عملکرد محصول (۴۶ درصد در عملکرد دانه‌ای، ۵۰ درصد در عملکرد علوفه‌ای و ۱۲ درصد در وزن هزار دانه ذرت) نسبت به سیستم آبیاری سطحی دارد. همچنین آبیاری زیرزمینی با کاهش آبشویی نیترات و نمک، از شور شدن و آلودگی لایه‌های زیرین خاک جلوگیری نموده است. وجود مالچ در لایسیمترها نیز، اثر بسیار معنی‌داری بر کاهش آب مصرفی و عملکرد ذرت نشان داد. همچنین وجود مالچ در هر دو سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا و سطحی، غلظت نمک در سطح خاک را به ترتیب ۴۰ و ۳۰ درصد کاهش داده است. در نتیجه در مناطقی که از آب شور برای آبیاری استفاده می‌کنند، سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا عملکرد بهتری را نسبت به سیستم آبیاری سطحی حاصل می‌کند و استفاده از مالچ، می‌تواند باعث افزایش عملکرد و کاهش نیاز آبشویی شود.

**واژه‌های کلیدی:** آبیاری زیرزمینی تراوا، پوشش گیاهی، تجمع نمک، سیستم‌های آبیاری، شستشوی نیترات

### مقدمه

است و با توجه به روند روزافزون نیاز بخش‌های مختلف به آب، مشکل خشک‌سالی در سال‌های آینده حادث‌تر نیز خواهد شد. به‌طوری‌که بر اساس گزارش موسسه بین‌المللی مدیریت آب (IWMI)، کشور ایران برای حفظ وضع فعلی خود تا سال ۲۰۲۵ باید بتواند ۱۱۲ درصد به منابع آب قابل استحصال خود بیفزاید (۱). در شرایط حاضر با توجه به محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی اراضی قابل کشت (شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران)، هدف اصلی در کشاورزی بایستی بیشتر متمرکز بر بالابردن تولید به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع باشد. سامانه‌های آبیاری موضعی همانند آبیاری زیرسطحی تراوا علاوه بر راندمان بالا، کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد محصول را نیز در پی خواهد داشت (۱۳). عباسی و همکاران (۱) در گزارشی با عنوان ارتقای بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی به این نکته اشاره کردند که متوسط راندمان

آب عنصری حیاتی است که کمبود آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک، گسترش کشت در اراضی مستعد را با محدودیت مواجه می‌سازد. کشور ایران به دلیل نقصان ریزش‌های جوی و نامناسب بودن پراکنش زمانی و مکانی بارندگی، در زمره کشورهای خشک و نیمه‌خشک جهان بوده و همواره با مشکل کمبود آب روبه‌رو است (۱۴). همچنین خشک‌سالی و کم‌آبی در ایران یک واقعیت اقلیمی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانشجوی دکتری و دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران  
(Email: Aliaghat@ut.ac.ir)  
(\*)-نویسنده مسئول  
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.69323

سیستم آبیاری زیرسطحی تراوا به دلیل راندمان بالا و افزایش قابل توجه عملکرد به ازای واحد آب مصرفی از یک سو، و باقیمانده بقایای گیاهی همانند کاه و کلش با توجه کاهش تلفات آب به صورت تبخیر از سطح و دیگر مزایای گفته شده از سوی دیگر، باید مورد بررسی قرار گیرد که آیا با ترکیبی از این دو روش، به ازای مصرف آب کمتر محصول بیشتری عاید می شود یا خیر.

مطابق مطالعه بهیمنی و همکاران (۴) و ابراهیمیان و بتوخته (۷) افزودن موادی مانند بقایای گیاهی (مالچ<sup>۵</sup>)، کاه و کلش، پوست، چوب و برگ خرد شده گیاهان و درختان و کمپوست<sup>۶</sup> می تواند علاوه بر اینکه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را بهبود بخشد، امکان بهره‌وری بیشتر در مصرف آب را فراهم آورد و بستر خاک را به یک بستر خوب تبدیل نماید. مالچ‌ها به دلایل مختلفی نیز به کار می‌روند، اما در مناطق خشک و نیمه خشک، صرفه‌جویی در مصرف آب و کنترل فسایش، بدون شک از مهمترین این دلایل می‌باشد. از سایر دلایل استفاده از مالچ‌ها می‌توان به تعدیل درجه حرارت خاک، تاثیر بر میزان عناصر غذایی خاک، کنترل شوری خاک، بهبود ساختمان خاک و کنترل علف‌های هرز اشاره کرد.

استفاده از مالچ‌ها یکی از راهکارهای افزایش بازده آبیاری و بهره‌وری آب است. مالچ‌ها به‌طور کلی به دو صورت آلی (مانند بقایای گیاهی) و غیر آلی (شیمیایی و معدنی) وجود دارند. استفاده از مالچ‌ها ضمن کنترل فرسایش خاک و حفظ رطوبت خاک از طریق کاهش تبخیر از سطح خاک، مانع از رشد علف‌های هرز و در نتیجه کاهش مصرف آب می‌شود (۲ و ۹). علاوه بر این می‌توان به اثر استفاده از مالچ و افزایش تا ۶۰ درصدی بهره‌وری مصرف آب، کارایی مصرف نیتروژن و کمک به مسائل زیست‌محیطی اشاره کرد (۱۱).

برت و همکاران (۵) تحقیقی در زمینه تأثیر استفاده از مالچ و بقایای گیاهی بر روی خاک لخت انجام دادند. نتایج نشان داد با این روش می‌توان بعد از آبیاری میزان تبخیر از سطح خاک را از ۱۱ تا ۸۴ درصد برای یک دوره کوتاه مدت و نصف این میزان را در درازمدت کاهش داد.

امروزه سیستم آبیاری زیرزمینی به روش‌های مختلف در سطح جهان به‌خصوص کشورهایی که در کمبود آب به سر می‌برند، در حال اجرا و کار می‌باشد. یکی از جدیدترین این روش‌ها استفاده از لوله‌های پلاستیکی اسفنجی مانند (tuporex) است که در منطقه ریشه گیاه نصب می‌شود. سپس آب تحت فشار ۰/۶-۲ اتمسفر در آن جریان یافته و با تراوش خود موجب مرطوب شدن آن منطقه خواهد شد. بنابراین اعمال مدیریت صحیح و به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته به منظور حفظ ذخیره رطوبتی خاک از جمله اقدامات موثر برای

کاربرد آب آبیاری در سامانه‌های آبیاری تحت فشار و سطحی به ترتیب حدود ۶۶/۶ و ۵۳/۶ درصد است. همچنین با مقایسه روش‌های مختلف آبیاری تحت فشار نیز ملاحظه می‌شود که میانگین راندمان کاربرد آب آبیاری در روش‌های آبیاری بارانی حدود ۶۲/۱ و در روش‌های آبیاری قطره‌ای ۷۱/۱ درصد است. بنابراین با توجه به تلفات بیشتر آب و کم بودن راندمان در آبیاری سطحی، سیستم آبیاری موضعی با توجه مزایایی که دارد می‌تواند جایگزین خوبی باشد و برای محدوده بسیاری از گیاهان و محصولات زراعی به کار رود.

به دلیل شرایط محیطی و تابش مستقیم آفتاب، مقدار زیادی از آب داده شده به گیاهان و دیگر محصولات زراعی به صورت تلفات تبخیر در روش آبیاری سطحی<sup>۱</sup> از بین می‌رود. بنابراین برای دستیابی به راندمان بالا، سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی<sup>۲</sup> و زیرسطحی<sup>۳</sup> جایگزین مناسبی می‌باشد. از جمله محاسن سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (لوله‌های تراوا) می‌توان به کارایی بالاتر مصرف آب<sup>۴</sup>، آلودگی کمتر آب‌های زیرسطحی به دلیل آبشویی کمتر نیترات، کاهش خطرات شوری به دلیل نگهداری زیاد رطوبت خاک و آبیاری پیوسته، یکنواختی بهتر پخش آب، وضعیت بهتر گیاه از نظر رشد و افزایش کمی و کیفی محصولات، مدیریت مناسب کود و سم و کنترل علف‌های هرز، امکان خودکار سازی سیستم، کاهش خسارات ناشی از حیوانات و انعطاف‌پذیری بالای سیستم اشاره کرد (۳، ۸ و ۱۲).

همچنین نتایج کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر روی بیش از ۳۰ نوع گیاه، افزایش محصول را نسبت به سایر روش‌های آبیاری، از جمله آبیاری قطره‌ای سطحی به همراه داشته است. ضمن اینکه میزان آب کاربردی کمتر بوده است (۶).

نتایج حاصل از تحقیقات ۴ ساله محمدی و عبداللهی (۱۰) برای مقایسه سیستم آبیاری سطحی و زیرسطحی نشان‌دهنده کاهش حداقل ۳۰ تا ۴۰ درصد در مصرف آب با روش آبیاری زیرسطحی در مقایسه با آبیاری سطحی است. همچنین استفاده از سیستم آبیاری زیرسطحی علاوه بر افزایش کارایی و صرفه‌جویی در مصرف آب، باعث افزایش کمی و کیفی عملکرد درختان پسته می‌شود.

با توجه به نکات گفته شده و بررسی نتایج پژوهشگران، اهمیت سیستم آبیاری موضعی به‌ویژه آبیاری زیرزمینی تراوا به دلیل کم بودن تلفات و تبخیر کمتر و پخش دقیق آب، به‌وضوح مشخص است. حال به‌مرور مطالعات انجام شده در بحث بقایای گیاهی و مواد آلی و به‌کارگیری ترکیبی از آن در کشت محصولات پرداخته می‌شود.

- 1- Surface Irrigation (SI)
- 2- Drip Irrigation (DI)
- 3- Subsurface Drip Irrigation (SDI)
- 4- Water Use Efficiency (WUE)

بتوان از آن نمونه‌گیری کرد. تیمارهای شامل آبیاری سطحی با مالچ، آبیاری سطحی بدون مالچ، آبیاری زیرسطحی، با مالچ و آبیاری زیرسطحی بدون مالچ را شامل شدند. طریقه نامگذاری و اعمال تیمارها در جدول ۲ آمده است.

|               |    |    |    |    |
|---------------|----|----|----|----|
| تکرار اول     | So | To | Sm | Tm |
| First Repeat  |    |    |    |    |
| تکرار دوم     | To | So | Tm | Sm |
| Second Repeat |    |    |    |    |
| تکرار سوم     | Tm | To | Sm | So |
| Third Repeat  |    |    |    |    |

شکل ۲- شماتیک طرح آزمایشی در مزرعه مورد مطالعه

Figure 2- Schematic of the experimental design on the studied farm

### منابع آب و خاک

آب آبیاری استفاده‌شده در این پژوهش شامل آب شیرین و شور بوده است. آب شیرین، همان آب موجود در منطقه و آب شور هم با شوری  $4 \text{ dS/m}$  تهیه شد. به این صورت بوده که دو هفته اول و تا زمان رسیدن گیاه به استقرار، آب شیرین به خاک داده شد اما بعد از این مدت تا آخر دوره کشت، آب شور با هدایت الکتریکی ۴ دسی‌زیمنس بر متر تزریق گردید تا توزیع شوری در خاک هم، در حضور مالچ و انواع سیستم آبیاری بررسی گردد. مشخصات کیفی آب استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۱ ارایه شده است. خاک لایسیمترها از خاک مزرعه تهیه شد که با انجام آزمایش، وزن مخصوص ظاهری آن  $1/4$  گرم بر سانتی‌مترمکعب معادل  $1400$  کیلوگرم بر مترمکعب به ثبت رسید. پر کردن لایسیمترها به‌گونه‌ای انجام شد که وزن مخصوص ظاهری خاک با مقدار آن در مزرعه یکسان شود. دانه‌بندی خاک هم به روش الک انجام شد و متوسط بافت خاک لایسیمترها SCL به دست آمد. رابطه‌ای بین مقدار رطوبت و نیروی مکش خاک به نام منحنی مشخصه رطوبتی خاک وجود دارد که در کلیه عملیات آبیاری و زهکشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این توضیح که میزان رطوبت خاک تحت مکش‌های مختلف به‌وسیله دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد و منحنی مربوط به آن در شکل ۳ رسم شد. محور عمودی بیانگر درصد رطوبت حجمی و محور افقی لگاریتم مکش‌های اعمال شده می‌باشد.

### مشخصات سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا

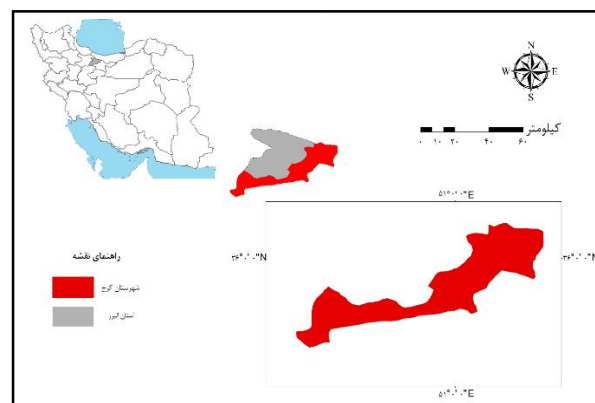
مواد مورد استفاده در تولید این لوله‌ها، ترکیبی از ۶۵ درصد پودر پلاستیک فرسوده و ۳۵ درصد الیاف پلاستیکی می‌باشد. دیگر مشخصات فنی لوله تراوا شامل؛ قطر داخلی و خارجی به ترتیب ۱۳ و

افزایش راندمان آبیاری و در نتیجه بهبود بهره‌برداری از منابع محدود آب می‌باشد. روش‌های مختلفی برای کاهش محدودیت‌های ذکر شده پیشنهاد شده است که استفاده از یک سیستم مناسب آبیاری همانند آبیاری زیرزمینی با لوله‌های تراوا همراه با مالچ‌های طبیعی از جمله آن‌ها می‌باشد که در این پژوهش به آن پرداخته خواهد شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه

تحقیق حاضر در مرکز تحقیقات آب و هواشناسی پردیس کشاورزی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج با عرض جغرافیایی  $35^\circ$  درجه و  $55'$  دقیقه عرض جغرافیایی و  $50^\circ$  درجه و  $54'$  دقیقه طول جغرافیایی و ارتفاع  $1293$  متر از سطح دریا در سال  $1389$  انجام شد. طبق آمار و داده‌های میان‌مدت، منطقه دارای آب‌وهوای مدیترانه‌ای با تابستان‌های گرم و خشک و زمستان‌های نسبتاً سرد است. برابر آمار موجود، متوسط بارندگی سالیانه  $250$  میلی‌متر، میانگین سالیانه دمای هوا  $14/1$  درجه سانتی‌گراد بوده که بیشینه و کمینه مطلق آن به ترتیب  $42^\circ$  و  $-20^\circ$  درجه سانتی‌گراد به ثبت رسید. دیگر پارامترهای هواشناسی منطقه شامل میانگین رطوبت نسبی  $53\%$  در صد، تبخیر سالانه  $2184$  میلی‌متر، سرعت متوسط باد روزانه  $2/2$  متر بر ثانیه و جهت غالب آن شمال غرب به جنوب شرق می‌باشد. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Geolocation of the study area

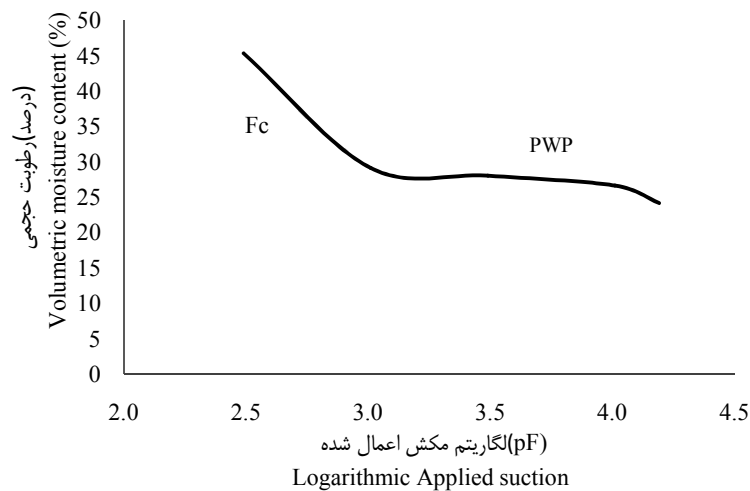
همان‌طور که گفته شد  $12$  عدد لایسیمتر بزرگ بتنی به ابعاد  $25 \times 2 \times 2$  متر در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. نمایی از نحوه قرارگیری لایسیمترها و اعمال تیمار در شکل ۲ آمده است. در کف هر لایسیمتر یک لوله سوراخ‌دار پلی‌اتیلن به عنوان زهکش نصب شد تا آب خروجی از آن به اتاق کنترل زیر لایسیمترها هدایت شده و

۱۸ میلی متر، وزن هر متر ۱۰۰ گرم، حداقل فشار ۰/۴ و حداکثر آن ۲ در این آزمایش با توجه به کوتاه بودن طول لایسیمتر (دو متر) فشار اتمسفر بوده است. به طور کلی فشار توصیه شده برای کارکرد مناسب این لوله ها ۰/۶ تا ۰/۸ اتمسفر برای دبی ۱/۵ تا ۲ لیتر بر ساعت در هر متر لوله است. اینک به بقایای گیاهی یا همان مالچ مورد استفاده در این تحقیق، باقیمانده شاخ و برگ گیاه ذرت از کشت قبلی بود.

جدول ۱- مشخصات کیفی آب آبیاری استفاده شده

Table 1- Qualitative characteristics of irrigation water used

| نمونه آب<br>Water sample | ECw<br>(dS/m) | pH   | آنیون و کاتیون های محلول (میلی اکی والان بر لیتر)<br>Dissolved anions and cations (meq/lit) |       |              |      |       |             |      | NO3-N<br>(mg/lit) | SAR<br>(mmol/lit) |
|--------------------------|---------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------|------|-------|-------------|------|-------------------|-------------------|
|                          |               |      | Na                                                                                          | Ca+Mg | Total cation | SO4  | Cl    | Total anion | HCO3 |                   |                   |
| Fresh شیرین              | 0.74          | 7.43 | 2.36                                                                                        | 8     | 10.36        | 0.8  | 4     | 8.8         | 4    | 1.58              | 1.18              |
| Saline شور               | 4             | 7.11 | 35.53                                                                                       | 25    | 60.53        | 8.05 | 46.25 | 58.2        | 3.9  | 14.51             | 10.05             |



شکل ۳- منحنی مشخصه رطوبتی خاک لایسیمترها

Figure 3- Soil moisture characteristic curve of lysimeters

جدول ۲- معرفی تیمارهای مورد آزمایش

Table 2-Introducing the tested treatments

| نام تیمار ها<br>Name of treatments | تیمار های اعمال شده<br>Applied treatments                                                                                                                                |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TM                                 | لایسیمتر های پوشیده شده با بقایای گیاهی ذرت و سیستم آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا<br>Mulch-covered lysimeters and Subsurface irrigation systems with permeable tubes |
| SM                                 | لایسیمتر های پوشیده شده با بقایای گیاهی ذرت و سیستم آبیاری سطحی<br>Mulch-covered lysimeters and surface irrigation systems                                               |
| TO                                 | لایسیمتر های لخت و سیستم آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا<br>Bare lysimeters and Subsurface irrigation systems with permeable tubes                                     |
| SO                                 | لایسیمتر های لخت و سیستم آبیاری سطحی<br>Bare lysimeters and surface irrigation systems                                                                                   |

## تیمارهای مورد مطالعه

اهداف این تحقیق شامل: مقایسه مقدار آب مصرفی در دو سیستم آبیاری زیرزمینی و سطحی به همراه مالچ و عدم حضور مالچ، مقایسه غلظت نمک و نیترات در دو سیستم آبیاری زیرزمینی و سطحی به همراه مالچ و عدم حضور مالچ و مقایسه عملکرد دانه‌ای، علوفه‌ای و هزاردانه ذرت در دو سیستم آبیاری زیرزمینی و سطحی به همراه مالچ و عدم حضور مالچ می‌باشد. بنابراین برای رسیدن به اهداف ذکرشده، این طرح در چهار تیمار (هر کدام در سه تکرار) به شرح جدول ۲ نام‌گذاری شدند.

## نتایج و بحث

### اندازه‌گیری‌ها

همراه با پرکردن لایسیمترها از خاک، میله‌های رطوبت‌سنج TDR<sup>۱</sup> که رطوبت را به صورت حجمی اندازه‌گیری می‌کند، در اعماق ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵ و ۷۵-۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک نصب شد. دیگر پارامتر مربوطه همانند هدایت الکتریکی به صورت عصاره اشباع خاک ثبت گردید. میزان کود ازته (اوره) طبق نیاز منطقه و آنالیز خاک صورت گرفته در تحقیقات قبلی در مرکز مذکور، به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار برآورد شد که برای هر لایسیمتر با سطح چهار مترمربع مقدار کود برابر ۱۲۰ گرم محاسبه شد. نیمی از این مقدار در موقع کاشت و نیمی دیگر، ۶۰ روز بعد از کاشت به گیاه داده شد. حجم آب داده‌شده براساس کمبود رطوبت خاک، به تیمار آبیاری سطحی در هر نوبت یادداشت می‌شد تا میزان آب مصرفی مشخص باشد. در تیمار آبیاری زیرزمینی تراوا هم یک منبع ۵۰ لیتری مدرج اختصاص داده شد و حجم آب مصرفی از هر منبع، ۲۴ ساعت بعد به آن اضافه می‌شد تا بدین صورت مصرف این تیمار هم مشخص باشد. چون بذر مورد استفاده، یک بذر اصلاح‌شده دومنظوره دانه‌ای و علوفه‌ای بود (رقم ۷۰۴ KSC)، در نتیجه برای مقایسه عملکرد محصول در تیمارها، سه عملکرد دانه‌ای، علوفه‌ای و هزار دانه اندازه‌گیری شد. میزان مالچ در این تحقیق، چهار تن در هکتار (۱۸ و ۱۹) در نظر گرفته شد که این مقدار برای هر لایسیمتر برابر ۱/۶ کیلوگرم به‌دست آمد. برای آبیاری هم، آب شور با هدایت الکتریکی ۴ dS/m (در حد قابل تحمل رقم مقاوم سینگل کراس) به تیمارهای شوری و با گذشت دو هفته از کاشت ذرت تزریق شد. همچنین برای تعیین سطح معنی‌دار بودن دو فاکتور سیستم آبیاری و مالچ بر میزان آب مصرفی، تجزیه واریانس آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی همانند جدول ۳ توسط نرم‌افزار SAS انجام شد.

### میزان آب مصرفی

شکل ۴ مقادیر کل آب مصرفی در تیمارهای مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقدار مصرف تجمعی آب (دو هفته اول آب شیرین و سپس آب شور) در چهار تیمار SM، SO، TM و TO به ترتیب برابر ۵۲۱۷، ۶۷۶۳، ۳۴۴۸ و ۳۹۶۵ لیتر به ثبت رسید. بالاترین میزان آب مصرفی ذرت در طول فصل رشد مربوط به تیمار SO می‌باشد که نشان از مصرف بیشتر آب سیستم آبیاری سطحی در مقایسه با آبیاری زیرزمینی تراوا است. دو تیمار SM و SO با اینکه هر دو از سیستم آبیاری سطحی بهره‌مند بودند، ولی به دلیل حضور مالچ و طی آن نگهداری بیشتر رطوبت در خاک و کاهش بخشیدن تبخیر از سطح خاک، میزان آب مصرفی ذرت در طی فصل رشد در تیمار SM نسبت به SO حدود ۲۳ درصد کاهش یافت. در سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا نیز حضور مالچ به دلایل ذکرشده در فوق، حدود ۱۳ درصد میزان آب مصرفی ذرت در تیمار TM نسبت به TO را کاهش داده است.

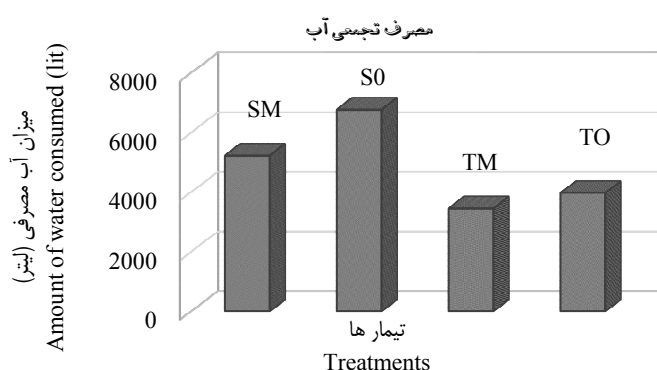
وجود مالچ در سیستم آبیاری سطحی (SM) نسبت به سیستم آبیاری زیرزمینی (TM) بیشتر توانسته آب مصرفی را کاهش دهد و این با نتیجه تحقیق حیدری‌نیا و همکاران در تطابق است (۱۸). در توجیه این مساله می‌توان گفت که در آبیاری سطحی مقدار زیادی از رطوبت بدون آنکه مورد استفاده گیاه قرار گیرد، طی عمل تبخیر از خاک خارج می‌شود. بنابراین در تیمار آبیاری سطحی حضور مالچ موثرتر واقع می‌شود، از طرفی هم لوله‌های تراوا در عمق ۴۰ سانتی‌متری از سطح خاک نصب شدند و عمق کمتری از لایه فوقانی را مرطوب می‌ساختند. همچنین اگر تیمار آبیاری سطحی (SO) و آبیاری زیرزمینی (TO) بدون حضور مالچ مورد بررسی قرار گیرند، مشاهده می‌شود که در تیمار TO، میزان آب مصرفی ذرت نسبت به تیمار SO حدود ۴۰ درصد کاهش یافته است. که از دلایل آن یکی تبخیر کم در آبیاری زیرزمینی است، در نتیجه تنها به اندازه نیاز آبی گیاه از رطوبت خاک کاسته می‌شود و دوم عدم تلفات عمقی و عدم اعمال نیاز آبی در سیستم آبیاری زیرزمینی به دلیل رطوبت دایمی و یکنواخت در اطراف لوله‌های تراوا می‌باشد. همچنین با تجزیه و تحلیل داده‌ها مشخص گردید که اثر هر دو فاکتور سیستم آبیاری و مالچ بر میزان آب مصرفی ذرت در طول فصل رشد در سطح یک درصد معنی‌دار است.

### عملکرد محصول

به دلیل اینکه ذرت کاشته شده دومنظوره بود، بنابراین عملکرد محصول در حالت‌های عملکرد دانه‌ای (وزن بلال بدون غلاف)، عملکرد علوفه‌ای (وزن تر ساقه به‌علاوه وزن بلال با غلاف) و عملکرد هزاردانه (وزن هزاردانه ذرت) مورد ارزیابی قرار گرفت. متوسط عملکرد دانه‌ای، علوفه‌ای و وزن هزاردانه ذرت در چهار تیمار

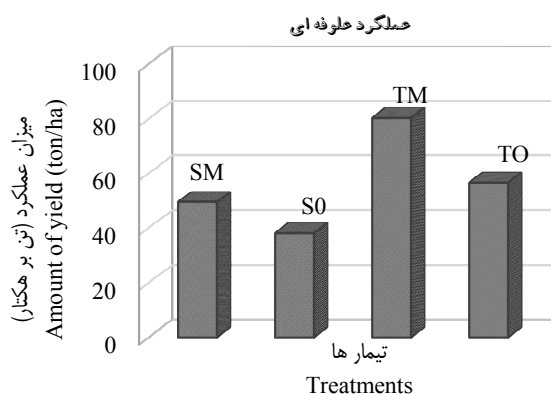
آبیاری سطحی بدون مالچ (SO) افزایش یابد. وجود مالچ در سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا (TM) نیز عملکرد دانه‌ای را ۳۲ درصد، علوفه‌ای ۴۲ درصد و وزن هزاردانه را ۱۳ درصد نسبت به تیمار آبیاری زیرزمینی بدون مالچ (TO) افزایش داده است. به نظر می‌رسد مالچ با نگهداری بیشتر رطوبت خاک، کاهش تبخیر و صعود مویینگی، باعث می‌شود که نمک کمتری در خاک تجمع پیدا کند و در نتیجه تنش کمتری به گیاه وارد شود. همچنین وجود مالچ باعث می‌شود که توزیع آب در ساقه‌ها، چوب و الیاف گیاه بهتر و بیشتر صورت پذیرد زیرا آبدارتر شدن ساقه و دانه ذرت در عملکرد علوفه‌ای و وزن هزاردانه کاملاً مشهود است.

SM، SO، TM و TO در شکل‌های ۵ و ۶ آمده است.  
- عملکرد دانه‌ای به ترتیب تیمار SM، SO، TM و TO: ۴/۷، ۹/۱ و ۶/۹ تن در هکتار  
- عملکرد علوفه‌ای به ترتیب تیمار SM، SO، TM و TO: ۴۹/۴، ۳۸، ۸۰/۲ و ۵۶/۵ تن در هکتار  
- وزن هزاردانه به ترتیب تیمار SM، SO، TM و TO: ۸۱۰، ۷۵۰، ۹۵۰ و ۸۴۰ گرم  
با دقت در نمودارها می‌توان بیان کرد که حضور مالچ در سیستم آبیاری سطحی (SM) به تنهایی باعث شده که عملکرد دانه‌ای ۳۸ درصد، علوفه‌ای ۳۰ درصد و وزن هزاردانه ۸ درصد نسبت به تیمار



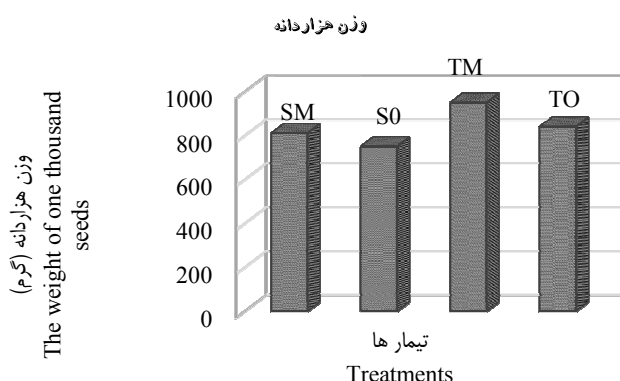
شکل ۴- میزان آب مصرفی در تیمارهای مختلف: آبیاری سطحی (SO)، آبیاری سطحی با مالچ (SM)، آبیاری زیرزمینی با لوله‌های تراوا (TO) و آبیاری زیرزمینی با لوله‌های تراوا و مالچ (TM)

Figure 4- The amount of consumed water in different treatments: Surface irrigation (SO), Surface irrigation with mulch (SM), Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM)



شکل ۵- میزان عملکرد دانه‌ای و علوفه‌ای ذرت در تیمارهای مختلف: تیمار آبیاری سطحی (SO)، تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM)، تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله‌های تراوا (TO) و تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله‌های تراوا و مالچ (TM)

Figure 5- The amount of grain yield and corn forage in different treatments: Surface irrigation (SO), Surface irrigation with mulch (SM), Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM)



شکل ۶- میزان وزن هزاردانه ذرت در تیمارهای مختلف: تیمار آبیاری سطحی (SO)، تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM)، تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا (TO) و تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا و مالچ (TM)

Figure 6- The weight of thousand seeds in different treatments: Surface irrigation (SO), Surface irrigation with mulch (SM), Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM)

جدول ۳- تجزیه واریانس فاکتورهای مؤثر بر میزان آب مصرفی و عملکردهای محصول در تیمارهای مختلف

Table 3-Variance analysis of factors affecting the amount of consumed water and crop yields in different treatments

| منابع تغییر<br>Source of variation                | درجات آزادی<br>Degrees of freedom | میانگین مربعات<br>Mean of squares |                            |                              |                                      |
|---------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
|                                                   |                                   | آب مصرفی<br>Used water            | عملکرد دانه<br>grain yield | عملکرد علوفه<br>Forage yield | عملکرد هزار دانه<br>1000 seeds yield |
| فاکتور سیستم آبیاری<br>(Irrigation system factor) | 1                                 | 15640833**                        | 2.69**                     | 294.03**                     | 6440**                               |
| فاکتور پوشش سطح خاک<br>(Mulch factor)             | 1                                 | 3193008**                         | 1.85*                      | 148.4**                      | 3536*                                |
| خطا<br>(Error)                                    | 9                                 | 94369                             | 0.2                        | 94369                        |                                      |
| کل<br>(Total)                                     | 11                                | -                                 | -                          | -                            | -                                    |

\*\* معنی‌دار در سطح ۵٪، \* معنی‌دار در سطح ۱٪ و ns بی معنی

\* Significant at 5% level, \*\* significant at 1% level and ns not significant

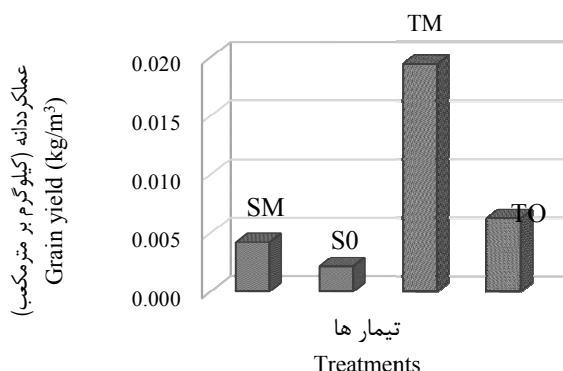
نوع سیستم آبیاری بر میزان عملکرد بسیار معنی‌دار است (کمتر از ۵۰ درصد). وجود مالچ نیز بر میزان عملکردهای محصول اثر بسیار معنی‌داری داشته است (کمتر از ۱ درصد).

#### بهره‌وری مصرف آب

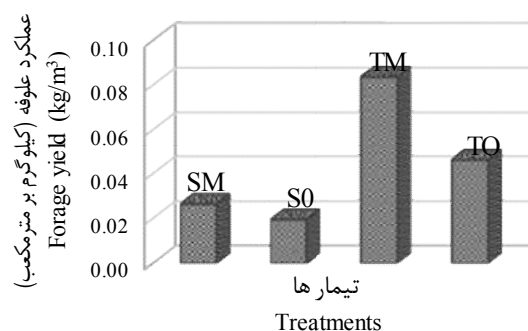
نکته مهم اینکه بیشترین عملکرد محصول در دو نوع عملکرد، در تیمار آبیاری زیرزمینی تراوا با مالچ (TM) به ثبت رسید و این مطلب زمانی اهمیت دوچندان پیدا می‌کند که به خاطر بیاوریم تیمار TM کمترین مقدار آب مصرفی را داشته است. یعنی با مصرف کمترین مقدار آب، بیشترین مقدار محصول در بین تیمارها حاصل شده است. شکل ۷ میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی یا همان بهره‌وری مصرف آب عملکرد دانه و عملکرد علوفه ذرت را نشان می‌دهد. از طرفی، همانطور که انتظار می‌رود تیمار آبیاری سطحی و بدون مالچ

نکته دیگر اینکه وجود مالچ در سیستم آبیاری سطحی (SM) باعث شده که کلیه عملکردها در مقایسه با تیمار آبیاری زیرزمینی تراوا بدون مالچ (TO) تفاوت چندانی نداشته باشد و این مطلب بیانگر اثر تقریب یکسان مالچ و آبیاری زیرزمینی تراوا بر میزان عملکرد است که با نتیجه تحقیق پنگ و همکاران و حیدری‌نیا و همکاران همخوانی دارد (۱۹ و ۱۸). با مقایسه دو تیمار آبیاری زیرزمینی تراوا (TO) و سطحی (SO) بدون حضور مالچ می‌توان اثر نوع سیستم آبیاری بر عملکرد محصول را بررسی نمود. تیمار TO نسبت به SO، عملکرد دانه‌ای را ۴۶ درصد، عملکرد علوفه‌ای را ۵۰ درصد و وزن هزاردانه را ۱۲ درصد افزایش داده است که علت آن توزیع یکنواخت آب در طول لوله و عدم وجود تنش‌های گیاهی در تیمار آبیاری زیرزمینی است. همچنین مطابق جدول ۳، نتیجه تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی نشان داد که در هر سه عملکرد، اثر فاکتور

واحد آب مصرفی را داشته است؛ زیرا هم مقدار آب داده شده در این نوع سیستم بیشتر است و از طرفی به دلیل عدم حضور پوشش گیاهی، مقدار آب قابل توجهی تبخیر شده و بهره‌وری مصرف آب کاهش یافته است. تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM) و آبیاری زیرزمینی تراوا (TO) در هر دو نوع عملکرد، نوسان زیادی نداشته و همیشه مقدار آن کمتر از TM و بیشتر از SO بوده است. ضمن اینکه مقدار بهره‌وری مصرف آب در تیمار آب زیرزمینی تراوا بدون مالچ (TO) از تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM) در هر دو نوع عملکرد بیشتر بوده که این نکته قابل توجهی است. با اینکه در تیمار SM وجود مالچ از تبخیر و هدر رفت آب جلوگیری کرده و بهره‌وری مصرف آب را بالا می‌برد، اما برتری سیستم آبیاری زیرزمینی حتی بدون حضور پوشش گیاهی نسبت به سیستم آبیاری سطحی کاملاً مشهود است. این نتیجه با یافته تحقیق بلانکو و همکاران در تطابق است (۲۰).



(SO)، کمترین عملکرد به ازای واحد آب مصرفی را داشته است؛ زیرا هم مقدار آب داده شده در این نوع سیستم بیشتر است و از طرفی به دلیل عدم حضور پوشش گیاهی، مقدار آب قابل توجهی تبخیر شده و بهره‌وری مصرف آب کاهش یافته است. تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM) و آبیاری زیرزمینی تراوا (TO) در هر دو نوع عملکرد، نوسان زیادی نداشته و همیشه مقدار آن کمتر از TM و بیشتر از SO بوده است. ضمن اینکه مقدار بهره‌وری مصرف آب در تیمار آب زیرزمینی تراوا بدون مالچ (TO) از تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM) در هر دو نوع عملکرد بیشتر بوده که این نکته قابل توجهی است. با اینکه در تیمار SM وجود مالچ از تبخیر و هدر رفت آب جلوگیری کرده و بهره‌وری مصرف آب را بالا می‌برد، اما برتری سیستم آبیاری زیرزمینی حتی بدون حضور پوشش گیاهی نسبت به سیستم آبیاری سطحی کاملاً مشهود است. این نتیجه با یافته تحقیق بلانکو و همکاران در تطابق است (۲۰). از طرفی، همانطور که انتظار می‌رود تیمار آبیاری سطحی و بدون مالچ (SO)، کمترین عملکرد به ازای



شکل ۷- بهره‌وری آب برای عملکرد دانه و علوفه ذرت در تیمارهای مختلف: تیمار آبیاری سطحی (SO)، تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM)، تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا (TO) و تیمار آبیاری زیرزمینی با لوله های تراوا و مالچ (TM)

Figure 7- Water productivity of grain and forage yield of corn in different treatments: Surface irrigation (SO), Surface irrigation with mulch (SM), Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM)

داراست که اول می‌تواند به علت پدیده موبینگی و صعود نیترات همراه با رطوبت خاک، از منطقه مرطوب شده دور لوله به سطح خاک و دومین دلیل، تغلیظ بیشتر نیترات به دلیل مصرف آب کمتر در این تیمار باشد. در عمق ۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک، به دلیل اینکه تقریباً یک منطقه رطوبتی اشباع وجود دارد، غلظت نیترات رقیق‌تر و سرعت و میزان نیترات‌زدایی<sup>۲</sup> نیز در این محیط افزایش می‌یابد، زیرا در محیط اشباع اکسیژن کم است و باکتری‌های دگرساز<sup>۳</sup> اکسیژن موردنیاز خود را از نیترات گرفته و متعاقب آن ازت را به صورت گاز N<sub>2</sub> آزاد می‌نمایند. به همین علت، غلظت نیترات در این عمق ناچیز است.

### توزیع غلظت نیترات

غلظت نیترات در هر چهار تیمار SM، SO، TM و TO در سه عمق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک با دستگاه HPLC<sup>۱</sup> اندازه‌گیری شد که در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. به دلیل مشکلات اجرایی از جمله تهیه پمپ مکش دستی، سبب شد که تنها در چهار هفته آخر نمونه‌گیری از محلول خاک انجام گیرد. شکل ۸ نشان می‌دهد که در آبیاری زیرزمینی تراوا با و بدون مالچ (TM و TO) هرچه که به عمق می‌رویم، غلظت نیترات کاهش می‌یابد. در عمق ۲۵ سانتی‌متری از سطح خاک، نیترات بیشترین مقدار خود را

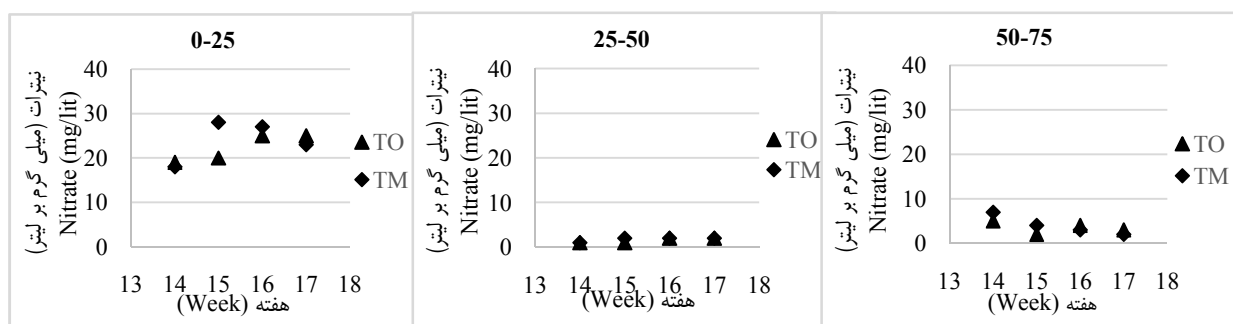
2- Denitrification  
3- Heterotroph

1- High Performance Liquid Chromatography

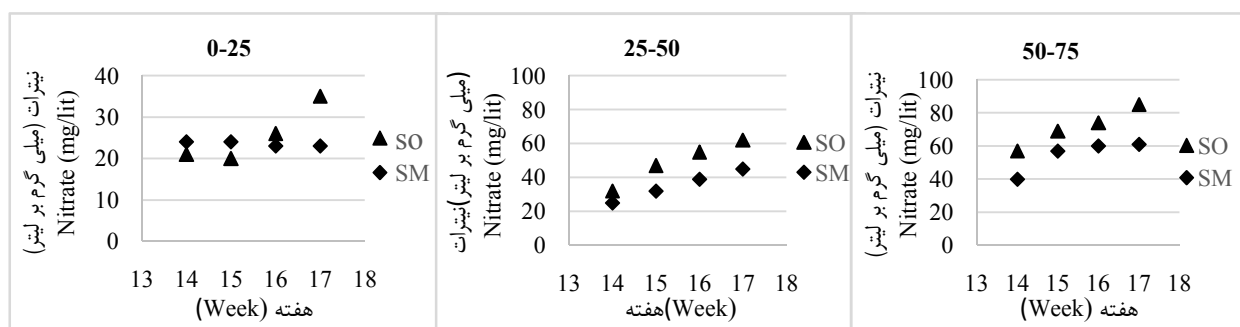


همکاران تطابق دارد (۱۸). وجود مالچ در آبیاری زیرزمینی تراوا (TM) اثر معنی‌داری بر توزیع غلظت نیترات در زمان و مکان نداشته است که این می‌تواند به علت وجود رطوبت تقریباً یکسان در تیمارهای TM و TO باشد. در آبیاری سطحی در عمق ۲۵ سانتی‌متری از سطح خاک، وجود مالچ اثر معنی‌داری بر غلظت نیترات ندارد اما در اعماق ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک، غلظت نیترات در تیمار دارای مالچ (SM) کاهش می‌یابد که علت آن می‌تواند به دلیل میزان کم‌تر آب آبیاری در تیمار دارای مالچ باشد. با توجه به جدول ۵، تجزیه و تحلیل آماری نیز بیانگر اثر بسیار معنی‌دار اثر فاکتور سیستم آبیاری بر توزیع غلظت نیترات در خاک است. این یافته با نتیجه تحقیقات ژائو و همکاران و پنگ و همکاران تطابق دارد (۱۵ و ۱۸).

در عمق ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک، به دلیل عدم نفوذ عمقی آب آبیاری در سیستم تراوا به اعماق پایین، غلظت نیترات ناچیز است. زیرا شوری نیز در این عمق بسیار ناچیز است. شکل ۹ مربوط به توزیع غلظت نیترات در سیستم آبیاری سطحی با و بدون مالچ (SM و SO) می‌باشد. هرچه که به عمق می‌رویم، غلظت نیترات افزایش می‌یابد که علت آن می‌تواند نفوذ عمقی آب از لایه‌های سطحی به لایه‌های زیرین باشد. از طرفی، آب آبیاری علاوه بر شستشوی نیترات از لایه‌های فوقانی به لایه‌های زیرین، به دلیل اینکه خود حاوی نیترات بوده، سبب افزایش غلظت نیترات در اعماق مختلف شده است. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد که در طول زمان نیز غلظت نیترات در هر سه عمق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک رو به افزایش است که علت آن را می‌توان شستشوی نیترات از لایه‌های سطحی به زیرین ذکر نمود و با نتیجه تحقیق پنگ و



شکل ۸- تغییرات غلظت نیترات در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری زیرزمینی تراوا (TO) و آبیاری زیرزمینی تراوا با مالچ (TM)  
Figure 8- Variations of nitrate concentration at different depths of soil under Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM) treatments



شکل ۹- تغییرات غلظت نیترات در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری سطحی (SO) و تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM)  
Figure 9- Variation of nitrate concentration at different depths of soil under Surface irrigation (SO) and Surface irrigation with mulch (SM) treatments

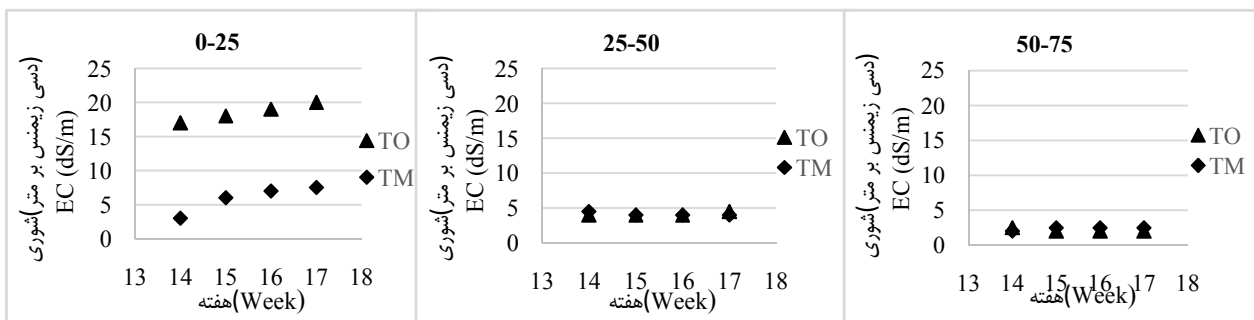
۱۰ در سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا با و بدون مالچ (TO و TM)، میزان شوری در لایه سطحی خاک یعنی ۲۵ سانتی‌متری از سطح زیاد بوده که علت آن، عدم شستشوی نیمرخ سطحی خاک توسط آب آبیاری و انتقال املاح از لایه‌های زیرین به لایه سطحی توسط رطوبت موجود در خاک و تبخیر از سطح می‌باشد. شکل ۱۰ نشان

### توزیع غلظت نمک

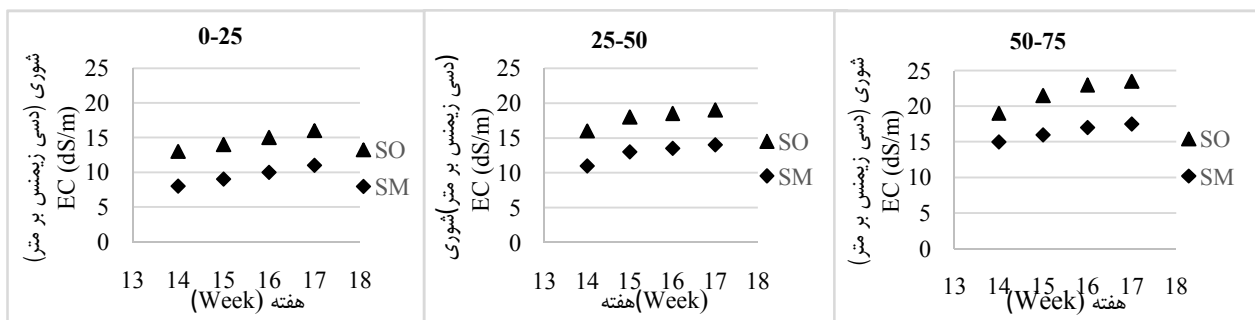
برای تعیین غلظت نمک در چهار تیمار SO، SM، TO و TM در سه عمق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی‌متری از سطح خاک، از همان نمونه محلول‌هایی که برای آنالیز نیترات جمع‌آوری شد، استفاده گردید که نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل

شکل ۱۱ نیز نشان می‌دهد که در سیستم آبیاری سطحی (تیمارهای SM و SO)، غلظت نمک هم در مکان و هم در زمان فزاینده است. نمک منتقل شده به لایه‌های سطحی بر اثر صعود موئینگی در یک دور آبیاری، به وسیله آب آبیاری دور بعدی شسته شده و به اعماق فرستاده می‌شود و غلظت نمک در لایه‌های زیرین را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر، وجود املاح و شوری در خود آب آبیاری نیز در طول زمان باعث افزایش غلظت نمک در اعماق ۲۵، ۵۰ و ۷۵ سانتی متری از سطح خاک شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در تیمار دارای مالچ و سیستم آبیاری سطحی (SM)، میزان غلظت نمک در طول نیمرخ خاک حدود ۳۰ درصد کاهش یافته است. علت آن را می‌توان به وجود مالچ نسبت داد که با کاهش بخشیدن تبخیر از سطح خاک و کم کردن مقدار آب آبیاری باعث ورود کمتر املاح در نیمرخ خاک و در نتیجه پایین نگه داشتن غلظت نمک در محلول خاک نسبت به تیمار بدون مالچ (SO) شده است و با نتیجه تحقیق ژائو و همکاران و بزبورودوف و همکاران تطابق دارد (۱۷ و ۱۸).

می‌دهد که وجود مالچ در سیستم آبیاری زیرزمین تراوا (TM)، شوری سطح خاک را بیش از ۴۰ درصد بهبود بخشیده است که این به علت کاهش تبخیر و میزان مصرف کمتر آب آبیاری در تیمار TM نسبت به TO می‌باشد. همچنین در عمق ۵۰ سانتی متری از سطح خاک که منطقه اشباع رطوبتی است، غلظت نمک محلول خاک در حد هدایت الکتریکی آب آبیاری (۴ dS/m) باقی مانده است. در عمق ۷۵ سانتی متری از سطح خاک غلظت نمک از شوری آب آبیاری نیز کمتر می‌باشد که می‌تواند به دلیل عدم حرکت آب به طرف پایین و وجود رطوبت باقیمانده از آبیاری‌های قبلی با آب معمولی باشد. از آنجاکه در سیستم آبیاری زیرزمینی، لایه سطحی خاک خشک تر است، حرکت آب در اثر شیب پتانسیل ماتریک خاک صورت می‌گیرد و لذا حرکت آب دائماً به طرف بالا می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که در سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا حرکت آب به طرف پایین کمتر بوده و در نتیجه شوری هم در لایه‌های زیرین کمتر بوده است. و مطابق با نتیجه پژوهش ژائو و همکاران می‌باشد (۱۶).



شکل ۱۰- تغییرات غلظت نمک در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری زیرزمینی تراوا (TO) و آبیاری زیرزمینی تراوا با مالچ (TM)  
Figure 10- Variation of salt concentration at different depths of soil under Subsurface irrigation by permeable tubes (TO) and Subsurface irrigation by permeable tubes and mulch (TM) treatments



شکل ۱۱- تغییرات غلظت نمک در اعماق مختلف خاک تحت تیمارهای آبیاری سطحی (SO) و تیمار آبیاری سطحی با مالچ (SM)  
Figure 11- Variation of salt concentration at different depths of soil under Surface irrigation (SO) and Surface irrigation with mulch (SM) treatments

خاک، بسیار معنی دار شده است. شمن اینکه اثر متقابل دو فاکتور برای غلظت نیترات و نمک در خاکی بی معنی شده است.

در تجزیه و تحلیل آماری انجام شده مطابق جدول ۴، اثر هر دو فاکتور سیستم آبیاری و پوشش سطح خاک بر توزیع غلظت نمک در نیمرخ

جدول ۴- تجزیه واریانس فاکتورهای مؤثر بر توزیع غلظت نیترات و نمک در تیمارهای مختلف

Table 4- Variance analysis of factors affecting the distribution of nitrate and salt concentration in different treatments

| منابع تغییر<br>Source of variation                   | درجات آزادی<br>Degrees of freedom | میانگین مربعات<br>Mean of squares    |                                |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|                                                      |                                   | غلظت نیترات<br>Nitrate concentration | غلظت نمک<br>Salt concentration |
| فاکتور سیستم آبیاری<br>(Irrigation system factor)    | 1                                 | 41300.4**                            | 3276.59**                      |
| فاکتور پوشش سطح خاک<br>(Mulch factor)                | 1                                 | 855.07 <sup>ns</sup>                 | 556.92*                        |
| اثر متقابل دو فاکتور<br>(Interaction of two factors) | 1                                 | 1012.83 <sup>ns</sup>                | 56.46 <sup>ns</sup>            |
| خطا<br>(Error)                                       | 32                                | 801.32                               |                                |
| کل<br>(Total)                                        | 35                                | -                                    | -                              |

\*\* معنی‌دار در سطح ۵٪، \* معنی‌دار در سطح ۱٪ و <sup>ns</sup> بی معنی

\* Significant at 5% level, \*\* significant at 1% level and <sup>ns</sup> not significant

## نتیجه‌گیری

سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا از شستشوی نیترات به اعماق خاک جلوگیری کرده است. در نتیجه آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تلفات نیترات در این سیستم ناچیز و حداقل می‌باشد. همچنین در سیستم آبیاری سطحی با نفوذ عمق آب آبیاری، نیترات به لایه‌های زیرین خاک انتقال یافته است. در حالی که در سیستم آبیاری زیرزمینی، نیترات مورد نیاز گیاه در منطقه ریشه باقی مانده و به مصرف گیاه می‌رسد. در نتیجه سیستم آبیاری زیرزمینی باعث کاهش تلفات و صرفه‌جویی در مصرف کود می‌شود. غلظت نمک محلول در پروفیل خاک در سیستم آبیاری زیرزمینی، به حد قابل‌توجهی پایین‌تر از غلظت نمک در سیستم آبیاری سطحی به دست آمده است. همچنین با وجود استفاده از آب شور (با هدایت الکتریکی ۴ dS/m)، عملکرد محصول ذرت در سیستم آبیاری زیرزمینی با عملکرد ذرت در منطقه برابری داشت. وجود مالچ‌ها در هر دو سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا و سطحی نیز، غلظت نمک را در سطح خاک به ترتیب ۳۰ و ۴۰ درصد کاهش داده است. در نتیجه در مناطقی که از آب شور برای آبیاری استفاده می‌کنند، سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا عملکرد بهتری را نسبت به سیستم آبیاری سطحی حاصل می‌کند و استفاده از مالچ، می‌تواند باعث افزایش عملکرد و کاهش نیاز آبشویی شود.

سیستم آبیاری زیرزمینی همراه با مالچ نشان داد که می‌توان حدود ۵۳ درصد در میزان آب مصرفی در مقایسه با سیستم آبیاری سطحی صرفه‌جویی کرد. در صورتی که اگر از مالچ استفاده نشود، صرفه‌جویی آب حدود ۴۰ درصد خواهد شد. پس در مناطقی که کمبود آب وجود دارد، این سیستم توصیه می‌شود. همچنین وجود مالچ‌ها در هر دو سیستم آبیاری زیرزمینی تراوا و سطحی به ترتیب ۱۳ و ۲۳ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب را شامل شده است. میزان صرفه‌جویی آب در اثر وجود مالچ در سیستم آبیاری سطحی بیشتر بوده است. پس توصیه می‌شود که مقداری از باقیمانده‌های گیاهی به عنوان مالچ، بعد از برداشت، روی زمین باقی بماند. سیستم آبیاری زیرزمینی علی‌رغم مصرف کمتر آب نسبت به سیستم آبیاری سطحی، عملکرد محصول را به میزان ۴۶ درصد در عملکرد دانه، ۵۰ درصد در عملکرد علوفه و ۱۲ درصد در وزن هزار دانه افزایش داده است. وجود مالچ نیز در هر دو سیستم آبیاری زیرزمینی و سطحی باعث افزایش عملکرد محصول به مقدار ۳۰ تا ۳۵ درصد شده است. بنابراین تنها با اعمال مالچ‌های باقیمانده از کشت سال قبل در مزرعه، می‌توان ضمن کاهش آب مصرفی، عملکرد بیشتری را به دست آورد.

## منابع

- Abbasi F., Naseri A., Sohrab F., Baghani J., Abbasi N. and Akbari A. 2015. Increase water use productivity. Organization of Agricultural Research, Training and Promotion. (In Persian).
- Afshar H., Sadrghaen S.H. and Mehrabadi H.R. 2013. Evaluation of Application of Plastic Mulch on Water Used and Seed Cotton Yield. Journal of Water and Soil, 26(6): 1421-1427. (In Persian with English abstract)
- Ayars J.E., Fulton A. and Taylor B. 2015. Subsurface drip irrigation in California-Here to stay?. Agricultural

- Water Management, 157:39-47.
- 4- Behbahani M.R., Mashhadi R., Rahimi K.A. and Nazarifar M.H. 2009. Study of super absorption polymer (SAP) stakasorb on moisture front of trickle and irrigation physical properties of soil. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 3(1): 91-100. (In Persian with English abstract)
- 5- Bezborodov G. A., Shadmanov, D. K., Mirhashimov R. T., Yuldashev T., Qureshi A. S., Noble A. D. and Qadir M. 2010. Mulching and water quality effects on soil salinity and sodicity dynamics and cotton productivity in Central Asia. Agriculture, ecosystems & environment, 138(1-2): 95-102.
- 6- Blanco F. F., Folegatti M. V., Gheyi H. R. and Fernandes, P. D. 2008. Growth and yield of corn irrigated with saline water. Scientia Agricola, 65(6): 574-580.
- 7- Burt C.M., Mutziger A., Howes D.J. and Solomon K.H. 2002. The effect of stubble and mulch on soil evaporation. Irrigation Training and Research Center, Bio Resource and Agricultural Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- 8- Camp C.R. 1998. Subsurface drip irrigation: A Review. Transactions of the ASAE, 41:1353-1367.
- 9- Ebrahimian H., and Batoukhte F. 2017. Technology needed to improve irrigation water productivity. Secretariat of the Special Commissions of Iran Chamber. (In Persian).
- 10- Heydari Nia, M., Naseri A. and Boroomandnasab S. 2016. Effect of management of wheat residues and irrigation with saline water on spring maize yield and salinity changes in soil profile. Journal of Water Research in Agriculture, 30(3): 285-299. (In Persian).
- 11- Johnson R. and Cody B.A. 2015. California Agricultural Production and Irrigated Water Use. Congressional Research Service Report, (R44093).
- 12- Latify S., Yousefi A. and Jamshidi, Kh. 2015. Effect of Living Mulch Application on Yield and Yield Components of Sunflower (*Helianthus annuus* L.) Cultivars and Weed Control. Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 25(7):33-45. (In Persian with English abstract)
- 13- Mohammad Abadi A.M. and Ezat Abadi M.A. 2016. Introduction of subsurface irrigation method with cement pipes in pistachio gardens. Pistachio Research Institute. (In Persian).
- 14- Pang H. C., Li Y. Y., Yang J. S. and Liang Y. S. 2010. Effect of brackish water irrigation and straw mulching on soil salinity and crop yields under monsoonal climatic conditions. Agricultural Water Management, 97(12): 1971-1977.
- 15- Qin W., Hu C. and Oenema O. 2015. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat: a meta-analysis. Scientific reports, 5.
- 16- Sedaghati N., Hosseini-fard S. and Mohammadi, M.A.A. 2012. Comparing Effects of Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems on Growth and Yield on Mature Pistachio Trees. Journal of Water and Soil, 26(3):575-585. (In Persian with English abstract)
- 17- Sepaskhah A.R., Tavakoli A.R. and Mousavi S.F. 2006. Principles and Applications of Deficit Irrigation. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (INCID), Tehran.
- 18- Seyed Dorraji S., Golchin A. and Ahmadi Sh. 2010. The Effects of Different Levels of a Superabsorbent Polymer and Soil Salinity on water Holding Capacity with three Textures of Sandy, Loamy and clay. Journal of Water and Soil, 24(2):306-316. (In Persian with English abstract).
- 19- Zhao Y., Pang H., Wang J., Huo L. and Li, Y. 2014. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield. Field Crops Research, 161: 16-25.
- 20- Zhao Y., Wang J., Li, Y. and Pang H. 2013. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29(23): 109-117.



## The Effect of Surface and Subsurface Irrigation with Saline Water and Mulch on Corn Yield, Water Productivity and Solute Distribution in the Soil

A. Liaghat<sup>1\*</sup> – M. Pourgholam Amiji<sup>2</sup> – P. Mashhour Nejad<sup>3</sup>

Received: 18-12-2017

Accepted: 18-07-2018

**Introduction:** With due attention to the limitation of water resources in Iran and specific geographical conditions of the country, using modern methods of irrigation with low water usage is inevitable. By applying suitable management in water system, soil and plant, while increasing product, we can establish a sustainable agriculture. Today, subsurface irrigation systems are used in various methods around the world, especially in the countries encountering water shortage. One of the newest methods is applying sponge plastic pipes such as tuporex which is installed in the area of plant root. Then, water with the pressure of 0/6-2 atmosphere flows inside it and by exuding, it dampens the area.

**Materials and Method:** For this purpose, in this study number of 12 concrete lysimeters with the dimension of  $2 \times 2 \times 1/25$  m was used to investigate the effect of vegetation (mulch) on the efficiency of water consumption and product function for corn, salt accumulation as well as the amount of nitrate wash on soil profile under two permeable subsurface irrigation and surface irrigation. For irrigation, a body of water with salinity of 4 ds/m was used. The plan includes two main treatments (permeable subsurface and surface irrigation) and two sub-treatments (mulch and without mulch) with factorial experiment in a randomized complete block design with three replications at the College of Agriculture Research Campus, Tehran University of Technology Located in Karaj, Iran in 2010. Surface irrigation was performed based on the moisture in the soil and permeable subsurface irrigation was performed per day as much water as was consumed. Lysimeters soil is prepared from farm soil and through examination, its appearance special weight was registered to be 1.4 gr per  $\text{cm}^3$  equals to 1400 kg per  $\text{m}^3$ . The amount of nitrogen fertilizer (Urea) was applied on the lysimeters according to the region convention, was 300 kg per hectare (120 gram per each lysimeter). A half of this amount was used at the time of cultivation and another half was used for the plant 60 days after cultivation; because the amount of water given in this type of system is higher. On the other hand due to the lack of vegetation, the significant amount of evaporated water and water productivity have decreased.

**Results and Discussion:** Results disclosed that the subsurface irrigation system has important effect in decreasing consumed water (58% with mulch and 40% without mulch) and increasing crop yield (46% in seed corn yield, 50% in forage yield and 12% in weight of one thousands seed corn) in comparison with the surface irrigation system. As well as the subsurface irrigation has prevented lower soil layer from contamination and being salty by decrease salt and nitrate leaching. Besides presence of mulch in lysimeter has shown important role in decreasing water consumption and seed corn yield. The important thing is that the highest yield in two type of performance, was recorded in subsurface irrigation treatment with mulch (TM) and this subject is so important when we remind that (TM) treatment had the least amount of water uses. It means that with the least amount of water consumed the highest amount of product was obtained among the treatments. On the other hand, surface and non-mulching (SO) irrigation is expected to have the lowest yield per unit water consumption.

**Conclusions:** Also in both subsurface irrigation with preambled tube and surface irrigation system, existence of mulch caused to decrease salt concentration to 40% and 30% in soil surface respectively which makes it suitable for the areas facing water shortage. It can be concluded that, existence of mulches in the both subsurface irrigation with permeable tube and surface irrigation system causing water saving 13 and 23 percent, respectively and the rate of saving water in surface irrigation system with presence of mulch has also increased. Thus, it is recommended that some of the plant residuals, like mulch remain on the ground after harvest. The subsurface irrigation with permeable tube system has been prevented from washing nitrate to the depths of the soil. As a result, the environmental pollution caused by nitrate losses in this system is minimal and this system saves fertilizer. Also the concentration of salt solution in the soil profile in subsurface irrigation system was

1, 2 and 3- Professor, Ph.D Student and Graduated MSc. of Irrigation & drainage, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture Engineering & Technology, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(\*-Corresponding Author Email: Aliaghat@ut.ac.ir)

significantly lower than the salt concentration in surface irrigation. As a result in areas that use the saline water for irrigation, the subsurface irrigation with preamble tube confirm better function than surface irrigation system and use mulch can increase yield and reduce leaching.

**Keywords:** Irrigation Systems, Mulch, Nitrate Leaching, Preamble Subsurface Irrigation, Salt Accumulation

## اثر آبیاری بخشی منطقه ریشه و زئولیت بر کارایی مصرف آب و خصوصیات فیزیولوژیک فلفل دلمه‌ای

پروین دانش‌پژوه<sup>۱</sup> - احمد رضا قاسمی<sup>۲\*</sup> - محمد رضا نوری<sup>۳</sup> - رحیم برزگر<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

### چکیده

سهم بالای مصرف آب در بخش کشاورزی اهمیت پژوهش در این بخش را افزایش داده است. این پژوهش به منظور بررسی تاثیر مصرف زئولیت و نحوه توزیع آن در خاک به همراه آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) و کم آبیاری بر عملکرد، اجزای عملکرد و کارایی مصرف آب فلفل دلمه‌ای در دانشگاه شهرکرد اجرا شد. این مطالعه در سه سطح آبیاری ۱۰۰ درصد، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه به صورت آبیاری بخشی منطقه ریشه و کانی زئولیت در دو سطح شامل ۲ و ۴ درصد وزنی و به صورت پخش در یک و دو طرف گلدان اجرا شد. نتایج تحقیق بصورت طرح کاملاً تصادفی و همچنین آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی تحلیل شدند. نتایج اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد و صفات وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر کل میوه و شاخص‌های شیمیایی ویتامین ث، pH، مواد جامد محلول، قطر میوه و غلظت کلروفیل a نشان داد. نتایج مقایسه میانگین‌ها نیز نشان داد که تغییرات وزن تر و قطر میوه‌ها در تمام تیمارها نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار دارند. تعداد میوه نیز در کم آبیاری شدید (۵۰ درصد) و وزن میوه در تمام تیمارها نسبت به شاهد کاهش معنی‌دار نشان داد. به عبارت دیگر استفاده از زئولیت در بیشترین سطح مورد بررسی (۴ درصد) هم نتوانسته تاثیر منفی تنش خشکی را جبران کند. همچنین نتایج نشان داد که کاربرد روش PRD به همراه زئولیت و کم آبیاری منجر به افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب در تمام تیمارها شده است. بالاترین کارایی مصرف آب به میزان ۱۱۰ درصد مربوط به تیمار ۲ درصد زئولیت، کم آبیاری ۵۰ درصد و پخش زئولیت در دو طرف گلدان و کمترین میزان افزایش کارایی مصرف آب نیز مربوط به دو تیمار ۴ درصد زئولیت، کم آبیاری ۷۵ درصد و پخش زئولیت در یک طرف گلدان و تیمار ۲ درصد زئولیت، کم آبیاری ۷۵ درصد و پخش زئولیت در دو طرف گلدان و به میزان ۱۸ درصد (۱۸ درصد افزایش نسبت به شاهد) بدست آمد. تیمارهای با کم آبیاری ۵۰ درصد دارای بالاترین مقدار کارایی مصرف آب می‌باشند که از بین این تیمارها، تیمار ۴ درصد زئولیت، کم آبیاری ۵۰ درصد و پخش زئولیت در دو طرف گلدان از نظر وزن تر میوه و تعداد میوه (دو پارامتر مهم در تولید فلفل دلمه‌ای) نیز نسبت به دیگر تیمارهای کم آبیاری ۵۰ درصد شرایط بهتری دارد، بنابراین این تیمار به عنوان تیمار مناسب توصیه می‌گردد. نتایج این تحقیق می‌تواند در افزایش راندمان تولیدات گلخانه‌ای بویژه در مناطق کم آب مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** تولیدات گلخانه‌ای، رطوبت، شاخص‌های شیمیایی، کم آبیاری، PRD

### مقدمه

آب‌های زیرزمینی از طریق چاه‌های عمیق و نیمه عمیق و پیشروی آب شور در سفره‌های آب شیرین، باعث شده تا حجم نسبی آب‌های شور افزایش یابد. بر این اساس کم آبی و کاهش کیفی منابع آب و خاک از عوامل اصلی کاهش تولید می‌باشند. کاربرد روش‌های کم آبیاری یکی از راهبردهای مهم بهینه‌سازی مصرف آب، جهت سازگاری با کم آبی محسوب می‌شود. استفاده از روش‌های کم آبیاری می‌تواند باعث کاهش رطوبت خاک و عملکرد محصول شود در مقابل استفاده از کانی زئولیت یکی از راه‌های جلوگیری از کاهش رطوبت خاک و افزایش کارایی مصرف می‌باشد. زئولیت‌ها مواد معدنی با ساختار متخلخل هستند که یون‌های بزرگ و مولکول‌های آب حفره‌های آن را اشغال می‌کنند (۲). برخلاف کانی‌های معمول رسی،

نیاز روز افزون به فرآورده‌های کشاورزی از یک سو و از سوی دیگر کمبود منابع آب در بیشتر نقاط کشور بویژه در مناطق خشک و نیمه خشک سبب شده بهینه‌سازی مصرف آب در سر لوحه کار برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران قرار گیرد. از طرفی روند برداشت بی‌رویه

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، استادیار و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد  
(\*) نویسنده مسئول: (Email: ar-ghasemi@um.ac.ir)

۴- استادیار گروه مهندسی باغبانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد  
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.69640

زئولیت معدنی بر رشد و برخی پارامتر فیزیولوژیکی گیاه پنیروک نشان دادند که با بکارگیری زئولیت کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. در مطالعات انجام شده قبلی کارایی استفاده از روش آبیاری بخشی منطقه ریشه و همچنین استفاده از زئولیت به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است؛ بنابراین در تحقیق حاضر کارایی استفاده از هر دو روش فوق به صورت همزمان و با اعمال کم‌آبیاری مورد بررسی قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی اثر کم‌آبیاری بخشی منطقه ریشه و کانی زئولیت بر برخی خصوصیات گیاه فلفل دلمه‌ای، آزمایشی در گلخانه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهرکرد در سال ۱۳۹۵ انجام گرفت.

با توجه به اهمیت و الزام وجود تیمار شاهد در این تحقیق، امکان تحلیل داده‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی وجود نداشت، زیرا تیمار شاهد تنها داری یک سطح بوده و نمی‌توان آنرا به عنوان یک فاکتور در نظر گرفت. در چنین مواردی ابتدا داده‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی تحلیل شده و سپس جهت بررسی اثرات متقابل بین فاکتورها با حذف تیمار شاهد، داده‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی نیز مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

بنابراین این پژوهش داده‌ها ابتدا در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار و با در نظر گرفتن زئولیت در ۲ سطح (۲ و ۴ درصد وزنی)، نحوه توزیع زئولیت به دو صورت (یک و دو طرف گلدان) و کم‌آبیاری در ۲ سطح (۷۵ و ۵۰ درصد تامین نیاز گیاه) به همراه تیمار شاهد (۱۰۰ درصد نیاز آبی، بدون آبیاری بخشی و زئولیت) و در چهار تکرار تحلیل شد و در مرحله دوم، جهت بررسی اثرات متقابل بین فاکتورها (زئولیت، نحوه توزیع زئولیت و کم‌آبیاری) با حذف داده‌ها به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی نیز مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصات تیمار به همراه علامت اختصاری در جدول ۱ ارایه شده است.

برای آماده‌سازی محیط کشت از گلدان‌های پلاستیکی به ارتفاع ۳۰ و قطر ۲۸ سانتی‌متر استفاده شد و برای ایجاد زهکش تا ارتفاع ۳ سانتی‌متری در کف گلدان شن دانه درشت ریخته شد و مابقی حجم گلدان با ترکیبی از ۵۰ درصد خاک زراعی، ۲۵ درصد کود دامی و ۲۵ درصد سبوس برنج با مقادیر زئولیت (مطابق تیمارها) پر گردید (شکل ۱).

تجزیه فیزیکی خاک و خصوصیات آن در جدول ۲ ارایه شده است.

در تیمارهای PRD، برای قطع ارتباط آب بین دو طرف گلدان‌ها

در زئولیت‌ها چارچوب ساختمانی به اندازه کافی باز است و این ویژگی باعث به وجود آمدن خواص منحصر به فرد زئولیت‌ها شده است (۲۱). برای افزایش بهره‌وری آب، علاوه بر تلاش برای بهبود شرایط خاک از نظر افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت، اصلاح روش‌های آبیاری نیز باید در دستور کار قرار گیرد. یکی از روش‌های مناسب آبیاری برای تولیدات گلخانه‌ای روش آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) است. آبیاری بخشی روش معمولی از آبیاری یکنواخت است که در تمام منطقه توسعه ریشه تامین آب به صورت متناوب تنها در یک طرف از منطقه ریشه صورت گرفته و در آبیاری بعدی معکوس عمل می‌شود (۱۱). در این روش در هر دور آبیاری یک طرف گلدان آبیاری می‌شود که این روش علاوه بر کاهش مصرف آب باعث تحریک ریشه گیاه برای رشد و توسعه بیشتر شده که منجر به استفاده بهتر از رطوبت خاک می‌شود.

یکی از گیاهانی که می‌توان به تولید گلخانه‌ای آن به‌ویژه در فصول سرد سال پرداخت فلفل دلمه‌ای می‌باشد. این گیاه از لحاظ مقدار تولید سبزیجات در اغلب کشورها بعد از سیب زمینی و گوجه فرنگی قرار دارد. عکس‌العمل آن نیز به خشکی در مراحل مختلف رشد متفاوت می‌باشد (۱۴). با توجه به اینکه در تحقیق حاضر روش آبیاری مورد استفاده آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) به همراه کانی زئولیت می‌باشد، در زیر به برخی از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

السادک (۸) با مطالعه بر روی بهینه‌سازی مصرف آب با روش PRD به این نتیجه رسید که این روش در مقایسه با آبیاری غرقابی از طریق تولید سیگنال‌های شیمیایی سبب کاهش قابل توجهی در مصرف آب می‌شود. بزکورت‌کولاک و همکاران (۳) در پژوهشی بر روی بادمجان تحت دو سیستم آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی با چهار تیمار آبیاری کامل، کم‌آبیاری ۵۰ و ۷۵ درصد و آبیاری بخشی (PRD) ۵۰ درصد، نشان دادند که بیشترین راندمان مصرف آب متعلق به آبیاری قطره‌ای زیر سطحی تحت تیمار PRD، برابر ۵۰ درصد می‌باشد. نتایج گیریلو و همکاران (۱۰) با بررسی تاثیر کم‌آبیاری بر کیفیت ترکیب فلانویید در میوه پرتقال نشان دادند که کم‌آبیاری به ویژه در شرایط PRD می‌تواند باعث تغییر قابل ملاحظه‌ای در فلانویید پوست میوه می‌شود و تاثیر مثبتی بر کیفیت میوه دارد.

بابا زاده و همکاران (۴) در تحقیقی ۵۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش میزان پروتئین دانه‌ی ذرت را نتیجه اعمال آبیاری ناقص ریشه گزارش کردند. کاراندیش و همکاران (۱۳) در بررسی تاثیر آبیاری ناقص ریشه و کم‌آبیاری معمولی بر بهره‌وری آب و عملکرد گیاه ذرت نشان دادند که میزان عملکرد دانه در تیمار PRD<sub>75%</sub>، اختلاف معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل نداشت ولی موجب کاهش ۲۵ درصد مصرف آب در طول دوره اعمال تیمار شد. احمدی و همکاران (۱) در بررسی شرایط تنش خشکی و کاربرد



سپس با کسر مقدار خروجی از مقدار ورودی، حجم آب مورد نیاز برای اولین آبیاری تعیین شد. برای برآورد نیاز آبی در آبیاری‌های بعدی، با سنجش مدام رطوبت خاک با استفاده از دستگاه تتاپروپ SM-300 و در نظر گرفتن مقدار FC و PWP خاک و مقدار ضریب تخلیه مجاز گیاه ( $MAD=0.5$ ) مقدار نیاز آبی با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$d = \frac{(FC - PWP) \times Dr \times MAD}{100} \quad (1)$$

که در آن: d عمق آب آبیاری (cm)، PWP نقطه پژمردگی (حجمی)، FC ظرفیت زراعی (حجمی)، Dr عمق ریشه (cm) و MAD ضریب تخلیه مجاز (درصد) می‌باشند.

از ورق‌های کارتن پلاست و چسب آکواریوم استفاده شد (شکل ۲). پس از آماده‌سازی محیط کشت، نشاء فلفل دلمه‌ای رقم لوموس ( $F_1$ ) در گلدان‌هایی به حجم ۸ لیتر کشت شدند. در هنگام انتقال نشاء به داخل گلدان‌ها به این نکته که ریشه‌ها در طرفین توسعه یابند دقت و توجه کافی شد. بعد از انتقال و قرار گرفتن نشاء‌ها در داخل خاک برای جلوگیری از پوسیدگی ریشه همزمان با آبیاری اولیه از سم بنومیل استفاده گردید. سه هفته بعد از انتقال نشاء به گلدان‌ها یعنی زمانی که احتمال صدمه به گیاه در اثر کم‌آبیاری کاهش پیدا کرد تیمارهای کم آبیاری اعمال شد.

آب مورد نیاز تیمارها برای ۱۰۰ درصد نیاز گیاه به صورت حجمی برآورد و سپس با در نظر گرفتن سطوح مختلف کم‌آبیاری برای بقیه تیمارها محاسبه و به گلدان‌ها داده شد. برآورد حجمی آب مورد نیاز تنها در اولین آبیاری و به دلیل خشک بودن خاک انجام شد، بدین صورت که آنقدر به تیمار شاهد آب اضافه شد تا شاهد خروجی باشیم،

جدول ۱- مشخصات تیمارهای آزمایش

Table 1 - The Specifications of experimental treatments

| ردیف | نام تیمار               | توضیحات تیمار                                                                                          |
|------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | T <sub>0%-100%</sub>    | بدون ژئولیت و آبیاری کامل<br>0% zeolite and full irrigation                                            |
| 2    | T <sub>2%-75%-ONE</sub> | ۲ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و کم‌آبیاری ۷۵ درصد<br>2% zeolite on one side and 75% deficit irrigation |
| 3    | T <sub>2%-75%-TWO</sub> | ۲ درصد ژئولیت در دو طرف گلدان و کم‌آبیاری ۷۵ درصد<br>2% zeolite on two side and 75% deficit irrigation |
| 4    | T <sub>2%-50%-ONE</sub> | ۲ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و کم‌آبیاری ۵۰ درصد<br>2% zeolite on one side and 50% deficit irrigation |
| 5    | T <sub>2%-50%-TWO</sub> | ۲ درصد ژئولیت در دو طرف گلدان و کم‌آبیاری ۵۰ درصد<br>2% zeolite on two side and 50% deficit irrigation |
| 6    | T <sub>4%-75%-ONE</sub> | ۴ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و کم‌آبیاری ۷۵ درصد<br>4% zeolite on one side and 75% deficit irrigation |
| 7    | T <sub>4%-75%-TWO</sub> | ۴ درصد ژئولیت در دو طرف گلدان و کم‌آبیاری ۷۵ درصد<br>4% zeolite on two side and 75% deficit irrigation |
| 8    | T <sub>4%-50%-ONE</sub> | ۴ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و کم‌آبیاری ۵۰ درصد<br>4% zeolite on one side and 50% deficit irrigation |
| 9    | T <sub>4%-50%-TWO</sub> | ۴ درصد ژئولیت در دو طرف گلدان و کم‌آبیاری ۵۰ درصد<br>4% zeolite on two side and 50% deficit irrigation |



شکل ۱- نمایشی از گلدان‌ها

Figure 1- A View of the pots

جدول ۲- نتایج تجزیه فیزیکی خاک

Table 2 - Results of physical analysis of soil

| بافت خاک<br>Soil Texture | رس<br>%<br>Clay | سیلت<br>%<br>Silt | شن<br>%<br>Sand | PWP<br>%Weighing | FC<br>%Weighing |
|--------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| لومرسی<br>Clay loam      | 37.9            | 21.3              | 40.80           | 8.9              | 24.8            |

$$WUE = \frac{Y}{I} \quad (2)$$

که در آن: WUE کارایی مصرف آب بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، Y عملکرد محصول خشک بر حسب کیلوگرم و I مقدار آب مصرفی در طول فصل رشد بر حسب متر مکعب می باشد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین ها (به روش آزمون LSD) در سطح ۵ درصد با نرم افزار SAS انجام شد.

## نتایج و بحث

### شاخص های فیزیولوژیکی

نتایج تجزیه واریانس شاخص های فیزیولوژیکی مورد بررسی در قالب طرح کاملاً تصادفی در جدول ۳ ارائه شده است. همانگونه که در جدول نشان داده شده است، تغییرات وزن تر اندام هوایی، وزن خشک اندام هوایی و وزن تر کل میوه در سطح ۹۹ درصد و قطر میوه در سطح ۹۵ درصد معنی دار ولی تعداد میوه و سطح برگ غیر معنی دار می باشند، هر چند مقادیر P-value ارائه شده در ردیف آخر نشان می دهد که تغییرات تعداد میوه در بین تیمارهای مختلف نیز در سطح ۹۰ درصد معنی دار می باشد. از طرف دیگر اثر ژنوتیپ و کم آبیاری با روش آبیاری بخشی تاثیر معنی داری (در سطح ۹۵ درصد) بر سطح برگ و تعداد میوه تیمارهای مختلف نداشته است.

### وزن تر کل میوه

میانگین تیمارها برای وزن تر میوه شکل (۴) نشان داد کم آبیاری حتی در شرایط اضافه کردن ژنوتیپ نیز منجر به کاهش معنی داری میانگین وزن کل میوه نسبت به شاهد شده است. بیشترین کاهش وزن تر میوه نسبت به شاهد در تیمار ۲ درصد ژنوتیپ در یک طرف گلدان و کم آبیاری ۵۰ درصد اتفاق افتاده است. تنش رطوبتی باعث کاهش واکنش های بیولوژیک و آب ذخیره شده در میوه می شود. در این حالت کاهش عملکرد می تواند در اثر کاهش فتوسنتز و انتقال مواد به سمت میوه باشد (۱۷). نتایج میدان شاهی و همکاران (۱۹) و لطف الرحمان و همکاران (۱۷) نیز نشان می دهد عملکرد میوه گوجه فرنگی به طور معنی داری تحت تنش رطوبتی قرار دارد و در اثر تنش آبی، عملکرد میوه کاهش می یابد. همچنین شکل (۱) نشان می دهد که افزودن ژنوتیپ در یک یا دو طرف گلدان تاثیر معنی داری بر وزن تر میوه نداشته است (تفاوت معنی داری بین تیمارهای یک



شکل ۲- آماده سازی گلدان ها

Figure 2- Preparing the pots



شکل ۳- اندازه گیری سطح برگ

Figure 3- Leaf area measurement

در نهایت شاخص های فیزیولوژیکی و شیمیایی و همچنین کارایی مصرف آب اندازه گیری شد. شاخص های فیزیولوژیکی شامل، وزن تر و خشک کل اندام هوایی، وزن تر کل میوه (با استفاده از ترازو)، قطر میوه (با استفاده از کولیس)، تعداد میوه و سطح برگ (با استفاده از نرم افزار Image j) می باشند (شکل ۳).

برای اندازه گیری سطح برگ ابتدا به صورت تصادفی چند برگ بالغ از بوته های گیاه فلفل دلمه ای در تیمارهای مختلف جدا گردید، سپس برگ ها روی سطح صافی قرار داده شد و با استفاده از دوربین از تیمارهای مختلف عکس برداری انجام گرفت. با انتقال این عکس ها به نرم افزار Image j، سطح برگ محاسبه گردید.

شاخص های شیمیایی شامل، ویتامین ث، pH، مواد جامد محلول و کلروفیل a، b و کل می باشند.

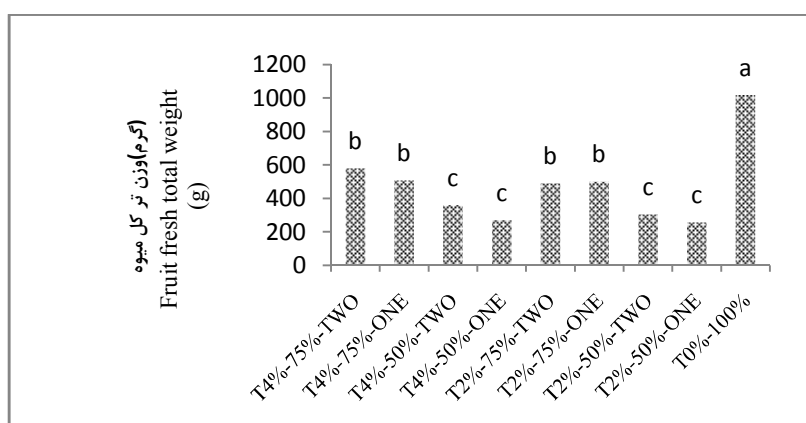
همچنین کارایی مصرف آب با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید.

طرف و دوطرفه مشاهده نمی‌شود). در مجموع هم می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ژئولیت در هر دو سطح ۲ و ۴ درصد نتوانسته از کاهش وزن تر میوه ناشی از تنش رطوبتی جلوگیری کند.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای گیاه فلفل دلمه‌ای  
Table 3- Results of analysis variance (mean square) for sweet pepper

| منبع تغییرات<br>Source of Variance          | درجه آزادی<br>dF | سطح برگ<br>Leaf area   | وزن تر کل میوه<br>fresh fruit total weight | تعداد میوه<br>number of fruits | قطر میوه<br>fruit diameter | وزن تر اندام هوایی<br>shoot fresh weight | وزن اندام هوایی<br>shoot dry weight |
|---------------------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------|
| تیمار<br>Treatments                         | 8                | 1449.066 <sup>ns</sup> | 219127.634 <sup>**</sup>                   | 8.694 <sup>ns</sup>            | 0.012 <sup>*</sup>         | 4850.40 <sup>**</sup>                    | 81.95 <sup>**</sup>                 |
| خطا<br>Error                                | 27               | 1456.108               | 6138.31                                    | 4.66                           | 0.005                      | 415.72                                   | 8.081                               |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of Variation(%) | -                | 15.37                  | 16.38                                      | 24.62                          | 17.95                      | 13.66                                    | 9.93                                |
| P-value                                     | -                | 0.463                  | <0.0001                                    | 0.090                          | 0.040                      | <0.0001                                  | <0.0001                             |

ns و \*\*, \* به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و غیر معنی‌دار  
\*, \*\* and ns means significant at 1%, 5% and non-significant respectively



شکل ۴- مقایسه میانگین وزن تر کل میوه در تیمارهای مختلف  
Figure 4- Mean Comparison of fruit fresh total weight in different treatments

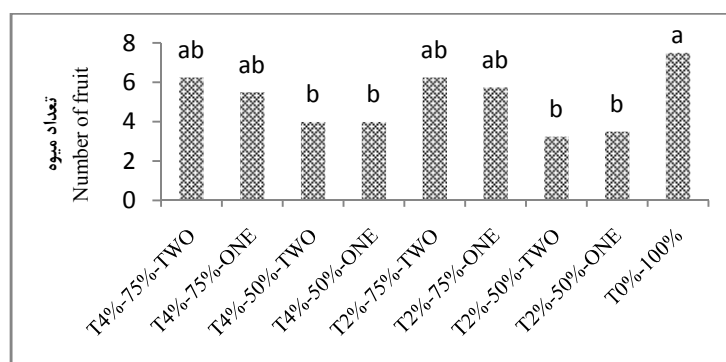
#### تعداد میوه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری و ژئولیت برای صفت تعداد میوه تنها در سطح ۹۰ درصد معنی‌دار است. نتایج مقایسه میانگین تیمارها نیز نشان می‌دهد تنها تیمارهای همراه با کم‌آبیاری شدید (۵۰ درصد) نسبت به شاهد دچار کاهش معنی‌دار شده‌اند که این کاهش در تیمارهای با ۲ درصد ژئولیت اندکی بیشتر از ۴ درصد ژئولیت است (شکل ۵). نتایج بررسی‌های گذشته نیز نشان می‌دهد که کم آبیاری باعث کاهش تعداد میوه در گیاهان مختلف شده است (۳۰).

#### قطر میوه

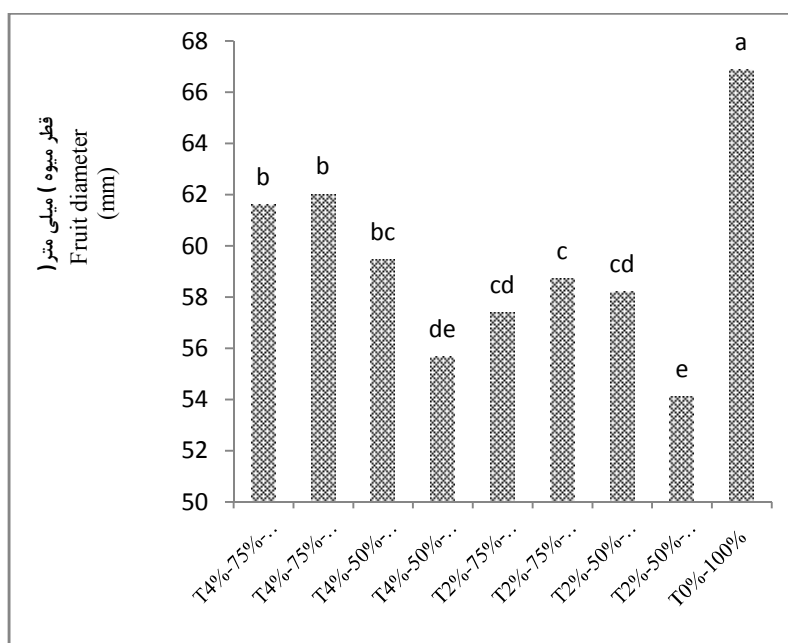
قطر میوه می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بازارپسندی میوه

داشته باشد. مقایسه میانگین قطر میوه (شکل ۶) نیز مانند وزن تر میوه نشان از کاهش معنی‌دار تمام تیمارها نسبت به شاهد دارد. کمترین میانگین قطر میوه مربوط به تیمار ۲ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و آبیاری بخشی ۵۰ درصد می‌باشد. میدان‌شاهی و همکاران (۱۹) نیز نشان دادند که با اعمال کم‌آبیاری اندازه میوه گوجه‌فرنگی کاهش معنی‌دار یافته است. دلیل کاهش قطر میوه در شرایط کم‌آبی را می‌توان اینگونه بیان کرد که کمبود آب رشد سلول‌های گیاهی را کاهش می‌دهد و موجب کاهش شکل‌گیری سلول‌های آوند چوبی می‌شود (۲۴). همچنین باعث کوچک شدن فضاهای بین سلولی و تا حدی کاهش تقسیم سلولی می‌شود که این تغییرات را می‌توان در اندازه ساقه، برگ‌ها و میوه‌ها مشاهده کرد (۲۶).



شکل ۵- مقایسه میانگین تعداد میوه در تیمارهای مختلف

Figure 5- Mean Comparison of number of fruits in different treatments



شکل ۶- مقایسه میانگین قطر میوه در تیمارهای مختلف

Figure 6 - Mean Comparison of fruit diameter in different treatments

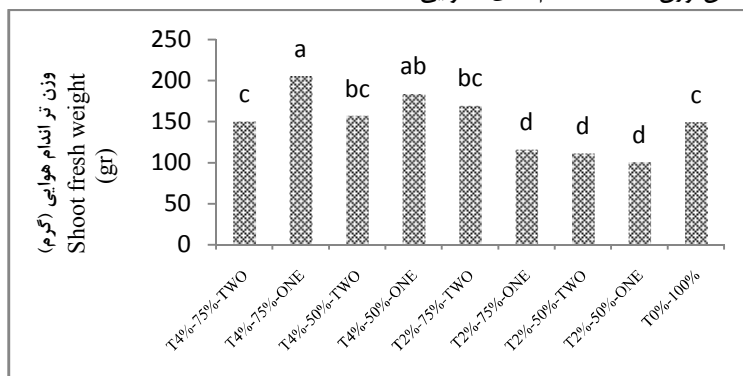
### وزن تر و خشک اندام هوایی

نتایج مقایسه میانگین‌ها (شکل ۷) برای وزن تر اندام هوایی فلفل دلمه‌ای نشان می‌دهد که تیمارهای با ۲ درصد زئولیت به جز تیمار T2%-75%-TWO نسبت به تیمار شاهد دچار کاهش معنی دار شده اند. واکنش معمول گیاهان به تنش خشکی کاهش رشد ساقه و کل اندازه گیاه می‌باشد (۲۲). در مقابل تیمارهای همراه با ۴ درصد زئولیت نسبت به شاهد افزایش نشان می‌دهند، هرچند این افزایش در تمام تیمارها معنی دار نیست. دلیل این افزایش می‌تواند ذخیره شدن آب و عناصر غذایی در کانال‌های زئولیت و همچنین جلوگیری از آبشویی این عناصر باشد. همچنین افزودن زئولیت به خاک مثل یک مخزن

ذخیره آب عمل کرده و مدت حفظ رطوبت در خاک را افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر افزایش مقدار زئولیت از ۲ درصد به ۴ درصد توانسته اثر منفی تنش خشکی را کنترل نماید.

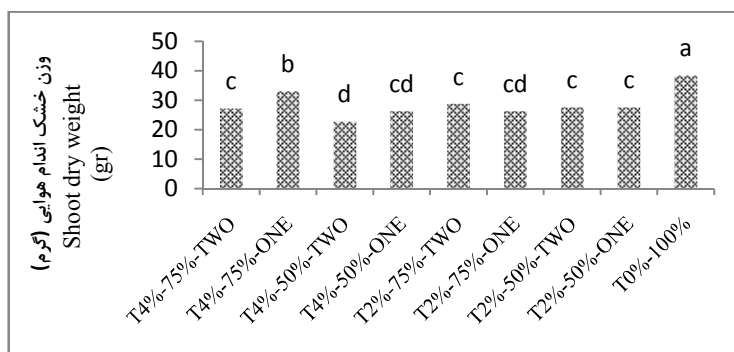
برخلاف وزن تر اندام‌های هوایی، وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه فلفل دلمه‌ای در تمام تیمارهای مورد بررسی کاهش معنی داری نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهند (شکل ۸). تنش خشکی در گیاه موجب ایجاد رقابت برای جذب آب بین بخش‌های هوایی و زمینی در بوته شده که در این رقابت، گیاه سهم بیشتری از مواد فتوسنتزی را به اندام‌های زمینی اختصاص می‌دهد، در نتیجه مواد فتوسنتزی کمتری به بخش هوایی رسیده، که این امر باعث کاهش وزن اندام‌های هوایی گیاه می‌شود (۳۰). محمدی و همکاران (۲۰) و دهقان و همکاران (۷)

نیز نتایج مشابهی برای گیاه گوجه فرنگی گزارش نموده‌اند. همچنین گیاه پنیرک را با افزایش تنش خشکی گزارش نمودند. احمدی‌آذر و همکاران (۱) نیز کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی



شکل ۷- مقایسه میانگین وزن تر اندام‌های در تیمارهای مختلف

Figure 7- Mean Comparison of shoot fresh weight in different treatments



شکل ۸- مقایسه میانگین وزن خشک اندام‌های در تیمارهای مختلف

Figure 8- Mean Comparison of shoot dry weight in different treatments

شاخص‌های شیمیایی  
نتایج حاصل از تجزیه واریانس شاخص‌های شیمیایی در قالب طرح کاملاً تصادفی در جدول ۴ نشان می‌دهد، تغییرات ویتامین ث،

pH و مواد محلول جامد در سطح یک درصد و غلظت کلروفیل a در سطح ۵ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار است.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای گیاه فلفل دلمه‌ای  
Table 4 -Results of analysis variance (mean square) for sweet pepper

| منبع تغییرات<br>Source of Variance          | درجه آزادی<br>dF | ویتامین ث<br>vitamin C | pH      | مواد جامدمحلول<br>total soluble solids | کلروفیل a<br>chlorophyll a | کلروفیل b<br>chlorophyll b | کلروفیل کل<br>total chlorophyll |
|---------------------------------------------|------------------|------------------------|---------|----------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| تیمار<br>Treatments                         | 8                | 54.893**               | 0.503** | 32.518**                               | 0.0144 *                   | 0.008 <sup>ns</sup>        | 0.008 <sup>ns</sup>             |
| خطا<br>Error                                | 27               | 0.513                  | 1.060   | 1.103                                  | 0.004                      | 0.021                      | 0.014                           |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of Variation(%) | -                | 0.82                   | 4.81    | 12.86                                  | 15.38                      | 12.36                      | 7.29                            |
| P-value                                     | -                | <0.0001                | <0.0001 | <0.0001                                | 0.015                      | 0.916                      | 0.772                           |

\*، \*\*، ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و غیر معنی‌دار

\*, \*\* and ns means significant at 1%, 5% and non-significant respectively

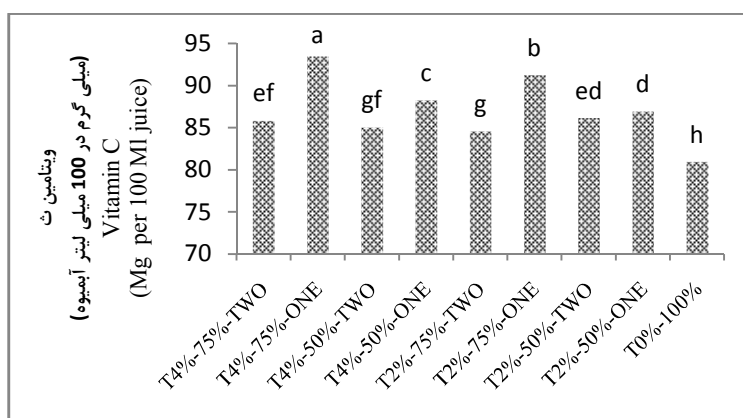
## ویتامین ث

نتایج مقایسه میانگین ویتامین ث در فلفل دلمه‌ای نشان می‌دهد تمام تیمارها نسبت به شاهد افزایش معنی‌دار نشان می‌دهند. بیشترین افزایش مربوط تیمار ۲ درصد زئولیت در یک طرف گلدان و کم آبیاری ۷۵ درصد می‌باشد و تیمار ۲ درصد زئولیت در یک طرف گلدان و کم آبیاری ۵۰ درصد در رتبه دوم قرار دارد. لی و کادر (۱۶) نیز گزارش کردند که آبیاری کمتر یا دور آبیاری زیاد سبب افزایش ویتامین ث می‌شود که با یافته‌های این پژوهش هماهنگی کامل دارد. ویتامین ث بخشی از سیستم دفاعی گیاه است (۲۳). گیاهان برای مقابله با تنش خشکی سطح آنتی‌اکسیدان‌های مختلف را افزایش می‌دهند. اسید آسکوربیک (ویتامین ث) از جمله ترکیبات آنتی‌اکسیدانی است که از تخریب بافت‌ها توسط رادیکال‌های آزاد جلوگیری می‌کند، که میزان آن در شرایط خشکی در جهت کاهش آثار مخرب تنش افزایش می‌یابد. یاری و همکاران (۲۹) بالاترین

میانگین تولید ویتامین C با کاربرد ۴۴ گرم زئولیت و آبیاری دو هفته یک بار به میزان ۱۶۷/۷ میلی‌گرم بر ۱۰۰ گرم گیاه آلوئه‌ورا را گزارش نمودند.

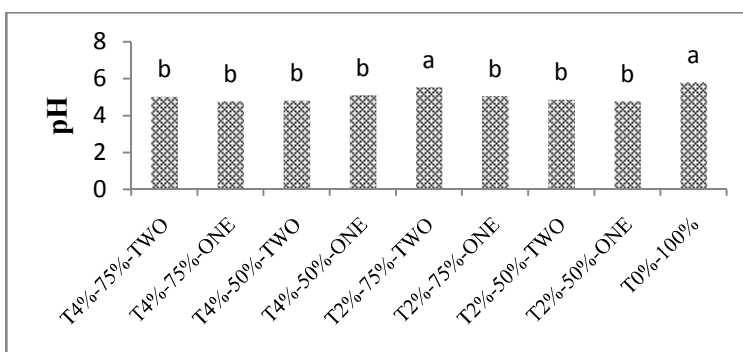
## pH

مقایسه میانگین pH تیمارهای مورد بررسی نشان داد به جز تیمار ۲ درصد زئولیت در دو طرف گلدان و کم آبیاری ۷۵ درصد، بقیه تیمارها کاهش معنی‌داری نسبت به شاهد داشتند. دلیل آن را می‌توان به کم بودن ظرفیت تبادل کاتیونی نسبت داد (۱۸). بالاترین pH مربوط به تیمار شاهد و کمترین مربوط به افزودن ۲ درصد زئولیت در یک طرف گلدان و کم آبیاری ۵۰ درصد می‌باشد. بطور کلی با کاهش میزان آبیاری، مقدار pH فلفل دلمه‌ای نیز کاهش یافته است. کاهش مقدار pH میوه با کاهش میزان آب آبیاری در برخی مطالعات دیگر مانند شرایعی و همکاران (۲۷) هم گزارش شده است.



شکل ۹- مقایسه میانگین ویتامین ث در تیمارهای مختلف

Figure 9 - Mean Comparison of vitamin C in different treatments



شکل ۱۰- مقایسه میانگین pH در تیمارهای مختلف

Figure 10 - Mean Comparison of pH in different treatments

## کل مواد جامد محلول

همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است مقدار مواد جامد محلول در تمام تیمارهای مورد بررسی اختلاف معنی‌دار و افزایشی نسبت به شاهد دارند. به عبارت دیگر اعمال تنش باعث افزایش معنی‌دار مواد جامد محلول در تیمارها شده است. گیاهان در شرایط تنش خشکی، از طریق تنظیم اسمزی، آماس سلولی را حفظ می‌کنند. این عمل به وسیله تجمع مواد قابل حل مانند قندها انجام می‌شود که به تنظیم اسمولاریته درون سلول‌های گیاه کمک کرده و موجب حفظ مولکول‌ها و ذخیره کربوهیدراتی میوه گیاه می‌شود (۵). کارام و همکاران (۱۲) گزارش کردند که افزایش تنش آبی، کیفیت میوه فلفل شیرین را از طریق افزایش مواد جامد محلول بهبود می‌بخشد. فواتی و همکاران (۹) نیز نتایج مشابهی برای گوجه فرنگی گزارش کردند. در مطالعات رستمی و همکاران (۲۶) در مطالعه‌ای بر روی فلفل قلمی نشان دادند که مواد جامد محلول با کاهش میزان آبیاری، افزایش می‌یابد. این نتایج با نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر مطابقت دارد.

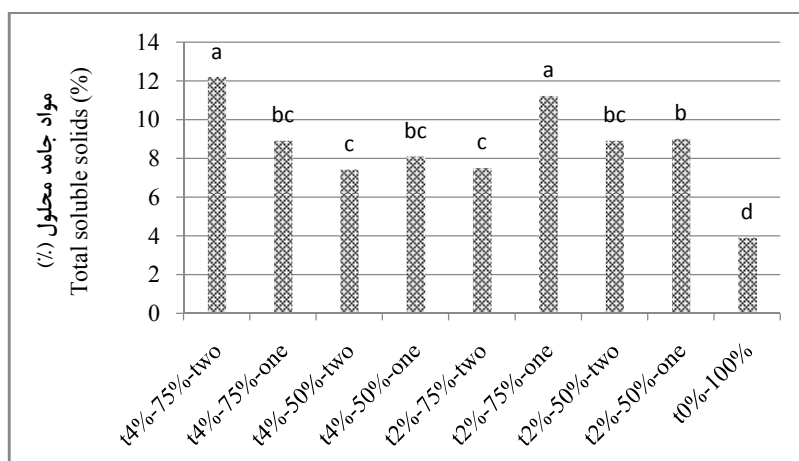
## کلروفیل a

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد که اثر ژئولیت و کم‌آبیاری به همراه روش آبیاری بخشی تنها بر میزان کلروفیل a در سطح اطمینان ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد و نتایج مربوط به کلروفیل b و کل معنی‌دار نمی‌باشند. نتایج مقایسه میانگین‌ها در کلروفیل a نیز نشان می‌دهد تنها افزودن ۴ درصد ژئولیت در یک طرف گلدان و آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه ( $T_{4\%-75\%ONE}$ ) موجب افزایش معنی‌داری در میزان کلروفیل a نسبت به شاهد شده است. به عبارت دیگر تنش آب و آبیاری بخشی به همراه ژئولیت نتوانسته تاثیر معنی‌داری بر میزان کلروفیل ایجاد کند. هرچند مطالعات متعددی

افزایش کلروفیل را در شرایط خشکی گزارش نموده‌اند ولی به نظر می‌رسد که در تحقیق حاضر افزودن ژئولیت به تیمارها تاثیر کم آبیاری را بر تغییر کلروفیل خنثی نموده است.

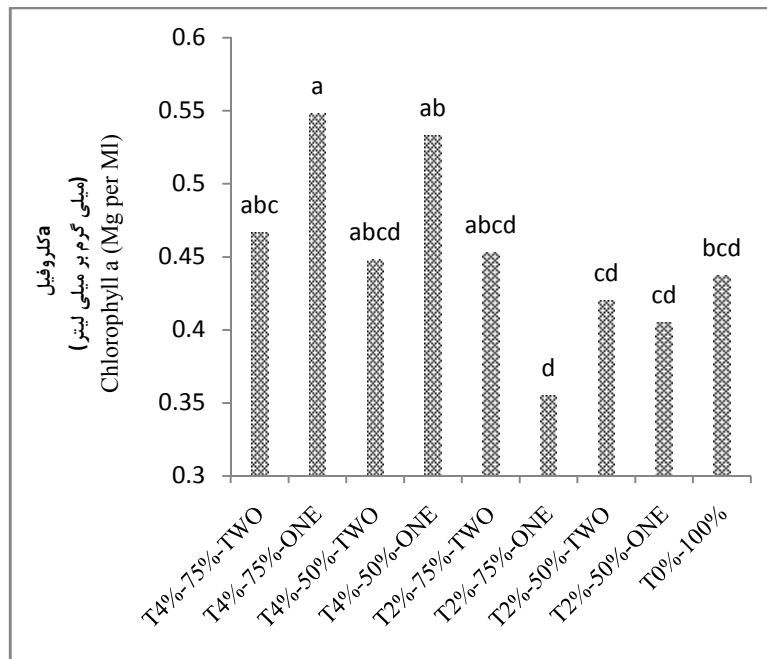
## کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس داده‌های کارایی مصرف آب در قالب طرح کاملاً تصادفی نشان می‌دهد که مقادیر مختلف ژئولیت و کم‌آبیاری به همراه آبیاری بخشی در سطح ۱ درصد تاثیر معنی‌داری بر تیمارها داشته است. اعمال تنش آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه، بالاترین کارایی مصرف آب را با تفاوت معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نشان می‌دهد که با توجه به اینکه در این شرایط کمترین مقدار آب به تیمارها اعمال شده، منطقی به نظر می‌رسد. در تیمارهای ۵۰ درصد کم آبیاری، تیمارهایی که ژئولیت در دو طرف گلدان‌ها اعمال شده است کارایی مصرف آب بیشتری نسبت به تیمارهای با ژئولیت یک‌طرفه نشان می‌دهد که حاکی از نقش مثبت ژئولیت در افزایش کارایی مصرف آب است. بالاترین مقدار کارایی مصرف آب مربوط به دو تیمار ۲ درصد ژئولیت در دو طرف گلدان و آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه ( $T_{2\%-50\%TWO}$ ) و تیماری با همین شرایط ولی ۴ درصد ژئولیت ( $T_{4\%-50\%TWO}$ ) می‌باشد که تفاوت بین این دو نیز از نظر آماری معنی‌دار نمی‌باشد. بنابراین علاوه بر تایید تاثیر مثبت ژئولیت بر افزایش کارایی مصرف آب، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش ژئولیت از ۲ به ۴ درصد تاثیر معنی‌داری بر افزایش کارایی مصرف آب نداشته است. علی‌رغم اینکه تیمار  $T_{2\%-50\%TWO}$  بالاترین کارایی مصرف آب را دارد (۱۱۰ درصد افزایش نسبت به شاهد) ولی وزن تر کل میوه که هدف نهایی تولید است در این تیمار حدود ۷۰ درصد نسبت به شاهد کاهش نشان داده است، بنابراین نمی‌توان این تیمار را به عنوان تیماری مناسب قلمداد کرد.



شکل ۱۱ - مقایسه میانگین کل مواد جامد محلول در تیمارهای مختلف

Figure 11 - Mean Comparison of total soluble solids in different treatments



شکل ۱۲- مقایسه میانگین کلروفیل a در تیمارهای مختلف

Figure 12 - Mean Comparison of chlorophyll a in different treatments

فرنگی با اعمال تیمار آبیاری بخشی (PRD) نتیجه گرفتند که در این تیمار گیاه رشد کمتری دارد ولی محصول با افزایش کارایی مصرف آب همراه است. کامپوس و همکاران (۶) نیز نشان دادند که روش PRD در مقایسه با آبیاری کامل تا ۵۰ درصد کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی را افزایش می‌دهد. تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه می‌توانند با تغییر محیط، باز و بسته شدن روزنه‌ها را کنترل و موازنه آب را تنظیم نمایند.

با در نظر گرفتن پارامتر تولید میوه، بهترین تیماری که با افزایش کارایی مصرف آب کمترین مقدار کاهش را در تولید میوه نشان داد تیمار T4%-75%-TWO می‌باشد. مقدار کارایی مصرف آب در این تیمار حدود ۴۲ درصد بیشتر از شاهد و کاهش وزن تر میوه (شکل ۴) آن حدود ۴۳ درصد نسبت به تیمار شاهد است.

خاشعی سیوکی و همکاران (۱۵) نیز گزارش نمودند که با افزایش تنش خشکی و مصرف زئولیت میزان کارایی مصرف آب افزایش می‌یابد. استیکک و همکاران (۲۸) نیز در مطالعات خود بر روی گوجه

جدول ۵- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) کارایی مصرف آب

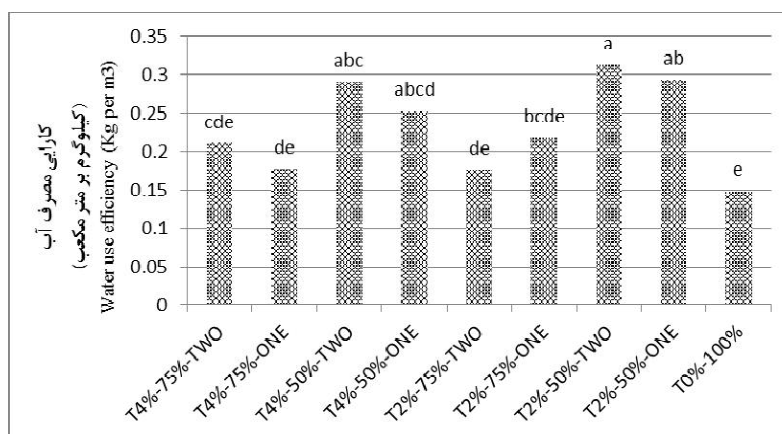
Table 5 - Analysis variance (mean square) of water use efficiency

| منبع تغییرات<br>Source of Variance           | درجه<br>آزادی<br>dF | کارایی مصرف آب<br>water use efficiency |
|----------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| تیمار<br>Treatments                          | 8                   | 0.0139**                               |
| خطا<br>Error                                 | 27                  | 0.003                                  |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of Variation (%) | -                   | 24.04                                  |
| P-value                                      | -                   | 0.001                                  |

\*\* معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

\*\* significant at 1%





شکل ۱۳- مقایسه میانگین کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف

Figure 13- Mean Comparison of water use efficiency in different treatments

### اثرات متقابل

در این بخش برای بررسی اثرات متقابل بین زئولیت، کم آبیاری و روش توزیع زئولیت در گلدان‌ها، داده‌ها بصورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی نیز تحلیل گردید (جدول ۶). در این جدول نتایج مربوط به شاخص‌هایی که حداقل یکی از اثرات متقابل آنها معنی‌دار شده است ارائه گردید. با توجه به معنی‌دار شدن اثر متقابل مقدار زئولیت و نحوه توزیع

آن در گلدان‌ها می‌توان نتیجه گرفت که نحوه توزیع زئولیت در گلدان‌ها (در یک طرف یا هر دو طرف گلدان) توانسته است اثر کاهش مقدار زئولیت را در برخی شاخص‌ها جبران کند. برای نمونه اثر متقابل مقدار و نحوه توزیع زئولیت برای قطر میوه در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در هر دو مقدار ۲ و ۴ درصد زئولیت قطر میوه در شرایطی که زئولیت در دو طرف گلدان توزیع شده بصورت معنی‌داری افزایش یافته است.

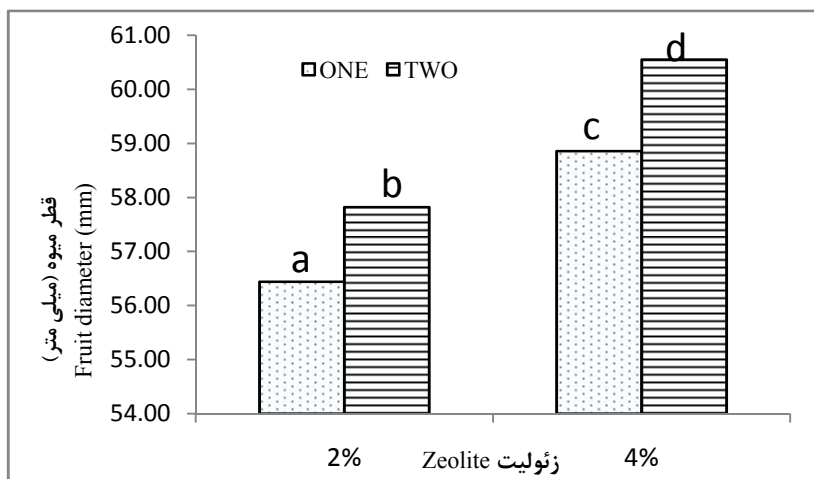
جدول ۶- تجزیه واریانس اثرات متقابل

Table 6- Analysis variance components for interaction effects

| منبع تغییرات<br>Source of Variance                                           | درجه<br>آزادی<br>dF | وزن تر<br>کل میوه<br>fresh fruit<br>total weight | قطر میوه<br>fruit<br>diameter | وزن تر<br>اندام هوایی<br>shoot fresh<br>weight | وزن خشک<br>اندام هوایی<br>shoot dry<br>weight | ویتامین<br>C<br>vitamin C | PH                  | مواد جامد<br>محلول<br>total soluble<br>solids | کلروفیل<br>a<br>chlorophyll a |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|
| زئولیت*کم آبیاری<br>Zeolite*Deficit irrigation                               | 1                   | 633.53**                                         | 10.944*                       | 1697/69*                                       | 62.580**                                      | 5.502**                   | 0.621**             | 35.701**                                      | 0.0001 <sup>ns</sup>          |
| زئولیت*روش توزیع<br>Zeolite*distribution method                              | 1                   | 116.68 <sup>ns</sup>                             | 0.199 <sup>ns</sup>           | 10604.048**                                    | 72.030**                                      | 5.805**                   | 0.177 <sup>ns</sup> | 51.005**                                      | 0.038**                       |
| کم آبیاری*روش توزیع<br>Deficit irrigation*distribution method                | 1                   | 506.75**                                         | 46.262**                      | 101.246 <sup>ns</sup>                          | 0.028 <sup>ns</sup>                           | 53.79**                   | 0.396*              | 5.611*                                        | 0.0038 <sup>ns</sup>          |
| زئولیت*کم آبیاری*روش توزیع<br>Zeolite*Deficit irrigation*distribution method | 1                   | 406.25*                                          | 0.728 <sup>ns</sup>           | 2544.341*                                      | 11.103 <sup>ns</sup>                          | 1.197 <sup>ns</sup>       | 0.005 <sup>ns</sup> | 63.281**                                      | 0.003 <sup>ns</sup>           |
| ضریب تغییرات                                                                 | -                   | 8.98                                             | 2.60                          | 12.70                                          | 10.21                                         | 9.80                      | 4.98                | 12.55                                         | 10.47                         |

\*، \*\* و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد، ۱ درصد و غیر معنی‌دار

\*, \*\* and ns means significant at 1%, 5% and non-significant respectively



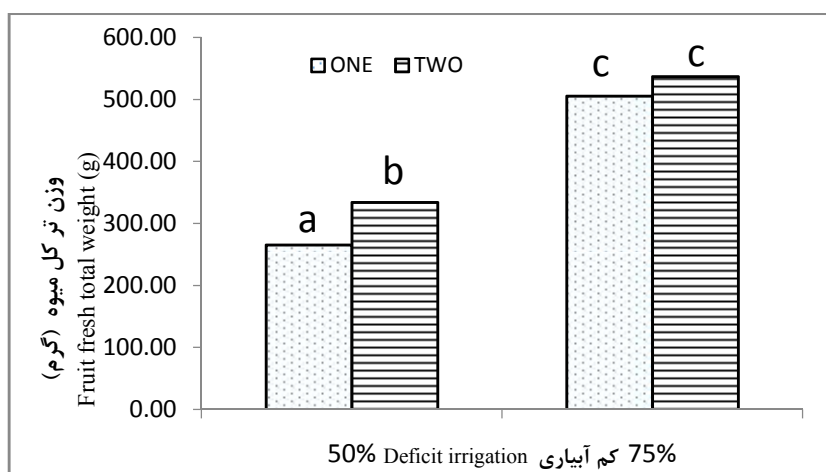
شکل ۱۴- برهمکنش مقدار زئولیت و نحوه توزیع آن بر قطر میوه

Figure 14 – Interaction of zeolite and its distribution on fruit diameter

طرف گلدان شده است. به عبارت دیگر توزیع زئولیت در دو طرف گلدان می‌تواند بصورت معنی‌داری از کاهش محصول نسبت به توزیع زئولیت در یک طرف گلدان جلوگیری کند.

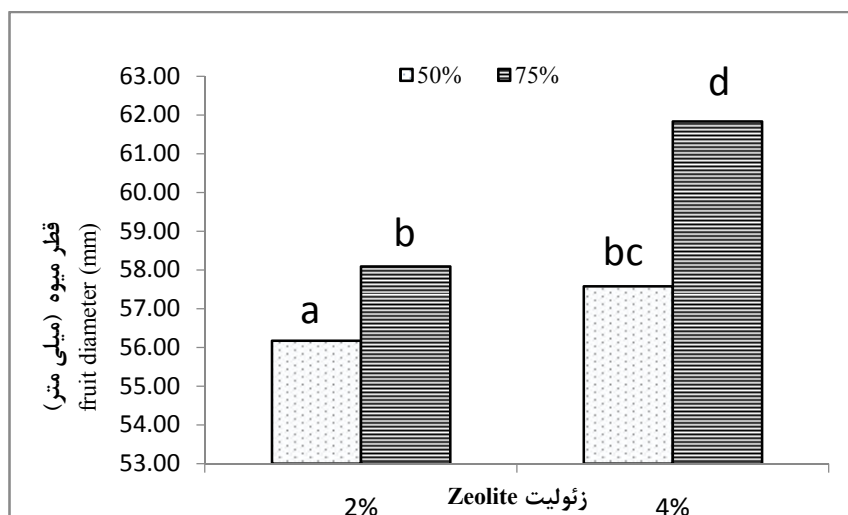
بر اساس نتایج ارایه شده در جدول ۶ اثرات متقابل مقدار زئولیت و کم آبیاری نیز معنی‌دار شده است. نتایج ارایه شده در شکل ۱۶ برای قطر میوه این موضوع را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار زئولیت به ۴ درصد، قطر میوه نیز بصورت معنی‌داری افزایش یافته است. در کم آبیاری ۵۰ درصد و ۷۵ درصد با افزایش مقدار زئولیت از ۲ به ۴ درصد قطر میوه بصورت معنی‌داری افزایش یافته است. به عبارت دیگر افزایش مقدار زئولیت توانسته تاثیر منفی کم آبیاری را کاهش کند.

همچنین اثرات متقابل نحوه توزیع زئولیت در گلدان‌ها و کم آبیاری نیز معنی‌دار شده است. برای نمونه شکل ۱۵ مقایسه میانگین برای اثرات متقابل وزن تر کل میوه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است تفاوت بین کم آبیاری ۵۰ درصد با ۷۵ درصد در هر دو حالت توزیع زئولیت در یک طرف و دو طرف گلدان معنی‌دار می‌باشد. که نشان می‌دهد اثر کاهنده کم آبیاری بر وزن تر کل میوه بر اثر مثبت زئولیت غلبه نموده است. به عبارت دیگر زئولیت توانسته اثر کاهشی کم آبیاری ۵۰ درصد در کاهش عملکرد را نسبت به کم آبیاری ۷۵ درصد به خوبی جبران کند. ولی با توجه به معنی‌داری تفاوت بین توزیع زئولیت در یک طرف و دو طرف گلدان در کم آبیاری ۵۰ درصد، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع زئولیت در دو طرف گلدان باعث افزایش معنی‌دار وزن تر میوه نسبت به توزیع زئولیت در دو



شکل ۱۵- برهمکنش کم آبیاری و نحوه توزیع زئولیت بر وزن تر کل میوه

Figure 15- Interaction of deficit irrigation and zeolite distribution on fruit fresh total weight



شکل ۱۶- مقایسه میانگین قطر میوه در تقابل مقدار ژئولیت با کم آبیاری  
Figure 16 - Interaction of deficit irrigation and zeolite on fruit diameter

## نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که اکثر صفات مورد بررسی (به جزء کلروفیل) در تیمارهای حاوی ژئولیت همراه با آبیاری بخشی منطقه ریشه (PRD) نسبت به شرایط عدم مصرف ژئولیت و استفاده از روش PRD تفاوت معنی دار نشان می دهند، که با توجه به ویژگی های مثبت این پلیمرها از قبیل استحکام بخشیدن به خاک و فراهم آوردن شرایط مناسب برای رشد گیاهان و همچنین توانایی جذب آب می توان این تفاوت ها را توجیه نمود.

از بین پارامترهای مورد بررسی وزن تر میوه که مهمترین پارامتر در تولید فلفل دلمه ای می باشد در تمام تیمارهای تنش خشکی، ژئولیت و PRD کاهش معنی دار نسبت به شاهد نشان داد، هرچند در تیماری تنش ۷۵ درصد مقدار این کاهش کمتر می باشد ولی در مجموع می توان نتیجه گرفت که حتی در شرایط استفاده از ۴ درصد ژئولیت هم استفاده از روش PRD همراه با کم آبیاری برای تولید این گیاه توصیه نمی شود. افزایش مقدار ژئولیت به مقداری بیشتر از ۴

## منابع

- 1- Ahmad Azar F., Hasanlu T., Imani a., Feyzi Asl V. 2015. Drought stress and application of mineral zeolite on growth and some physiological parameters of cucumber plant. Journal of Plant Breeding. Iranian Journal of Biology, 28(3): 459-474 (In Persian).
- 2- Ayan S., Yahyaoglu Z., Gercek V. and Şahin A. 2005. Utilization of zeolite as a substrate for containerized oriental spruce (*Picea orientalis* L.) seedlings Concentration (mg/kg) 3 dS m-116 dS m-110 propagation. International Symposium on Growing Media.4-10.
- 3- Babazadeh H., Saraei Tabrizi M., and Modarrs Sanavi S. A. M. 2010. Improving the irrigation water use efficiency of soybean using partial root drying, jornal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 4 (52), 99 – 110 (In Persian).
- 4- Bezkurt Colak Y., Yazar A., Colak I., Akca H. and Duraktekin G. 2015. Evaluation of crop water stress Index (CWSI) for Eggplant under Varying Irrigation Regimes Using Surface and Subsurface Drip Systems.

- Agriculture and Agriculture Science. 42: 372 – 382.
- 5- Blum A. 1988. Plant Breeding for Stress Environments. CRC Press, Inc., pp. 45-56.
- 6- Campos H. N., Trejo C., Pena-Valdivia C. B., Ayala C. R., and Garcia P. S. 2008. Effect of partial root zone drying on growth, gas exchange and yield of tomato. Scientical Horticulture, 4: 493-499.
- 7- Dehghan H., Alizadeh A., Esmaeli K., Nemati H. 2015. The effect of drought stress on root growth and yield components of tomato. Journal of water research in agriculture. 29(2): 169 -179 (In Persian).
- 8- EL-Sadek A. 2014. Water use Optimisation based on the concept of partial rootzone drying. Ain Shams Engineering Journal, 5:55-62.
- 9- Favati F., Lovelli S., Galgano F., Miccolis V., Di Tommaso T. and Candido V. 2009. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling. Scientia Horticulturae. 122(4):562- 571.
- 10- Grilo F. S., Di Stefano V., Lo Bianco R. 2017. Water use efficiency and physiological characteristic of “Tommy Atkins” mango under partial root zone drying irrigation system. Journal of Water Resource and Protection. v. 7. n. 13. pp. 1029-1037.
- 11- Jerie P., Zhang J., Kang S. and Hu. X. 2003. The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and waterbalance in an irrigation pear (*Pyrus communis* L.) Orchard. Journal of Hydrol. 280:192-206.
- 12- Karam F., Masaad R., Bachour R., Rhayem C. and Rouphael Y. 2009. Water and radiation use efficiencies in Drip- irrigated pepper (*capsicum annum* L.): Response to full and deficit irrigation regimes. European Journal of Horticultural Science. pp. 79-85.
- 13- Karandesh F., Mirlatifi S.M., Shahnazari A., Abbasi F., Gheysari M. 2011. The effect of partial root drying and deficit irrigation on the water use efficiency on yield components in conditions plant corn. Iranian journal of soil and water research. 44: 33 34 (In Persian).
- 14- Khan M. A. I., Farooque A. M., Haque, M. A., Rahim, M. A. 2008. Effects of water Stress at various growth stages on the Physio-morphological characters and yield in chilli. Bangladesh Agricultural Research, 33(3): 353-362.
- 15- Khashei Sivaki a., Kochakzadeh m., Shahabifar M. 2008. The Effect of Application of Clinoptilolite Natural Zeolite and Soil Moisture on Corn Yield Components. Journal of Soil Research (Soil and Water Science) 22(2). 235-241 (In Persian).
- 16- Lee S. K. and Kader A. A. 2000. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin c content of horticultural crops. Postharvest Biology and Technology. 20(3): 207-220.
- 17- Lutfur Rahman S. M., Nawata E. and Sakuratani T. 1998. Effects of water stress on yield and related morphological characters among tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. Thai Journal of Agricultural Science, 31(1):10-18.
- 18- Mamy Y., Peyvast GH. A., Bakhshi D. and Sami Zadeh H. 2007. Determination of different substrate for tomato planting in soil-free cultivation system. Journal of Horticulture (Science and Technology of Agriculture), 22: 48–39 (In Persian).
- 19- Meydan Shahi M., Mousavi S. F., Mostafizadefard B., Lindy A. 2012. Effect of Deficit irrigation by PRD method and sodium salicylate on yield, yield components and tomato juice consumption efficiency. Journal of Greenhouse Crop Science and Technology, 4(13):1-13 (In Persian).
- 20- Mohammadi M., Leaghat A., Molavi H. 2011 .The effect of salinity and drought stress on yield components tomato in field conditions tom. Journal of irrigation Science and Engineering, 34:15-24 (In Persian).
- 21- Mohammadi M., Molavi H., Layghat A. and Parsinejad M. 2013. The Effect of Zeolite Application on the Performance and Water Consumption Efficiency of Maize. Journal of Water Research in Agriculture, 27(1):57- 67 (In Persian).
- 22- Munns R. 2002. Comparative physiology of salt and water stress. Plant Cell Environ, 25: 239–250.
- 23- Ramachandra Rao S. and Ravishankar G. A. 2002. Plant cell cultures: Chemical factories of secondary metabolites. Biotechnology Advances. 20(2): 101-153.
- 24- Rigling A., Briihlhart H., Braker O., Forster T. and Schweingruber F.H. 2003. Effect of irrigation on diameter growth and vertical resin production in *Pinus sylvestris* L. on dry sites in the central Alps, Switzerland. Forest Ecology and Management. 175: 285- 296.
- 25- Rostami F., Sefidkahi M. A., Shahanzari A., Akbarpour V. 2016. Effect of A 200 superabsorbent under drought stress conditions on some phytochemical parameters of chili pepper plant and water productivity. Iranian Journal of Water Research. Volume 10 number 1. Successive 20th. 114–107 (In Persian).
- 26- Sarmadnia Gh. H. and Kochaki A. 1992. Physiological aspects of farming. Mashhad University Press, pp. 424 (In Persian).

- 27- Sharayei P., Sobhani A. R. and Rahimiyan M. H. 2006. The effect of different level of irrigation and potassium fertilizers on water use efficiency and the quality of tomato fruit of Erli Belanket. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7(2): 75-86 (In Persian).
- 28- Stikic R., Popovic S., Srdic M., Savic D., Jovanovic Z. and Prokic L. J., 2003. Partial Root Drying (PRD): A New Technique for Growing Plants That Saves Water and Improves The Quality of Fruit. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, 164-171.
- 29- Yari S., Sigarodi f., Moradi p. 2013. Effect of different levels of zeolite on growth and production of gel in aloe vera plant under different irrigation conditions. *Journal of Medicinal Plants*, 4(48): 72-81 (In Persian).
- 30- Zarei M., Kazemai S. A., Bohrani G. 2014. The effect of tillage and stress water systems on Wheat plant performance. *Journal of Iranian Crop Research*, 12(4): 793-804 (In Persian).



## The Effect of Partial Root-Zone Drying and Zeolite on Water Use Efficiency and Physiological Characteristics of Sweet Pepper

P. Daneshpazhoh<sup>1</sup> - A. R. Ghasemi<sup>2\*</sup> - M. R. Noori<sup>3</sup> - R. Barzegar<sup>4</sup>

Received: 01-01-2018

Accepted: 29-07-2018

**Introduction:** Optimal water utilization is one of the most important challenges of the present century. Due to limited water resources and the existence of alternate droughts in the country, optimal use of it is necessary. The deficit irrigation technique is one of the most effective and practical ways in which it can determine and justify the minimum water consumption with acceptable economic performance. Its use in reducing water consumption for biomass production and for irrigation of annual and perennial crops. To effectively apply water deficit management, an understanding of the effects of irrigation at different stages of vine growth is required. Partial Root-zone Drying (PRD) is also one of the new irrigation techniques over the past years. The results of many studies indicate that water use efficiency has increased and there is no significant reduction in the yield in this irrigation method. In this technique, only half of the roots are irrigated at each turn and the remaining half remains dry. On the other hand, in recent years, the use of natural minerals has improved in order to improve the physical and chemical composition of the soil, which leads to an increase in water holding capacity in the soil. One of the methods for increasing the water use efficiency is the application of water absorbent materials in soil. Super absorbent polymer increases the water saving in soil and decreases the amount of water used for irrigation. Zeolite is one of these minerals that increases the soil water holding capacity. So far, many studies have been carried out on the use of PRD, as well as the use of zeolite, but none has examined the effect of these two simultaneously. Therefore, in the present study, the efficiency of both above method and deficit irrigation on yield and water use efficiency of sweet pepper were investigated.

**Materials and Methods:** This research was carried out in a completely randomized design with 9 treatments and 4 replications in a greenhouse in Shahrekord University. This study was carried out at three levels of irrigation of 100%, 75% and 50% of the water requirement of the plant by Partial Root-zone Drying and zeolite in two levels of 2 and 4% by weight in the soil, in one and two sides of the pots with a height of 30 and diameter 28 cm. After preparing the culture medium, the F1 type Lummus seedlings were transferred to the pots. During the transfer of transplants into the pot, careful attention was paid to the fact that the roots were developed on both sides. Physiological parameters such as leaf area, total fresh and dry weight of the whole organ, total fresh weight of fruit, diameter and number of fruits and chemical indices including vitamin C, pH, total soluble solids and chlorophyll a, b and total chlorophyll with water use efficiency were measured and evaluated. In order to analyze the results, SAS software (version 1/9) was used. Mean comparison was also performed by LSD test.

**Results and Discussion:** The results of this study showed that there was a significant difference in the 1% level for fresh and dry weight, fresh weight of fruit and chemical indices of vitamin C, pH and soluble solids, and a significant difference at 5% for diameter fruit and chlorophyll. The results of comparing the meanings showed that fresh weight and fruit diameter were significantly decreased in all treatments than control. The number of fruits in severe irrigation (50%) and in both levels of zeolite showed a significant decrease compared to control. Vitamin C value as an important indicator of fruit quality in all treatments was significantly higher than control, in other words water stress causes an increase in the amount of vitamin C in the fruit, and the amount of pH in the most treatments has decreased significantly compared to the control treatment.

**Conclusion:** Given that all important processes such as photosynthesis, nutrition, opening and closing of stomatal and plant growth and development are under the influence of water, most of the studied traits in this research (except chlorophyll) in zeolite-containing treatments, showed a significant advantage over non-consumption of zeolite. The results also showed that application of PRD method with zeolite in deficit irrigation resulted in significant increase in water use efficiency in all treatments.

**Keywords:** Chemical indicators, Deficit irrigation, Greenhouse products, Moisture, PRD

1, 2 and 3- Graduate Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Respectively

(\*)- Corresponding Author Email: ghasemiar@yahoo.com, ar-ghasemi@sku.ac.ir

4- Assistant Professor, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Shahrekord University



## شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک و گیاه توسط مدل CERES-Wheat

فرزاد مندنی<sup>۱\*</sup> - بابک غلامی<sup>۲</sup> - علیرضا باقری<sup>۳</sup> - غلامرضا محمدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

### چکیده

مصرف بیش از حد نیتروژن باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود، بنابراین اطلاع از توزیع اشکال مختلف نیتروژن و چگونگی حرکت آن‌ها در خاک اهمیت بالایی دارد. به منظور شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر رشد و عملکرد گندم و همچنین تغییرات نیتروژن خاک و گیاه با استفاده از مدل CERES-Wheat، دو آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ اجرا شد. هر دو آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کاربرد سطوح کود نیتروژن (۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار) بود. از نتایج یک آزمایش به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی و واسنجی مدل و از دیگری به منظور ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج واسنجی نشان داد که مدل قادر است با حداقل اختلاف ویژگی‌های رشد و نمو گندم را شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر بود با دقت بالایی صفات مورد ارزیابی گندم را شبیه‌سازی کند، بطوریکه میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مراحل نمو، وزن خشک کل و عملکرد دانه به ترتیب در حدود ۷ تا ۸، ۵ تا ۹ و ۱۱ تا ۱۷ درصد میانگین مشاهدات بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد، همزمان با کاربرد کود اوره محتوای یون‌های نیترات و آمونیوم خاک افزایش یافت. بیشترین میزان نیترات در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۴۱/۳، ۵۴/۵، ۷۲/۱ و ۸۰/۹ کیلوگرم در هکتار بود. با افزایش مصرف نیتروژن، مقدار آبشویی نیتروژن نیز به شدت افزایش یافت، به طوری که میزان هدر رفت نیتروژن در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۲۵۹/۳، ۲۷۶/۲، ۳۱۰/۴ و ۳۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین با افزایش کاربرد کود اوره میزان نیتروژن در اندام‌های هوایی و دانه گندم افزایش یافت. بطور کلی نتایج این بررسی نشان داد که مدل CERES-Wheat توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی تغییرات وضعیت نیتروژن خاک و گیاه دارد.

**واژه‌های کلیدی:** آبشویی نیتروژن، ارزیابی مدل، عملکرد دانه، کارایی نیتروژن، واسنجی مدل

### مقدمه

دانه گندم است که تحت تاثیر زمان و میزان مصرف کود نیتروژن قرار دارد. پروتئین دانه گندم به دلیل حجم بالای مصرف، بخش عمده‌ای از نیاز غذایی انسان را تامین می‌کند (۲۲). همچنین بین عملکرد دانه، مقدار پروتئین دانه گندم و عرضه نیتروژن از منابع مختلف رابطه مستقیمی وجود دارد (۲۲). نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی پر مصرف است که در ساختمان مولکول‌های پروتئین، آنزیم‌ها، کوآنزیم‌ها، اسیدهای نوکلئیک و سیتوکروم‌ها نقش دارد (۱۶). نیتروژن از طریق تاثیر بر تعداد پنجه، سنبله بارور، تعداد دانه و وزن هزار دانه بر تمام اجزای عملکرد دانه گندم تاثیر می‌گذارد. بنابراین تامین نیتروژن در زمان‌های مختلف رشد و مطابق با نیاز گیاه می‌تواند بر افزایش جذب آن و سرعت رشد و عملکرد گیاهان زراعی موثر باشد (۴۱).

در بیشتر مناطق جهان منبع اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، نیتروژن مصرف شده در بوم نظام‌های کشاورزی است. کودهای نیتروژنی به دلیل آبشویی سریع یون نیترات در خاک و همچنین استفاده بیش از حد نیاز، یکی از عوامل اصلی آلوده کننده

در بین محصولات زراعی گندم با سطح زیر کشت حدود ۲۱۰ میلیون هکتار و میزان تولید حدود ۶۰۰ میلیون تن نقش بسیار مهمی در جیره غذایی مردم دنیا و کشور ایران ایفاء می‌کند (۹ و ۳۷). کیفیت دانه گندم تحت تاثیر مدیریت‌های زراعی نظیر میزان، زمان و چگونگی مصرف نیتروژن، نوع ژنوتیپ و شرایط محیطی در مراحل قبل و پس از گرده افشانی و همچنین برهمکنش عوامل محیطی و نوع ژنوتیپ قرار دارد (۳۹). میزان پروتئین یکی از شاخص‌های کیفیت

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب استادیار اکولوژی گیاهان زراعی، دانشجوی کارشناسی ارشد اگرواکولوژی و دانشیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳ - استادیار علوم شناسایی و مبارزه با علف‌های هرز، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(\*) نویسنده مسئول:

(Email: F.mondani@razi.ac.ir

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.70443

مراحل فنولوژی گندم در شرایط رژیم‌های رطوبتی مختلف در اهواز (۹)، شبیه سازی عملکرد و مراحل فنولوژی گندم دوروم در ایتالیا (۱۰)، پیش بینی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم (۱۵ و ۳۵) و بررسی اثر شرایط اقلیمی، رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد گندم اشاره کرد (۴). از آنجا که استان کرمانشاه یکی از مناطق مهم تولید محصولات کشاورزی در ایران است و گندم نقش بارزی در تناوب زراعی این استان دارد، این مطالعه به منظور ارزیابی توانایی مدل CERES-Wheat در شبیه سازی تأثیر مدیریت مصرف نیتروژن بر مراحل رشد و نمو و عملکرد گندم و همچنین بررسی وضعیت تغییرات نیتروژن خاک و گیاه انجام شد.

## مواد و روش‌ها

### تشریح مدل

به منظور شبیه سازی رشد و نمو گندم از مدل سیستم گیاهی گندم (CSM- CERES-Wheat) از بسته نرم افزار DSSAT نسخه ۴/۶ استفاده شد (۱۸، ۲۰). این مدل رشد و نمو و تولید دانه را با در نظر گرفتن ویژگی‌های آب و هوایی، خاک و همچنین میزان نیتروژن و آب خاک شبیه سازی می‌کند. در این مدل امکان تعیین استراتژی‌های مدیریت مزرعه بر اساس تفاوت واکنش ارقام مختلف به مواردی نظیر زمان کشت، مقدار کود نیتروژن و تیمار آبیاری وجود دارد (۱). ورودی‌های این مدل شامل عملیات مدیریت زراعی، اختلافات ارقام، نوع و ویژگی‌های خاک و اطلاعات آب و هوایی است. برای شبیه‌سازی توسط این مدل لازم است که داده‌های مورد نیاز ابتدا تحت فایل‌های خاصی سازماندهی و به مدل ارائه شوند. هر کدام از این فایل‌ها جنبه خاصی از رشد و نمو گیاه و یا شرایط محیطی را نشان می‌دهند. فایل X شامل اطلاعات مدیریت زراعی نظیر تاریخ کاشت، تراکم بوته، عمق کاشت، فاصله ردیف کاشت، رقم مورد کاشت، شرایط اولیه خاک (رطوبت و حاصلخیزی) و جزئیات برداشت بود که توسط زیر مدل XBUILD به مدل ارائه گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز شامل تشعشع خورشیدی روزانه (بر حسب مگاژول در متر مربع)، کمینه و بیشینه درجه حرارت روزانه (بر حسب درجه سانتی‌گراد) و میزان بارندگی روزانه (بر حسب میلی‌متر) برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی بود که از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه که در فاصله ۴ کیلومتری از محل اجرای آزمایش‌ها قرار دارد تهیه شد و سپس توسط زیر مدل Weather Man در مدل تعریف گردید. فایل A حاوی اطلاعاتی نظیر عملکرد دانه (بر حسب کیلوگرم در هکتار)، وزن خشک کل (بر حسب کیلوگرم در هکتار)، حداکثر شاخص سطح برگ، تعداد روز از کاشت تا گلدهی و تعداد روز از کاشت تا گدھی و در نهایت فایل T در برگرفته ویژگی‌های روند تغییرات مراحل نمو فنولوژیک، روند

منابع آب شناخته شده‌اند (۲). به دلیل انحلال پذیری و قابلیت انتقال بالای یون نترات، آب‌های زیرزمینی که تنها منبع آب آشامیدنی بسیاری از مردم دنیا هستند، به‌طور دایم در معرض تهدید آلودگی قرار دارد (۱۴). میانگین جذب نیتروژن توسط محصولات زراعی مختلف کمتر از ۵۰ درصد گزارش شده است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰ درصد از نیتروژن مصرف شده در سیستم‌های کشاورزی می‌تواند به شکل‌های مختلف هدر رود (۴۵). کارایی پایین جذب نیتروژن در بسیاری از گیاهان زراعی عامل مهمی در تشدید تلفات از طریق آبشویی، تصعید و انتشار این عنصر کلیدی مورد نیاز گیاه است که به راحتی در خاک و اتمسفر رها می‌شوند.

همانطور که گفته شد گندم اهمیت قابل توجهی در تامین انرژی مردم دارد. بنابراین ارزیابی وضعیت آینده تولید این محصول از مسائلی است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است (۳۲). برای تعیین زمان مطلوب و میزان استفاده از نیتروژن مطالعات طولانی مدت و پرهزینه مزرعه‌ای ضروری است. از طرفی انجام اینگونه مطالعات با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار بر فرایندهای جذب نیتروژن و بررسی برهمکنش آنها در مزرعه بسیار مشکل است (۳۷). براساس پیشرفت‌های به عمل آمده امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای برای مدیریت نظام‌های زراعی به عنوان یک ابزار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۹). از جمله این نرم افزارها مدل‌های شبیه سازی رشد و نمو گیاهان هستند. این مدل‌ها ابزارهای کمی هستند که بر اساس اصول علمی استوار بوده و می‌توانند اثرات متفاوت اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی را روی تولید محصولات زراعی مورد ارزیابی قرار دهند (۳۲). با استفاده از این مدل‌ها همچنین می‌توان به پیش بینی میزان نترات شسته شده، انتقال آن به آب‌های زیرزمینی و مدیریت مصرف آن تحت شرایط مختلف در مزرعه پرداخت (۳۳). استفاده از مدل‌های شبیه سازی به دلیل هزینه کم، سرعت زیاد و ارایه اطلاعات کامل گزینه مناسبی برای تکمیل و توسعه آزمایش‌های مزرعه‌ای است (۴۰).

تاکنون مدل‌های مختلفی برای شبیه سازی رشد گندم توسعه یافته‌اند که در بین آنها مدل CERES1-Wheat از بسته نرم افزاری DSSAT2 یکی از معروف‌ترین آن‌هاست (۲۰ و ۱۸). این مدل رشد و نمو غلات را با توجه به مقدار نیتروژن، آب و شاخص‌های خاک و اقلیم محاسبه می‌کند (۱). در زمینه ارزیابی توانایی این مدل در شبیه سازی نقش مدیریت زراعی و عوامل اقلیمی بر تولید گندم مطالعات بسیاری در دنیا انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پیش بینی عملکرد گندم در استان خراسان (۲۱)، شبیه سازی رشد، عملکرد و

- 1- Crop Estimation through Resource and Environment synthesis
- 2-Decision Support System for Agrotechnology Transfer



تغییرات عملکرد دانه، روند تغییرات وزن خشک کل و روند تغییرات شاخص سطح برگ گندم بود که در طول فصل رشد اندازه‌گیری شده بود. علاوه بر این، اطلاعات خاکشناسی مورد نیاز شامل درصد رس، شن و سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، کل نیتروژن قابل جذب توسط گیاه، درصد کربن آلی، نقطه ظرفیت زراعی، نقطه

پژمردگی دائم و میزان رطوبت اشباع بود که از اعماق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر، ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر خاک محل آزمایش اندازه‌گیری شد (جدول ۱) و توسط بخش SBuild بسته نرم افزاری مدل DSSAT در قالب فایل خاکشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش  
Table 1- Soil physico-chemical properties of experimental field

| عمق خاک<br>(سانتیمتر)<br>Soil Depth<br>(cm) | بافت خاک<br>Soil Texture | رس<br>(%)<br>Clay (%) | سیلت<br>(%)<br>Silt (%) | شن<br>(%)<br>Sand (%) | کربن<br>آلی (%)<br>Orga<br>nic Carbo<br>n (%) | نیتروژن<br>(%)<br>Nitrogen (%) | اسیدیته<br>خاک<br>pH | وزن<br>مخصوص<br>ظاهری<br>Bulk<br>Density | نقطه<br>پژمردگی<br>دائم<br>Permanent<br>Wilting<br>Point | نقطه<br>ظرفیت<br>زراعی<br>Field<br>Capacity | رطوبت<br>اشباع<br>Saturation |
|---------------------------------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| 0-30                                        | Clay-Silt                | 44.3                  | 39.0                    | 16.7                  | 1.5                                           | 0.17                           | 7.4                  | 1.4                                      | 0.205                                                    | 0.325                                       | 0.49                         |
| 30-60                                       | Clay-Silt                | 44.7                  | 38.7                    | 16.7                  | 1.1                                           | 0.17                           | 7.4                  | 1.5                                      | 0.205                                                    | 0.325                                       | 0.49                         |
| 60-90                                       | Clay-Silt                | 42.3                  | 40.0                    | 17.7                  | 1.0                                           | 0.17                           | 7.4                  | 1.6                                      | 0.225                                                    | 0.355                                       | 0.495                        |

یکی از مهمترین بخش‌های مدل سیستم گیاهی گندم در بسته نرم افزار DSSAT اطلاعات مربوط به ارقام گیاهان زراعی است که در فرایند واسنجی مدل بر مبنای تنظیم و تعیین یک سری ضرایب ژنتیکی برای رقم مورد نظر بکار برده می‌شود (۹). از آنجا که ارقام مختلف گیاهان زراعی از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی با یکدیگر تفاوت دارند، این اختلافات روی رشد، نمو و عملکرد آنها تاثیرگذار خواهد بود. بنابراین این اختلافات وارپته‌ای باید به نوعی در مدل‌های شبه‌سازی گیاهان زراعی در نظر گرفته شوند تا پیش بینی قابل قبولی انجام شود. در گندم این مشخصه‌ها به وسیله هفت پارامتر و به نام ضرایب ژنتیکی در مدل CERES-Wheat ارایه شده‌اند. این ضرایب مشخص می‌کنند که چگونه یک ژنوتیپ نسبت به عوامل محیطی مانند درجه حرارت، طول روز، محتوی آب خاک و نیتروژن واکنش نشان می‌دهد و یا اینکه طول دوره رشد و مرفولوژی رقم چگونه است (۲۱). این ضرایب شامل: PIV، میزان حساسیت ارقام گندم به بهارسازی و نشان دهنده تعداد روزهایی است که گیاه باید درجه حرارت مناسب برای بهارسازی در حد مطلوب باشد، PID، میزان تاخیر در نمو گندم به ازای قرار گرفتن گیاه در دوره نوری با یک ساعت کوتاه‌تر از دوره نوری مطلوب را نشان می‌دهد، P5، طول دوره پر شدن دانه بر اساس درجه روز رشد، G1، تعداد دانه در هر واحد جامعه گیاهی در واحد سطح در زمان گرده افشانی بر حسب تعداد در گرم، G2، سرعت پر شدن دانه بر حسب میلی‌گرم در روز که بر اساس فراهمی منابع محاسبه می‌شود، G3، وزن خشک ساقه (شامل پهنک و غلاف برگ به علاوه سنبله)، در زمانی که سرعت تولید شدن ساقه متوقف می‌شود بر حسب گرم و PHINT، فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی بر مبنای واحد درجه روز رشد،

هستند که لازم است جهت واسنجی مدل از اطلاعات مستخرج از آزمایش‌های مزرعه و یا منابع معتبر استخراج شوند. پس از انجام فرایند واسنجی و کسب اطمینان از دقت ضرایب ژنتیکی، لازم است که مدل مورد ارزیابی توسط اطلاعات مستخرج از آزمایش‌های مستقل (آزمایش‌هایی که به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی استفاده نشده‌اند) قرار گیرد. در این بررسی استخراج ضرایب ژنتیکی به منظور واسنجی مدل و همچنین فرایند ارزیابی از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای صورت گرفت.

### آزمایش مزرعه

به منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Wheat جهت شبیه سازی اثر نیتروژن بر رشد، مراحل فنولوژیکی، عملکرد گندم و مطالعه تغییرات نیتروژن خاک و گیاه از اطلاعات مستخرج از دو آزمایش استفاده شد. به این صورت که یک آزمایش به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی برای واسنجی مدل و آزمایش دیگر به منظور ارزیابی مدل بود. این آزمایش‌ها در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۵/۹۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹/۵۲ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر) اجرا شدند. میانگین بلند مدت سالانه بارندگی و دما منطقه به ترتیب، ۴۳۷ میلی‌متر و ۱۵/۳ درجه سانتی‌گراد است. آب و هوای منطقه بر اساس تقسیم بندی اقلیمی دوما رتن سرد و نیمه خشک است. خاک محل آزمایش دارای بافت لومی-رسی بود (جدول ۱).

هر دو آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کاربرد کود نیتروژن در چهار

بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT استفاده شد (۲۸). برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل CERES-Wheat براساس شرایط آب و هوایی و خاکشناسی و همچنین مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای رقم پیش‌تاز تخمین می‌زند. در این مرحله ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آنها تعیین و بطور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. اطلاعات لازم برای محاسبه ضرایب ژنتیکی شامل طول دوره نمو از سبز شدن تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک، روند تغییرات شاخص سطح برگ، حداکثر شاخص سطح برگ، روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل و روند تغییرات عملکرد دانه گندم بود که از تیمار ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب) آن آزمایشی که منظور واسنجی مدل طرح ریزی شده بود، استخراج گردید.

### ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل از اطلاعات مراحل نمو فنولوژیک، شاخص سطح برگ، عملکرد ماده خشک کل و عملکرد دانه استخراج شده از تیمارهای آزمایش مزرعه‌ای (۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار) که به منظور ارزیابی مدل طرح ریزی شده بود، استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این بررسی نیز شامل برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود که از طریق روابط زیر محاسبه شد (۴۶):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\sigma} \times 1 \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

در این معادلات،  $P_i$ ، مقادیر پیش‌بینی شده،  $O_i$ ، مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده شده)،  $n$ ، تعداد نمونه‌های بکار رفته،  $\sigma$ ، مقدار متوسط مشاهده شده است.  $R^2$ ، نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. RMSE و nRMSE با نشان دادن مقدار خطا دقت مدل را مورد بررسی قرار می‌دهند. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی آماره های RMSE و nRMSE برابر صفر می‌شود (۹). جذر میانگین مربعات خطا نشان دهنده میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است. جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز نشان دهنده درصد نسبی میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقادیر صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب بیانگر

سطح ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز گیاه گندم که به ترتیب معادل، ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار در نظر گرفته شد. در این مطالعه میزان کودهای مورد نیاز گندم با توجه به نتایج آزمون خاک انجام گرفته ۳۰۰ کیلوگرم اوره، ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار در نظر گرفته شد. تمامی کودهای فسفره و پتاسه در زمان کشت به خاک محل آزمایش اضافه گردید. کود اوره نیز در ۳ نوبت مصرف شد، به این ترتیب که یک سوم از آن در مرحله ۲ تا ۴ برگ و بقیه در انتهای مرحله پنجه زنی و انتهای ساقه رفتن به مزرعه اضافه گردید.

آماده سازی مزرعه شامل شخم نیمه عمیق و سپس دیسک زنی و هموار سازی زمین در ابتدای پاییز انجام گرفت. بذر گندم مورد استفاده در این آزمایش رقم پیش‌تاز بود که دارای تیپ رشد پاییزه است. بذرها با دست روی ردیف‌هایی به طول ۳ متر و فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر در عمق ۵ سانتی‌متری خاک کشت شدند. تراکم نهایی مزرعه ۴۰۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد. همچنین در تمام طول دوره رشد گیاه، مزرعه پایش گردید و کنترل علف‌های هرز بصورت دستی انجام شد. آبیاری مزرعه نیز بر اساس نیاز و به روش کرتی صورت گرفت. جهت جلوگیری از نفوذ آب و کود نیتروژن به کرت‌های مجاور فاصله بین کرت‌ها ۲ متر بود.

اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت مراحل نمو فنولوژیک گندم برحسب روز پس از کشت و نمونه برداری‌های تخریبی از بوته‌های گندم بود. برای نمونه برداری‌های تخریبی از مرحله نمو ساقه رفتن تا رسیدگی کامل، نمونه‌های تصادفی با رعایت اصول حاشیه جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و وزن خشک کل با استفاده از کوادراتی به ابعاد ۳۰×۵۰ سانتی متر برداشت شدند. سپس نسبت به تفکیک اندام‌های گیاهی شامل برگ، ساقه و اندام‌های ذخیره‌ای اقدام گردید و هر کدام به تفکیک اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و سپس توزین شدند. به منظور اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل LA-3000A) استفاده شد. در پایان دوره رشد و رسیدگی فیزیولوژیک محصول نیز یک متر مربع از هر کرت با رعایت اصول حاشیه برداشت گردید، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفته و سپس وزن خشک کل و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

### واسنجی مدل

به منظور واسنجی مدل CERES-Wheat لازم است که ضرایب ژنتیکی رقم پیش‌تاز در محل آزمایش تحت شرایط مطلوب رشد (عدم وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) تعیین شوند (۲۳ و ۲۸). برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal)

## نتایج و بحث

### واسنجی مدل

مدل CERES-Wheat دارای هفت ضریب ژنتیکی است که رشد و نمو گندم را تشریح می‌کند (جدول ۲). پس از تعیین و جایگزینی ضرایب ژنتیکی برای گندم رقم پیش‌تاز در ساختار مدل، از اطلاعات حاصل از یادداشت برداری مراحل نمو فنولوژیک، حداکثر سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه جهت فرایند واسنجی استفاده شد (جدول ۳).

نتایج واسنجی نشان داد که مراحل نمو فنولوژیک شبه‌سازی شده و مشاهده شده زمان کاشت تا گلدهی گندم به ترتیب، ۱۸۲ و ۱۷۸ روز پس از کاشت بود که نشان دهنده اختلاف ۴ روزه بین داده‌های شبه‌سازی و اندازه‌گیری شده است. همچنین زمان رسیدگی فیزیولوژیک شبه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۲۲۰ و ۲۲۱ روز پس از کاشت بود که نشان می‌دهد یک روز اختلاف وجود دارد (جدول ۳). مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل نموی کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۳/۸۸ بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده برای مراحل نموی کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۷/۷۰ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین شاخص سطح برگ شبه‌سازی شده و مشاهده شده گندم به ترتیب، ۳/۸۱ و ۳/۵۷ بود که نشان دهنده اختلاف بسیار ناچیزی بین داده‌های شبه‌سازی و اندازه‌گیری شده بود (جدول ۳).

دقت عالی، خوب و متوسط شبه‌سازی‌ها است و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد نیز نشان دهنده عدم دقت شبه‌سازی‌های مدل است (۲۹). نزدیک بودن شاخص توافق ویلموت (d) به ۱ بیانگر نزدیکی مقادیر شبه‌سازی شده به مشاهده شده و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است (۱۳). مقادیر  $d \geq 0.9$ ، بیانگر توافق عالی،  $0.8 \leq d < 0.9$ ، بیانگر توافق خوب،  $0.7 \leq d < 0.8$ ، بیانگر توافق متوسط و  $d < 0.7$ ، بیانگر توافق ضعیف بین مقادیر مشاهده شده و شبه‌سازی شده است (۲۳).

پس از انجام فرایند ارزیابی و کسب اطمینان از صحت شبه‌سازی‌ها توسط مدل CERES-Wheat، برخی از مهمترین ویژگی‌های تغییرات نیتروژن خاک نظیر آشفی نیتروژن، یون نیترات، یون آمونیوم و نیتروژن مصرف شده و همچنین برخی از مهمترین ویژگی‌های نیتروژن گیاه نظر میزان جذب نیتروژن، نیتروژن موجود در وزن خشک کل و نیتروژن دانه‌ها طی دوره رشد مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور محاسبه کارایی جذب (NUpE)، کارایی تبدیل (NuTE) و کارایی مصرف نیتروژن (NUE) شبه‌سازی شده از معادلات زیر استفاده شد (۴۲):

$$NUpE = \frac{AN (kg \cdot ha^{-1})}{TN (kg \cdot ha^{-1})} \quad (4)$$

$$NuTE = \frac{GY (kg \cdot ha^{-1})}{AN (kg \cdot ha^{-1})} \quad (5)$$

$$NUE = NUpE \times NuTE \quad (6)$$

در این معادلات، AN، نیتروژن شبه‌سازی جذب شده توسط گیاه، TN، کل نیتروژن شبه‌سازی فراهم خاک و مصرف شده و GY، عملکرد دانه شبه‌سازی است.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای رقم گندم مورد استفاده در این آزمایش

| P1V<br>(°C day) | P1D<br>(days) | P5<br>(°C day) | G1 | G2<br>(mg.day <sup>-1</sup> ) | G3<br>(g) | PHINT<br>(°C day) |
|-----------------|---------------|----------------|----|-------------------------------|-----------|-------------------|
| 54.45           | 90.75         | 720            | 25 | 30                            | 2         | 95                |

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل برای مراحل نمو فنولوژیک و روندهای شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم  
and grain yield of wheat Table 3- Calibration results for development stages, leaf area index, total dry weight

| تیمار                     | روز تا گلدهی    |              | روز تا رسیدگی فیزیولوژیک |              | شاخص سطح برگ    |              | وزن خشک کل                              |              | عملکرد دانه                        |              |
|---------------------------|-----------------|--------------|--------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|
|                           | Anthesis day    |              | Maturity day             |              | Leaf area index |              | Total dry weight (kg ha <sup>-1</sup> ) |              | Grain yield (kg ha <sup>-1</sup> ) |              |
| Treat ment                | اندازه گیری شده | شبه سازی شده | اندازه گیری شده          | شبه سازی شده | اندازه گیری شده | شبه سازی شده | اندازه گیری شده                         | شبه سازی شده | اندازه گیری شده                    | شبه سازی شده |
|                           | Measured        | Simulated    | Measured                 | Simulated    | Measured        | Simulated    | Measured                                | Simulated    | Measured                           | Simulated    |
| کود نیتروژن<br>fertilizer | 182             | 178          | 220                      | 221          | 3.57            | 3.81         | 8019.31                                 | 8059.81      | 3899.5                             | 3613.3       |

مقدار جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ معادل ۰/۶۵ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز ۱۸/۱۳ درصد میانگین مشاهدات شاخص سطح برگ بود. میانگین وزن خشک کل شبیه سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۸۰۱۹/۳۱ و ۸۰۵۹/۸۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده میانگین وزن خشک کل ۴۰/۵ کیلوگرم در هکتار بود. میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برابر ۵۰۳/۹۷ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز ۶/۲۸ درصد میانگین مشاهدات بود. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که میانگین عملکرد دانه شبیه سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۳۶۱۳/۳ و ۳۸۹۹/۵ کیلوگرم در هکتار بود. اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده عملکرد دانه ۲۸۶/۲ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برابر ۴۴۸/۸ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز ۱۱/۵ درصد میانگین مشاهدات بود. همانگونه که نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ویژگی‌های شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده برای تیمار ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب نیاز غذایی گندم به کود نیتروژن) نشان داد، مدل CERES-Wheat توانست با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای گندم رقم پیش‌تاز شبیه سازی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. مقایسه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده دقت بسیار بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم افزاری مدل DSSAT است (۱۸ و ۲۸).

## ارزیابی مدل

### مراحل نمو فنولوژیک

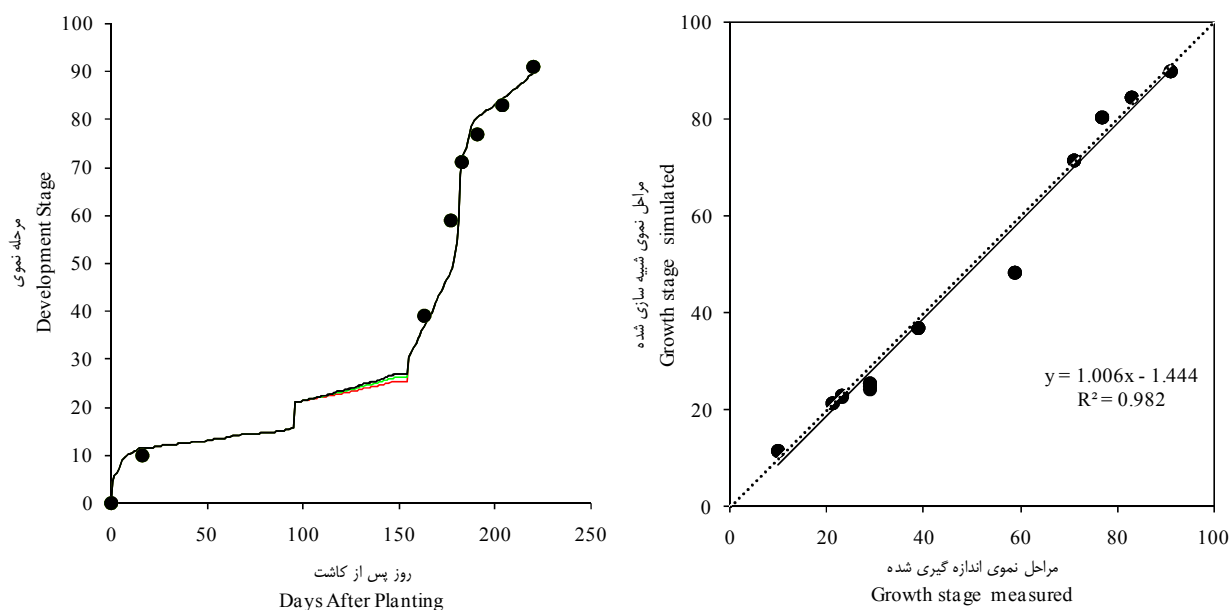
نتایج این بررسی نشان داد که طول دوره روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه و شبیه سازی تحت تاثیر مقادیر مختلف کود نیتروژنه قرار نگیرد (شکل ۱). طی شدن مراحل نمو فنولوژیک گیاه وابسته به سرعت نمو می‌باشد که خود تابعی از درجه حرارت محیط است (۳۱)، از این رو عدم تاثیر تیمارهای مختلف کاربرد کود اوره بر طول دوره روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه و شبیه سازی دور از ذهن نبود. در تمام تیمارهای به کار برده شده زمان گلدهی گندم در شرایط مزرعه ۱۸۲ روز پس از کاشت بود در حالی که

در شرایط شبیه سازی این مرحله، ۱۷۸ روز پس از کاشت تخمین زده شد. همچنین طول دوره روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه ۲۲۰ روز و مدل این مرحله را ۲۲۱ روز پس از کاشت شبیه سازی نمود. برای تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب حدود، ۳/۹۹، ۳/۹۲، ۳/۸۸ و ۳/۸۷ روز بود. میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب حدود، ۷/۹۳، ۷/۷۹، ۷/۷۰ و ۷/۷۰ درصد میانگین مشاهده شده بود. ضریب توافق و یلموت برای طول دوره نمو روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن حدود ۰/۹۹ بود.

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۸ درصد از تغییرات مشاهده شده مراحل نمو فنولوژیک گیاه را شبیه‌سازی کند (شکل ۱). بطور کلی نتایج شاخص‌های ارزیابی حاکی از دقت بسیار زیاد مدل CERES-Wheat در شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک گندم در شرایط کاربرد سطوح مختلف کود اوره داشت. در مدل‌های رشد گیاهان زراعی دقت شبیه سازی مراحل نمو فنولوژیک گیاه از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا تمام فرایندهای تولید مواد فتوسنتزی و تخصیص آنها بین اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین سایر فرایندهای رشدی گیاه تابعی از مراحل نمو است (۲۹). هندال و کور (۱۹) با استفاده از مدل CERES-Wheat مراحل فنولوژیک گندم را شبیه سازی کردند و بیان داشتند که مقادیر شبیه سازی شده روز تا گلدهی از ۹- تا ۶+ روز و مقادیر شبیه سازی شده برای روز تا رسیدگی فیزیولوژیک از ۶- تا ۳+ با داده‌های اندازه‌گیری شده اختلاف داشت.

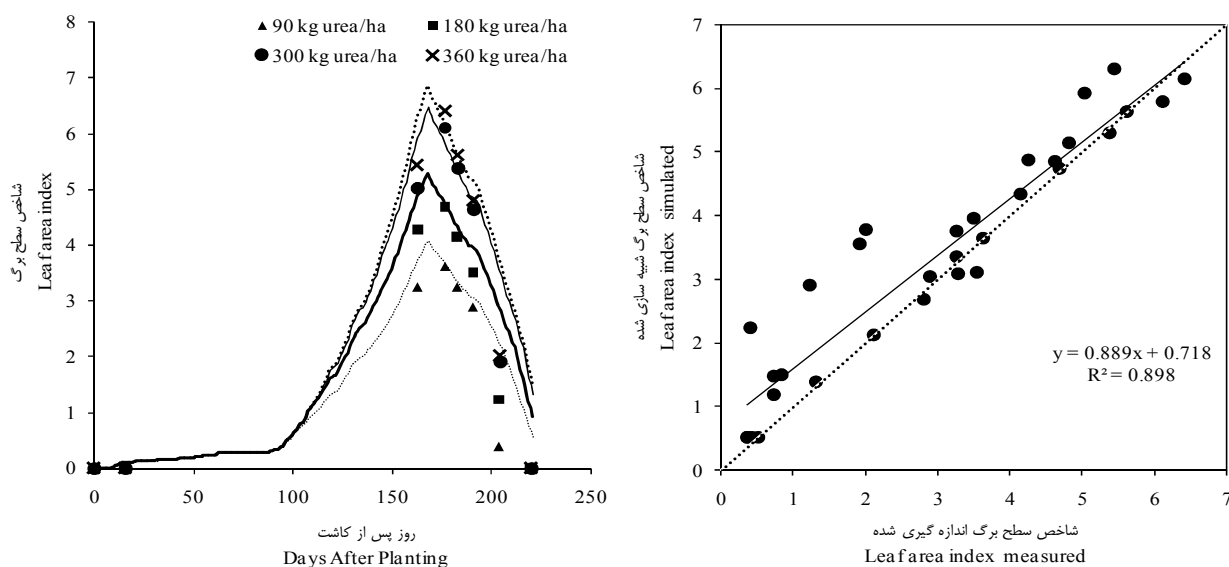
### شاخص سطح برگ

صرفنظر از نوع تیمار اعمال شده شاخص سطح برگ گندم دارای روند تقریباً مشابه‌ای بود (شکل ۲). هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه سازی‌ها در ابتدای فصل رشد روند افزایش شاخص سطح برگ به کندی طی شد و بعد از حدود ۱۰۵ روز پس از کاشت وارد مرحله رشد خطی گردید و در مرحله گلدهی به بیشترین مقدار خود رسید. پس از آن به دلیل پیری و ریزش برگ‌های پایین کانوپی در تمامی تیمارها شاخص سطح برگ روند نزولی پیدا کرد.



شکل ۱- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر مراحل نمو گندم، اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مراحل نمو گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 1- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of development stages and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat development stages in nitrogen fertilizer application treatments for model validation



شکل ۲- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر شاخص سطح برگ گندم، اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده شاخص سطح برگ گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 2- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat

بیشترین شاخص سطح برگ در شرایط مزرعه و شرایط شبیه سازی مربوط به تیمار ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب

معادل، ۶/۴ و ۶/۴۳ و کمترین آن در تیمار ۹۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب معادل، ۳/۶۲ و ۳/۸۲ مشاهده شد. بطور کلی در تیمارهای آزمایش طی دوره رشد گندم مقادیر شبیه سازی شده شاخص سطح برگ بیشتر از مقادیر مشاهده شده آن بود (شکل ۲). همچنین حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده شده صرفنظر از تیمارهای آزمایش در ۱۷۸ روز پس از کشت حادث شد این در حالی بود که مدل CERES-Wheat حداکثر شاخص سطح برگ را ۱۶۴ روز پس از کشت شبیه سازی کرد.

#### جدول ۴- نتایج واسنجی مدل برای شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم

Table 4- Validation results for leaf area index, total dry weight and grain yield of wheat

| کود اوره<br>(کیلوگرم در هکتار)<br>Nitrogen fertilizer (kg ha <sup>-1</sup> ) | شاخص سطح برگ<br>Leaf area index |       |      | وزن خشک کل<br>(کیلوگرم در هکتار)<br>Total Dry Weight (kg ha <sup>-1</sup> ) |       |      | عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار)<br>Grain Yield (kg ha <sup>-1</sup> ) |        |      |
|------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------------|-------|------|----------------------------------------------------------------------|--------|------|
|                                                                              | RMSE                            | NRMSE | d    | RMS E                                                                       | NRMSE | d    | RMS E                                                                | NRMS E | d    |
|                                                                              |                                 |       |      |                                                                             |       |      |                                                                      |        |      |
| 90                                                                           | 0.70                            | 33.71 | 0.92 | 361.48                                                                      | 6.59  | 0.99 | 304.13                                                               | 12.58  | 0.98 |
| 180                                                                          | 0.65                            | 23.29 | 0.95 | 546.76                                                                      | 7.83  | 0.97 | 491.36                                                               | 15.05  | 0.98 |
| 300                                                                          | 0.73                            | 21.46 | 0.97 | 456.00                                                                      | 5.60  | 0.99 | 626.93                                                               | 15.62  | 0.98 |
| 360                                                                          | 0.76                            | 20.98 | 0.97 | 721.79                                                                      | 8.47  | 0.94 | 488.95                                                               | 11.92  | 0.99 |

#### وزن خشک کل

نتایج این بررسی نشان داد که هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه سازیها صرفنظر از تیمارهای اعمال شده، تغییرات وزن خشک کل گندم در طی دوره رشد دارای روند تقریباً یکسانی بود (شکل ۳). بطوری که در ابتدای دوره رشد به دلیل کوچک بودن بوته‌ها تفاوت چندانی بین تیمارهای اعمال شده مشاهده نشد ولی از حدود ۱۰۵ روز پس از کاشت، وزن خشک کل وارد مرحله رشد خطی شده و به سرعت شروع به افزایش نمود و در حدود ۲۱۶ روز پس از کشت به حداکثر میزان خود رسید و سپس روند تقریباً ثابتی را در پیش گرفت. هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی با افزایش میزان کود اوره کاربردی وزن خشک کل گندم نیز افزایش یافت (شکل ۳). بیشترین وزن خشک کل اندازه‌گیری شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده توسط مدل در شرایط کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب به میزان، ۱۷۵۸۹ و ۱۷۰۱۴ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در شرایط کاربرد ۹۰ کیلوگرم کود اوره به ترتیب به میزان، ۱۰۹۵۸ و ۱۱۱۸۸ کیلوگرم در هکتار بود.

مقدار جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای شرایط کاربرد مقادیر ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۳۶۱/۴۸، ۵۴۶/۷۶، ۴۵۶/۰۰ و ۷۲۱/۷۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده برای شرایط کاربرد مقادیر ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار نیز به ترتیب، ۶/۵۹، ۷/۸۳، ۵/۶۰ و ۸/۴۷ درصد میانگین

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا حدود ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده شاخص سطح برگ را پیش‌بینی کند (شکل ۲). بطور کلی دقت مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ متوسط بود. از طرفی نتایج ارزیابی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گندم نشان داد که مدل در اکثر تیمارهای مورد بررسی میزان شاخص سطح برگ را در مراحل بعد از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بیشتر از داده‌های مزرعه تخمین زد (شکل ۲) که این موضوع باعث افزایش مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده و در نتیجه کاهش نسبی دقت مدل گردید. اروا و همکاران (۴) توانایی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گندم را ضعیف‌تر از توانایی آن در شبیه‌سازی عملکرد وزن خشک کل بیان کردند. اما بطور کلی برآیند نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد که مدل CERES-Maize از دقت نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن برخوردار بود. در مطالعه‌ای دیگر مقادیر جذر میانگین خطا و ضریب توافقی و یلموت در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Maize به ترتیب، ۱/۳۴ و ۰/۵۴ گزارش شد (۷).

رسیدگی فیزیولوژیک به حداکثر مقدار خود رسید (شکل ۴). کود نیتروژن منجر به بهبود عملکرد دانه گندم شد. این نتایج با داده‌های مشاهده شده در شرایط مزرعه همخوانی بسیار بالایی داشت. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۷۸۷۴ و ۷۰۴۸ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در تیمار ۹۰ کیلوگرم کود اوره به ترتیب، ۴۲۱۷ و ۴۰۰۶ کیلوگرم در هکتار بود. وانگ و همکاران (۴۴) در مطالعه‌ای روی گیاه گندم گزارش کردند با افزایش نیتروژن خاک سطح برگ توسعه یافت که این عامل باعث افزایش سرعت رشد محصول، افزایش شاخص سطح برگ و افزایش دوام شاخص سطح برگ گردید و در نهایت منجر به بهبود عملکرد دانه شد.

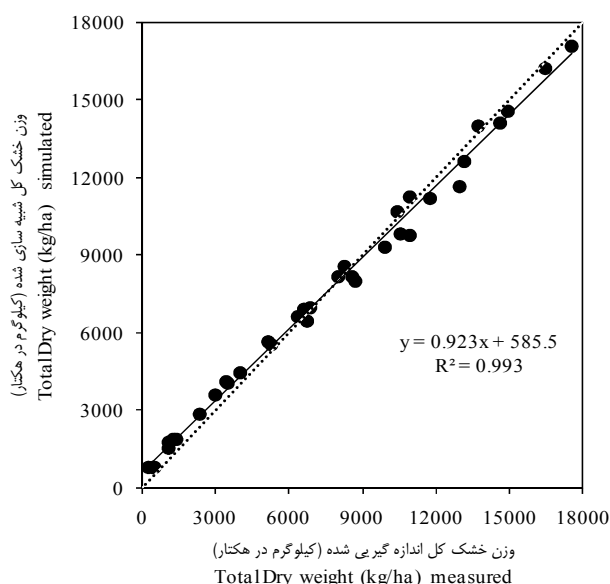
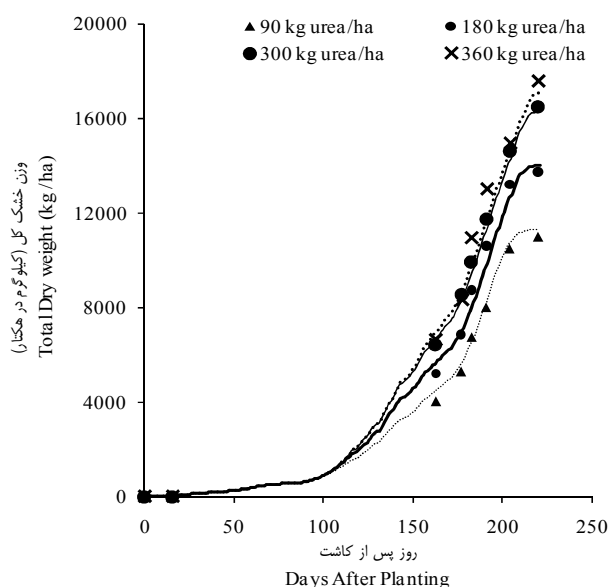
در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار مقدار جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه به ترتیب برابر ۳۰۴/۱۳، ۴۹۱/۳۶، ۶۲۶/۹۳ و ۴۸۸/۹۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب برابر ۱۲/۵۸، ۱۵/۰۵، ۱۵/۶۲ و ۱۱/۹۲ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. همچنین ضریب توافق ویلموت در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۹ و ۰/۹۹ بود که نشان از توانایی بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۴).

مشاهده‌ها بود. ضریب توافق ویلموت در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۰/۹۹، ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۴ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی وزن خشک کل گندم دارد (جدول ۴). همچنین نتایج برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۹ درصد تغییرات مشاهده شده وزن خشک کل را پیش‌بینی کند که نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی این صفت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن است (شکل ۴).

در مطالعه‌ای دیگر که توسط فرید و همکاران (۱۲) در فیصل آباد پاکستان انجام شده بود، میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل شبیه‌سازی شده گندم تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Wheat ۳۴۷/۸۱ تا ۸۷۳/۶۵ کیلوگرم در هکتار گزارش شد. علاوه‌براین، دقت مدل CERES-Maize در پیش‌بینی وزن خشک ذرت تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه توسط مندنی (۲۸) مورد قبول گزارش شد.

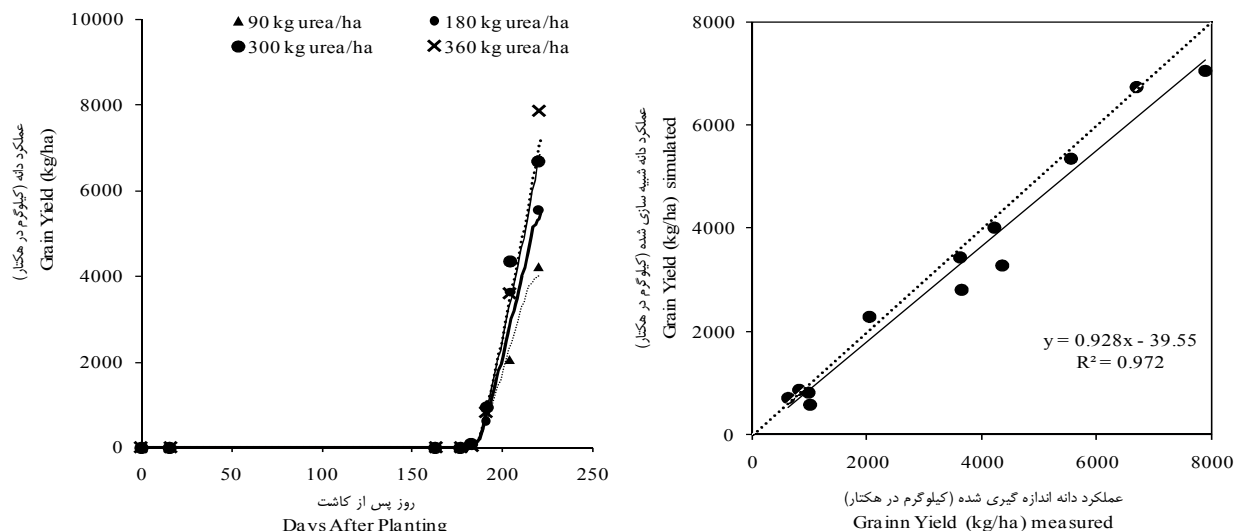
### عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد پس از شروع گلدهی در تمام تیمارها عملکرد دانه گندم با سرعت افزایش یافت و تا انتهای مرحله



شکل ۳- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر وزن خشک کل گندم، اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وزن خشک کل گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 3- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat total dry weight and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat total dry weight in nitrogen fertilizer application treatments for model validation



شکل ۴- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر عملکرد دانه گندم، اندازه گیری شده (نقاط) و شبیه سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده عملکرد دانه گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 1- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat grain yield and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat grain yield in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

خاک افزایش قابل توجهی داشت (شکل ۵). همچنین بخش دوم و سوم کود اوره به ترتیب در مرحله انتهای پنجه زنی و انتهای ساقه رفتن به خاک مزرعه اضافه گردید که منجر به افزایش یون های نیترات و آمونیم خاک شد (شکل ۵). بیشترین میزان یون نیترات خاک در شرایط تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۴۱/۳، ۵۴/۵، ۷۲/۱ و ۸۰/۹ کیلوگرم در هکتار بود که درست بعد از مرحله ۲ تا ۴ برگی گیاه ایجاد شد این در حالی بود که تقسیم کود اوره در مراحل بعد منجر به این میزان افزایش در محتوای یون های نیترات و آمونیم خاک نگردید (شکل ۵). به نظر می رسد با طی شدن مراحل رشد گیاه و توسعه هر چه بیشتر سیستم ریشه، جذب یون های نیترات و آمونیم توسط گیاه نیز افزایش یافت که این موضوع منجر به کاهش غلظت آن ها در خاک به ویژه در مراحل انتهای پنجه زنی و ساقه رفتن گندم در مقایسه با مرحله ۲ تا ۴ برگی شد (شکل ۴).

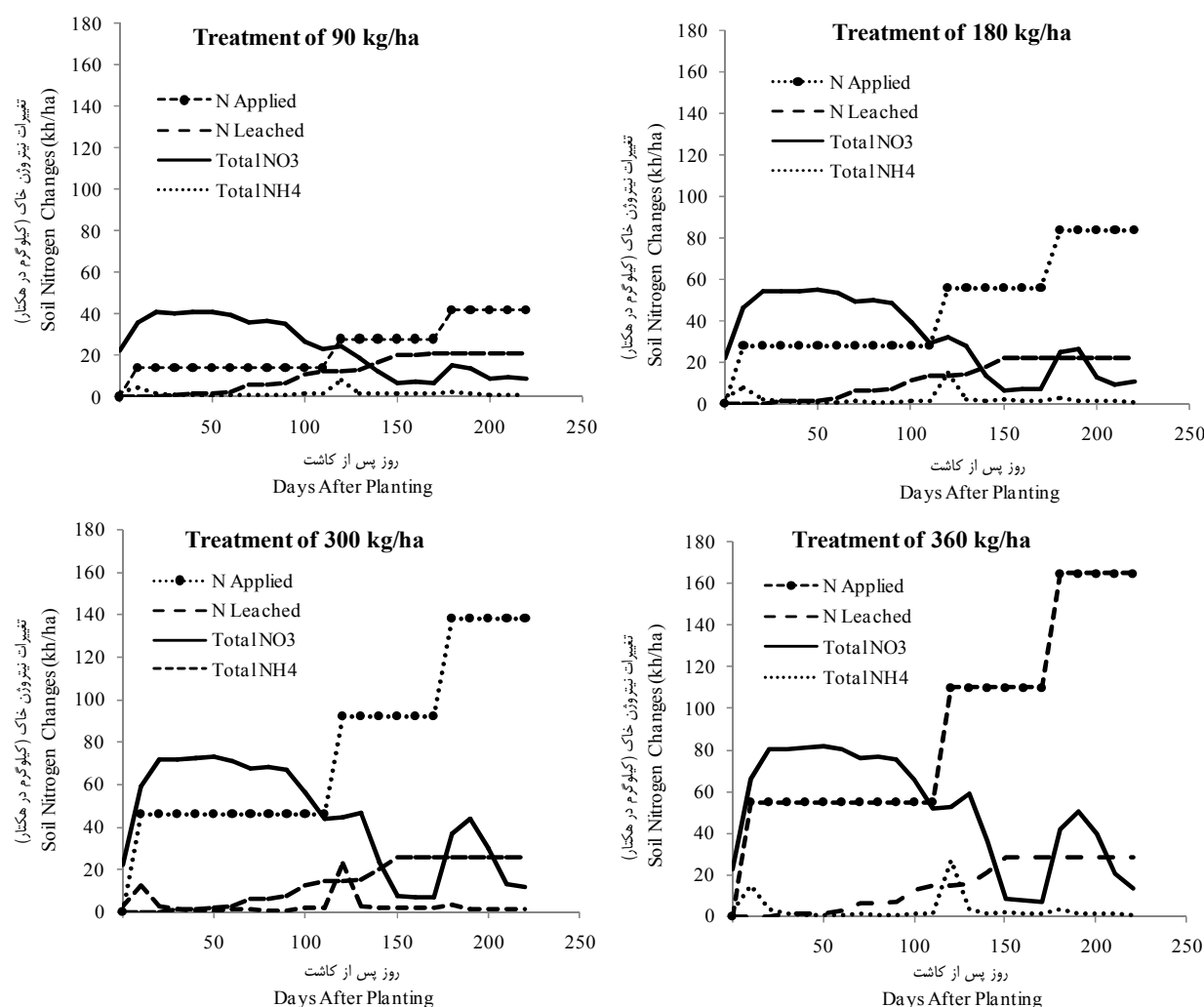
همانگونه که نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد پس از هر بار اضافه شدن کود اوره به خاک، ابتدا غلظت یون آمونیوم و پس از حدود ۱۰ الی ۱۴ روز غلظت یون نیترات به حداکثر میزان خود افزایش یافت. به نظر می رسد این موضوع به علت مدت زمان لازم برای انجام فعالیت نیتریفیکاسیون و تبدیل کود اوره به یون نیترات باشد. نتایج شبیه سازی ها همچنین نشان داد با افزایش سطح نیتروژن مصرفی، مقدار آبشویی نیتروژن نیز افزایش یافت (شکل ۵).

علاوه بر این، نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی داری وجود نداشت و مدل CERES-Wheat قادر بود تا بیش از ۹۷ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش بینی کند که نشان از توانایی بسیار خوب این مدل در شبیه سازی عملکرد دانه در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای پیش بینی عملکرد دانه گندم توسط مدل CERES-Wheat حدود ۴ تا ۵ گزارش شده است (۴۳). محققین دیگر نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای شبیه سازی عملکرد دانه گندم توسط مدل CERES-Wheat را مطلوب گزارش کردند (۵ و ۲۵).

### تغییرات نیتروژن خاک و گیاه

نتایج شبیه سازی ها نشان داد که صرف نظر از تیمارها، همزمان با کاربرد کود اوره در خاک محل اجرای آزمایش، محتوای یون های نیترات و آمونیم افزایش یافت (شکل ۵). در تمام کرت های آزمایشی در زمان کاشت، مقداری نیتروژن به شکل یون های نیترات و آمونیوم که احتمالاً حاصل از تجزیه بقایای گیاهی و یا باقی مانده کودهای نیتروژنه سال قبل بود، در خاک محل آزمایش وجود داشت (جدول ۱). همانگونه که در بخش مواد و روش ها اشاره شد اولین مرحله مصرف کود اوره در مرحله ۲ تا ۴ برگی گندم صورت گرفت که به دنبال آن نتایج شبیه سازی ها نشان داد که میزان یون های نیترات و آمونیوم در





شکل ۵- تغییرات میزان نیتروژن مصرف شده، آبشویی نیتروژن، کل نیترات و کل آمونیوم خاک طی فصل رشد گندم  
Figure 5- Changes in nitrogen applied, nitrogen leached, total NO3 and total NH4 during wheat growing season

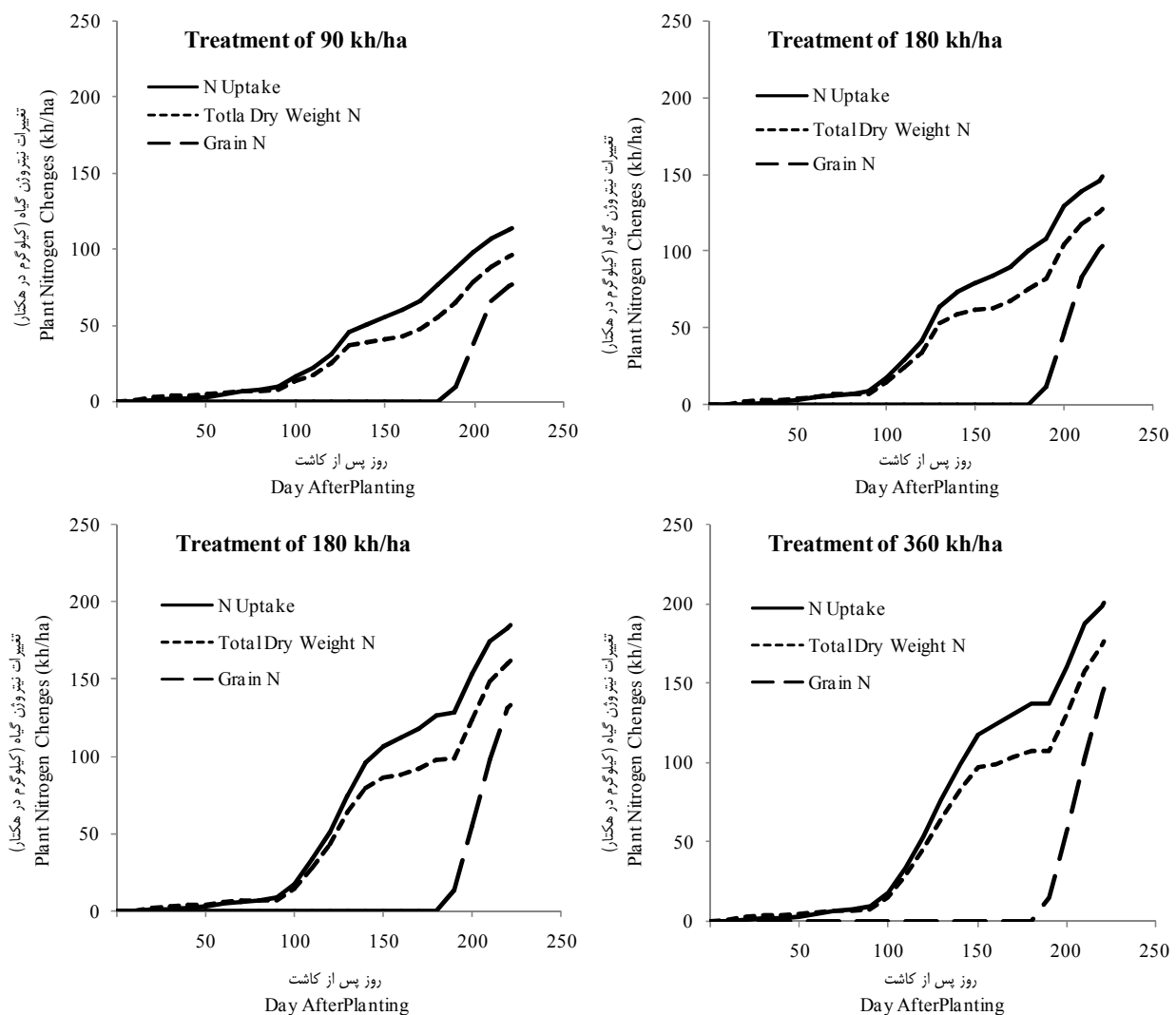
و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار در انتهای دوره رشد گیاه به ترتیب حدود ۱۷/۸، ۱۸/۹، ۲۱/۹ و ۲۳/۸ کیلوگرم در هکتار در روز بود (شکل ۴). همچنین نتایج شبیه سازی‌ها نشان داد که کل هدر رفت نیتروژن از طریق آبشویی یون نیترات در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۲۵۹/۳، ۲۷۶/۲، ۳۱۰/۴ و ۳۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار بود. سرنوشت نیتروژن در مجموعه گیاه- خاک بستگی به عوامل مختلفی از قبیل شرایط اقلیمی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، میزان کاربرد کود و همچنین مدیریت آبیاری دارد (۳۴). فانگ و همکاران (۱۱) نیز نشان دادند با افزایش میزان کاربرد کود نیتروژن غلظت یون نیترات در عمق یک متری خاک افزایش یافت در حالی که غلظت یون آمونیوم به وسیله میزان

با افزایش سطح کود اوره کاربردی تجمع بیشتری از یون نیترات در خاک حاصل می‌شود که با توجه به بار منفی نیترات، تحرک زیاد و عدم نگهداری آن توسط ذرات خاک، یون نیترات همراه با آب به لایه‌های پایین‌تر خاک حرکت و از منطقه توسعه ریشه خارج می‌شود که در نهایت باعث افزایش غلظت آن در زه‌آب می‌گردد (۲۶). عنصر نیتروژن زمانی که توسط گیاه جذب نشود در معرض هدر رفت از طریق نیترات زدایی، رواناب، تصعید و آبشویی قرار می‌گیرد. چنین هدر رفتی نگرانی درباره آلودگی آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد (۶). میزان آبشویی نیتروژن از مرحله گلدهی گندم به بعد به علت قطع رشد و توسعه ریشه و همچنین کاهش جذب عناصر غذایی از خاک افزایش یافت، بطوری که در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰

انتقال نیتروژن به دانه‌ها آغاز و تا انتهای دوره رشد گیاه ادامه یافت (شکل ۶). میزان نیتروژن جذب شده توسط دانه به میزان کاربرد کود اوره بستگی داشت، به طوری که در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۷۴/۸، ۹۹/۵، ۱۲۸/۲ و ۱۴۱/۸ کیلوگرم در هکتار بود. میزان انتقال نیتروژن به دانه در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۶۸/۵۶، ۷۰/۶۱، ۷۲/۸۴ و ۷۳/۷۷ درصد از کل نیتروژن جذب شده توسط گیاه بود. نیتروژن مورد نیاز برای رشد دانه در دوره زایشی از طریق انتقال مجدد این عنصر از اندام‌های رویشی و یا جذب مستقیم آن از خاک تامین می‌شود (۲۷).

کود تحت تاثیر قرار نگرفت. نواکوا و ناگل (۳۴) گزارش کردند که حرکت یون نیترات در یک خاک لومی رسی با هدایت الکتریکی پایین تحت تاثیر مقادیر متفاوت کود نیتروژن و آب آبیاری قرار گرفت، بطوریکه با افزایش میزان مصرف نیتروژن و آب آبیاری میزان آبشویی یون نیترات افزایش یافت.

نتایج شبیه سازی‌ها همچنین نشان داد با افزایش میزان کاربرد کود اوره میزان نیتروژن در اندام‌های هوایی گندم افزایش یافت (شکل ۶). در شرایط کاربرد کود اوره به میزان ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار میزان نیتروژن جذب شده در اندام‌های گیاهی در دوره رویشی به ترتیب برابر ۱۰۹/۱، ۱۴۰/۹، ۱۷۶ و ۱۹۲/۲ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین پس از گرده افشانی و همزمان با پر شدن دانه



شکل ۶- تغییرات میزان نیتروژن جذب شده توسط گندم و محتوی نیتروژن وزن خشک کل و دانه طی فصل رشد  
Figure 5- Changes in nitrogen uptake by wheat and amount of total dry weight and grain during growing season

### نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی مدل CERES-Wheat نشان داد که ضرایب ژنتیکی مورد نظر برای گندم رقم پیششار در شرایط اقلیمی کرمانشاه به‌خوبی توسط بخش محاسبه ضرایب زنتیکی بسته نرم افزاری DSSAT محاسبه شده بود. در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار (شرایط تامین مطلوب نیتروژن برای گندم در این آزمایش) نتایج واسنجی مدل و مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل می‌تواند مراحل نمو، شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم را به‌خوبی پیش بینی کند. نتایج ارزیابی‌های مدل نیز نشان داد که هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی با افزایش میزان کود اوره شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه افزایش یافت، اما طول دوره نمو گندم تحت تاثیر میزان کاربرد کود اوره قرار نگرفت. پایین‌ترین دقت ارزیابی در بین صفات مورد بررسی مربوط به شبیه‌سازی روند شاخص سطح برگ بود، در حالی‌که مدل CERES-Wheat توانست با دقت بالایی سایر صفات مورد بررسی را پیش‌بینی کند. نتایج شبیه‌سازی مدل همچنین بیانگر افزایش میزان آبشویی نیتروژن در اثر افزایش مصرف کود اوره کاربردی در شرایط مزرعه بود. با افزایش میزان نیتروژن در هر بار مصرف، محتوای یون‌های نترات و آمونیم خاک نیز افزایش یافت. بیشترین میزان افزایش در محتوای یون نترات در مراحل اولیه رشد و بعد از مصرف کود نیتروژن حادث گردید، این در حالی بود که در مراحل بعدی به‌علت فعالیت سیستم ریشه گیاه و جذب کارآمد نیتروژن توسط گندم، با اضافه شدن نیتروژن افزایش کمتری در میزان این یون‌ها در خاک محل آزمایش مشاهده شد. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که مدل CERES-Wheat توانست به‌خوبی میزان نیتروژن جذب شده، نیتروژن اندام‌های هوایی و نیتروژن دانه را شبیه‌سازی کند. مصرف بیش از حد کودهای نیتروژنه باعث آبشویی نترات و در نتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود که تهدید جدی برای سلامت انسان و محیط زیست محسوب شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن و چگونگی حرکت آن‌ها در خاک بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

در غلات زمستانه حدود ۷۵ تا ۹۰ درصد از کل نیتروژن دانه از طریق نیتروژن جذب شده توسط اندام‌های رویشی به ویژه برگ‌ها در مرحله قبل از گرده افشانی تامین می‌شود (۱۷). افزایش میزان پروتئین دانه در اثر مصرف نیتروژن می‌تواند به علت تثبیت نیتروژن در ساختارهای گیاه به خصوص اسید آمینه باشد (۳). درصد پروتئین در اثر افزایش مصرف نیتروژن هنگامی افزایش می‌یابد که نیتروژن مورد نیاز گیاه در خاک فراهم باشد (۳۸). کوکس و چمی (۸) نیز نشان دادند که مقدار نیتروژن در ذرت سیلویی با افزایش سطوح نیتروژن افزایش یافته است. افزایش میزان نیتروژن زیست توده در نتیجه افزایش مصرف کود نیتروژن توسط احمدی و همکاران (۳) نیز گزارش شده است.

کارایی جذب نیتروژن شبیه‌سازی شده در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۱۸/۹، ۱۸/۴، ۱۶/۸ و ۱۵/۸ درصد بود. کارایی تبدیل نیتروژن شبیه‌سازی شده نیز در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۳۵/۵، ۳۶/۵، ۳۶/۸ و ۳۵/۵ کیلوگرم دانه به کیلوگرم نیتروژن جذب شده بود. کارایی مصرف نیتروژن شبیه‌سازی شده در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۶/۷، ۶/۷، ۶/۲ و ۵/۶ کیلوگرم دانه به کیلوگرم نیتروژن قابل جذب خاک بود. نحوه جذب، کارایی مصرف و نحوه تخصیص نیتروژن در گیاهان می‌تواند تحت تاثیر عواملی همچون رطوبت و حاصلخیزی خاک قرار گیرد. همچنین افزایش کارایی جذب و استفاده از نیتروژن در تولید دانه نیازمند انجام موثر فرایندهای مربوط به جذب، انتقال، آسمیلاسیون و توزیع مجدد نیتروژن است. به نظر می‌رسد یکی از دلایل کاهش کارایی مصرف نیتروژن در مقادیر بالای کود نیتروژن فزونی سرعت از دست رفتن این عنصر از طریق آبشویی و تصعید و یا به علت عدم استفاده موثر از آن توسط گیاه باشد. حداکثر کارایی نیتروژن در شرایط حداقل کاربرد ممکن، در مرحله‌ای از نمو گیاه که جذب سریعتر انجام می‌شود، بدست می‌آید. در این صورت از رشد رویشی غیر ضروری که ممکن است خوابیدگی گیاه و کاهش عملکرد را در پی داشته باشد جلوگیری می‌شود. از آنجایی که در این حالت یک سیستم ریشه‌ای فعال برای جذب نیتروژن مصرف شده وجود دارد، هدر روی نیتروژن از طریق آبشویی، دنیتروفیکاسیون، تبخیر و رواناب کاهش می‌یابد (۳۰).

### منابع

- 1- Abeledo G.L., Savin R., and Slafer G.A. 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy*, 28: 541-550.
- 2- Akiyama H., Tsuruta H., and Watanabe T. 2000. N<sub>2</sub>O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere - Global Change Science*, 2: 313-320.
- 3- Ahmadi M., Mondani F., Khoramivafa M., Mohammadi G.R., and Shirkhani A. 2018. Evaluation of Nitrogen Uptake and Productivity of Maize Cultivars (*Zea mays* L.) under Kermanshah Climate Conditions. *Journal of Agroecology*,

- 10: 234-247. (In Persian with English Summary).
- 4- Arora V.K., Singh H., and Singh B. 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-Wheat model. *Agricultural water management*, 94: 22-30.
- 5- Bannayan M., Crout M.J., and Hoogenboom G. 2003. Application of the CERES-Wheat Model for Within-Season Prediction of Winter Wheat Yield in the United Kingdom. *Agronomy Journal*, 95: 114-125.
- 6- Blaylock A.D., Kaufmann J., and Dowbenko R.D., 2005. Nitrogen Fertilizer Technologies. Western Nutrient Management Conference. Salt Lake City, UT.
- 7- Chisanga C.B., Phiri E., Shepande C., and Sickingabula H., 2015. Evaluating CERES-Maize Model Using Planting Dates and Nitrogen Fertilizer in Zambia. *Journal of Agricultural Science*, 7: 79-97.
- 8-Cox, W.J., and Cherney, D.J. 2001. Row spacing, plant density and nitrogen effects on corn silage. *Agronomy Journal*, 93: 597- 607.
- 9- Delghandi M., Andarzian B., Broomandnasab S., Massah-Bovani A., and Javaheri E. 2014. Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-Wheat to Simulate Growth and Development, Yield and Phenology Stages of Wheat under Water Deficit Condition (Case Study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Soil*, 28: 82-91. (In Persian with English abstract).
- 10- Dettori M., Cesaraccio C., Motroni A., Spano D., and Duce P. 2011. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy, *Field Crop Research*. 120: 179-188.
- 11- Fang Q., Yu Q., Wang E., Chen, Y., Zhang G., Wang J., and Li, L. 2006. Soil nitrate accumulation and crop nitrogen use influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *Journal of Plant and Soil*, 284: 335-350.
- 12- Farid, H.U., Bakhsh A., Mahmood-Khan Z., Ahmad N., and Ahmad A., 2015. Calibration and Validation of CERES-Wheat (*Triticum aestivum*) Model for Simulating Fertilizer Application Rates in Management Zones. *Journal of Agricultural Science*, 7: 115-127.
- 13- Ghamari M., Andarzian B., Bakhshandeh A.M., Gharineh M.H., and Fathi G.H. 2011. Simulating Effects of Drought and Nitrogen Stress on Yield, Water and Nitrogen use Efficiency of Corn Using CERES-Maize Simulating Model. *Crop Physiology Journal*, 3: 21-31.
- 14- Gheysari M., Mirlatifi S.M., Homaei M., and Asadi M.E. 2007. Nitrate Nitrogen Leaching in a Corn Silage Field Fertigated Via a Sprinkler Irrigation System. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7: 101-108.
- 15- Guo R., Lin Z., Mo X., and Yang, C. 2010. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 97: 1185-1194.
- 16- Hassegawa R.H., Fonseca H., Luiz-Fancelli A., Da-Silva V.N., Schammas E.A., Reis T.A., and Correa, B. 2008. Influence of macro- and micronutrient fertilization on fungal contamination and fumonisin production in corn grains. *Food Control*, 19: 36-43.
- 17- Heitholt J.J., Croy L.I., Maness N.O., and Nguyen H.T. 1990. Nitrogen Partitioning in Genotypes of Winter Wheat Differing in Grain N Concentration. *Field Crops Research*, 23: 133-144.
- 18- Hoogenboom G., Jones J.W.P., Wilkens W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.I., White J.W., Uryasev O., Ogoshi R., Koo J., Shelia V., and Tsuji G.Y., 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
- 19- Hundal, S.S., and Kaur P. 1997. Application of the CERES-Wheat model to yield predictions in the irrigated plains of the Indian Punjab. *Journal of Agricultural Science*, 129: 13-18.
- 20- Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., and Ritchie J.T. 2003. DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
- 21- Kiani A., Koocheki A.R., Banaeyan M., and Nassiri-Mahalati M. 2003. CERES-Wheat Model Evaluation at two Different Climatic Location in Khorasan Province: I-Yield Prediction. *Biaban Journal* 8: 264-275. (In Persian with English abstract).
- 22- Lemon J. 2007. Nitrogen management for wheat protein and yield in the Esperance port zone. Department of Agriculture and Food. Bulletin. 4707: 1-27.
- 23- Liu H.L., Yang J.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., and Bai Y.L., et al., 2011. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. *Nutrient Cycling in Agro ecosystems*, 89: 313-328.
- 24- Malhi S.S., Grant C.A., Johnston A.M., and Gill, K.S., 2001. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil & Tillage Research*, 60: 101-122.
- 25- Mearns L.O., Rosenzweig C., and Goldberg R. 1992. Effect of changes in interannual climatic variability on CERES-wheat yields: sensitivity and  $2\times\text{CO}_2$  general circulation model studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62: 159-189.
- 26- Mehrab N., and Chorom M. 2014. Leaching of Nitrogen in the Presence of Zeolite Enriched with Ammoniumin

- Two Soil Textures under Wheat Cultivation. *Water and Soil Science*, 24: 159-170.
- 27- Mi G., Tang L., Zhang F., and Zhang J., 2000. Is nitrogen uptake after anthesis in wheat regulated by sink size? *Field Crops Research*, 68: 183-190.
- 28- Mondani F. 2018. Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea Maize*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition. *Journal of Water and Soil*. 31: 1665-1678. (In Persian with English abstract).
- 29- Mondani F., Nassiri-Mahallati M., Koocheki A., and Hajian-Shahri M. 2015. Simulation of wild oat (*Avena ludoviciana* L.) Competition on Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Growth and Yield. I: Model Description and Validation. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13: 218-231. (In Persian with English abstract).
- 30- Muurinen S., Kleemola J., and Peltonen-Sainio P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal*, 99: 441-447.
- 31- Nassiri Mahallati, M. 2000. Modeling Potential Crop Growth Processes: textbook with Exercises. Jahad-e-Daneshgahi of Mashhad Press. (In Persian).
- 32- Nassiri-Mahallati M., and Koocheki A. 2010. Agroecological zoning of wheat in Khorasan provinces: Estimating yield potential and yield gap. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7: 695-709. (In Persian with English abstract).
- 33- Noshadi M., and Mehrabi F. 2014. Measuring and Simulation of Nitrate Leachate Using LEACHN Model. *Journal of Water and Soil*, 28: 430-439. (In Persian with English abstract)
- 34- Novakova K., and Nagel D. 2009. The Influence of Irrigation on Nitrates Movement in Soil and Risk of Subsoil Contamination. *Soil & Water Research*, 4: 131-136.
- 35- Popova Z., and Kercheva M. 2005. CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning—calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 125–133.
- 36- Reynolds M.P., Hobbs P.R., and Braun H.J. 2007. Challenges to international wheat improvement. *Journal of Agricultural Science*, 145: 223-227.
- 37- Rinaldi M. 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Research*, 89: 27–37.
- 38- Sadeghi, H., and Bahrani, M.J. 2002. Effects of plant density and N rates on morphological characteristics and protein contents of corn. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 33: 403-412. (In Persian with English Summary).
- 39- Satorre E.H. and Slafer G.A. 1999. *Wheat Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Product Press, New York, P: 503.
- 40- Singh A.K., Tripathy R., and Chopra U.K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and Crop Syst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural water management*, 95: 776–78.
- 41- Stickse E., Maide F.X., Retzer F., and Fischeck G. 1999. Nitrogen uptake and utilization in winter wheat under different fertilization regimes, with particular reference to main stems and tiller. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 183: 47-52.
- 42- Timsina T, Singh U., Badaruddin M., Meisner C., and Amin M.R. 2001. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice–wheat sequences of Bangladesh. *Field Crop Research*, 72: 143-161.
- 43- Timsina J., and Humphreys E. 2006. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review. *Agricultural Systems*, 90: 5-31.
- 44- Wang D.J., Lin J.H., Sun R.J., Xia L.Z., and Lian, G. 2003. Optimum nitrogen rate for a high productive rice wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area. *Acta Pedologica Sinica*, 40: 426-432.
- 45- Weligama C., Sale P.W.G., Conyers M.K., Liu D.L., and Tang C. 2010. Nitrate leaching stimulates subsurface root growth of wheat and increases rhizosphere alkalisation in a highly acidic soil. *Plant Soil*, 328: 119–132.
- 46- Yang J.M., Yang J.Y., Liu S., and Hoogenboom G. 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127: 81-89.



## Simulation of Changes in Soil and Plant Nitrogen by CERES-Wheat Model

F. Mondani<sup>1\*</sup> - B. Gholami<sup>2</sup> - A.R. Bagheri<sup>3</sup> - Gh.R. Mohammadi<sup>4</sup>

Received: 31-01-2018

Accepted: 11-07-2018

**Introduction:** The DSSAT model is one of the most general and extensively used process-based crop growth simulation models. This model has been used worldwide to simulate crop biomass, yield, and soil nitrogen leaching under different management practices and various climatic conditions. Among management agronomic factors, nitrogen fertilizer has a major effect on crops production. However, nitrogen fertilizer limiting causes to decrease crops production, but, high application rates of nitrogen would lead to strong environmental consequences. Thus, management of nitrogen fertilizer consumption causes to decrease environmental pollution in the agroecosystems. Therefore, the objectives of the present study were: (1) determination of genetic coefficients and calibration of the CERES-Wheat model of DSSAT-CSM, (2) evaluation the performances of model for simulating wheat growth, development and grain yield and (3) simulation of changes of soil and plant nitrogen in different fertilizer nitrogen application rates under Kermanshah climate condition.

**Materials and Methods:** Two experiments were established based on the randomized complete block design with three replications during 2015-2016. The treatments were included 4 levels of nitrogen fertilizer application (90, 180, 300 and 360 kg ha<sup>-1</sup> urea). The required model inputs describe field management, daily weather condition, soil profile characteristics, and cultivar characteristics. The cultivar coefficients calibrated under optimum conditions (i.e., minimum stress in weather and nutrients). The genetic coefficients (P1V, P1D, P5, G1, G2, G3 and PHINT) of the Pishtaz wheat cultivar were derived using the GenCal software of DSSAT v 4.6 for 300 kg Urea ha<sup>-1</sup> treatment (optimum condition of nitrogen fertilizer based on the results of soil library). After model calibration process, the CERES-Wheat model validated by comparing simulated and measured values of wheat cultivars phenological development stages (DVS), leaf area index, total dry weight and grain yield for treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha<sup>-1</sup> fertilizer by root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE) and index of agreement (d) by results of an independent experiment from calibration experiment.

**Results and Discussion:** The results indicated that the coefficient P1V was 54.45 °C day, the coefficient P1D was set 90.75 days hr<sup>-1</sup>, the value for P5 was 720 °C day, the value for G1 was 25, the values for G2 was 30 mg day<sup>-1</sup>, the value for G3 2 g, and the PHINT was 95 °C day. The calibration results showed that the CERES-Wheat model was able to simulate growth, development stages and yield correctly, which indicate high accuracy in calculated genetic coefficients derived using the GenCal software of DSSAT v 4.6. In the simulated and measured conditions, leaf area index, total dry weight and grain yield improved by increasing of nitrogen fertilizer application. In the simulated and observed conditions, the highest grain yields were 7048 and 7874 kg ha<sup>-1</sup> in the treatment of 360 kg<sub>nitrogen</sub> ha<sup>-1</sup> and the lowest grain yields were 4006 and 4217 kg ha<sup>-1</sup> in the treatment of 90 kg<sub>nitrogen</sub> ha<sup>-1</sup>, respectively. The validation results also indicated that the CERES-Wheat model had high ability to predict growth, development stages and grain yield in the different fertilizer nitrogen application rates. So that, the RMSE for development stages were about 3 to 4 days and the nRMSE were about 7 to 8% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for development stages was about 0.99. The RMSE for total dry weight were about 360 to 720 kg ha<sup>-1</sup> and the nRMSE were about 5% to 9% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for total dry weight were about 0.94 to 0.99. The amount RMSE for grain yield were 304 to 630 kg ha<sup>-1</sup> and the nRMSE were 11% to 17% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for grain yield ranged from 0.98 to 0.99. The simulation result also indicated that amount of soil NO<sub>3</sub> and NH<sub>4</sub> increased with nitrogen fertilizer application. The highest soil NO<sub>3</sub> were 41.3, 54.5, 72.1 and 80.9 kg ha<sup>-1</sup> in the treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha<sup>-1</sup>, respectively. The amount of nitrogen

1, 2 and 4- Assistant Professor in Crop Ecology, MSc Student in Agroecology and Associate Professor in Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Assistant Professor in Weed Science, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

(\*-Corresponding Author Email: f.mondani@razi.ac.ir)

leaching increased with rising of nitrogen fertilizer. The nitrogen leaching were 259.3, 276.2, 310.4 and 335.5 kg ha<sup>-1</sup> in the treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha<sup>-1</sup>, respectively. The amount of nitrogen in the wheat biomass improved by increasing nitrogen fertilizer application.

**Conclusion:** The results indicated that the CERES-Wheat calibrated correctly that confirm calculated genetic coefficient for Pishtaz cultivar under Kermanshah climate conditions. The results of validation also showed that the CERES-Wheat model was able to simulate all studied traits wheat cultivars except leaf area index accurately in different fertilizer nitrogen application rates. Excessive nitrogen consumption led to nitrogen leaching and groundwater pollution. Therefore, it is important to know the distribution of various forms of nitrogen and how they move in the soil.

**Keyword:** Grain yield, Model calibration, Model validation, Nitrogen efficiency, Nitrogen leaching







## تاثیر بیوجار و کمپوست ضایعات هرس و تلقیح میکروبی بر فراهمی فسفر

میرحسین رسولی صدقیانی\* - رقیه واحدی<sup>۲</sup> - محسن برین<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶

### چکیده

فسفر از عناصر پرمصرف مورد نیاز گیاه می باشد که کمبود آن یکی از مشکلات خاک های آهکی است. به منظور بررسی تاثیر بیوجار و کمپوست ضایعات هرس درختان سیب و انگور و تلقیح میکروبی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز و فراهمی فسفر در ریزوسفر گندم، آزمایشی بصورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه ای در ریزوباکس اجرا گردید. فاکتورها شامل ماده آلی (بیوجار، کمپوست ضایعات هرس و شاهد بدون ماده آلی)، تلقیح میکروبی (قارچ میکوریزای آربوسکولار (AMF) و باکتری های ریزوسفری محرک رشد (PGPR) و خاک (خاک ریزوسفری و غیر ریزوسفری) بود. نتایج نشان داد که کاربرد همزمان کمپوست و تلقیح میکروبی باعث افزایش معنی دار فعالیت ACP، ALP و فسفر قابل جذب در خاک نسبت به تیمار بدون ماده آلی شد، بطوریکه بیشترین افزایش فعالیت ALP و مقدار فسفر قابل جذب مربوط به تیمار مشترک PGPR و کمپوست بود. همچنین در تیمار کمپوست، فعالیت ACP و ALP در خاک ریزوسفری به ترتیب ۱/۳۹ و ۱/۳۳ برابر خاک غیر ریزوسفری بود. با این وجود مقدار فسفر قابل جذب در خاک غیر ریزوسفری تیمار کمپوست ۲۱/۱۹ درصد بیشتر از خاک ریزوسفری بود. بیشترین غلظت فسفر در ریشه و اندام هوایی بترتیب در تیمارهای کمپوست تلقیح شده با میکوریزا و بیوجار تلقیح شده با میکوریزا مشاهده شد. همچنین، غلظت فسفر اندام هوایی در تیمار مشترک بیوجار و AMF ۱/۳۱ برابر غلظت فسفر در تیمار بیوجار و تلقیح PGPR بود. بطور کلی استفاده از ماده آلی و تلقیح میکروبی تاثیر قابل توجهی در فراهمی فسفر و بهبود رشد گیاه دارد.

**واژه های کلیدی:** ریزوسفر، فراهمی فسفر، مواد آلی، میکروارگانیسم

### مقدمه

بازگشت مقدار کم بقایای گیاهی به خاک، حاوی ماده آلی کمی است. این خاک ها اغلب آهکی می باشند و در نتیجه بسیاری از گیاهان در این خاک ها با مشکل تغذیه عناصر غذایی به ویژه فسفر روبه رو هستند. ضایعات هرس درختان با تبدیل شدن به بیوجار و کمپوست، با جایگزینی یا فراهم کردن عناصر غذایی در خاک، علاوه بر بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک نقش مهمی نیز در پویایی و زندگی میکروارگانیسم های خاک و ایجاد نوعی تعادل دینامیکی در بین اجزای زنده و غیر زنده خاک ایفا می کنند (۱۰). بیوجار ماده جامد غنی از کربن تولید شده توسط گرماکافت<sup>۵</sup> توده های زیستی با مقدار کمی اکسیژن یا بدون اکسیژن می باشد (۲۸). مقادیر نسبی و ویژگی بیوجار توسط شرایط گرما کافت مانند دما، مدت زمان، فشار و نوع ماده ای اولیه کنترل می شود (۴۶). تجزیه تدریجی مواد آلی (بیوجار و کمپوست) سبب افزایش راندمان عناصر غذایی و ماندگار شدن اثر این ترکیبات تا چندین سال بر عملکرد گیاهان و خصوصیات خاک می گردد (۱۸). همچنین کمپوست سازی به عنوان مؤثرترین روش

سالانه میلیون ها تن ضایعات هرس درختان در سطح کشور تولید می شود که می تواند در تامین ماده آلی سهیم باشد. استان آذربایجان غربی بیشترین باغات سیب و انگور را در کشور به خود اختصاص داده است. همچنین لزوم هرس سالیانه این باغات بیش از هزاران تن ضایعات لیگنو سلولزی تولید می کند. بنابراین یکی از راه های صحیح و عملی برای بهبود ماده آلی خاک، مدیریت استفاده از ضایعات هرس درختان میوه است که متأسفانه قسمت اعظم آن سوزانده و یا در جایی رها گردیده و از اینرو آلودگی محیط زیست را سبب می شود (۶). ماده آلی یکی از شاخص های مهم کیفیت خاک می باشد. ماده آلی نه تنها منبع بزرگی از عنصرهای غذایی است بلکه با تشدید فعالیت زیستی در خاک، به چرخش بهتر مواد غذایی کمک می کند (۵۴). خاک های مناطق خشک و نیمه خشک، به علت نبود پوشش گیاهی کافی و

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(\*)- نویسنده مسئول: (Email: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.67298

برای کنترل و مدیریت بقایای مواد آلی گزارش شده است (۴۱). کمپوست یک فرآورده حاصل از انجام فرآیندهای شیمیایی در ضایعات آلی است و حاوی عناصر سودمند بسیاری بوده که به تدریج و پیوسته در خاک آزاد و در دسترس گیاه قرار می‌گیرد (۸). همچنین پژوهشگران آنزیم‌های خاک را به عنوان شاخص‌های قابل استفاده برای حاصلخیزی و کیفیت خاک پیشنهاد کرده‌اند (۴۷). در این میان، فسفاتازها گروه وسیعی از آنزیم‌ها می‌باشند که از بین آن‌ها فسفاتاز اسیدی و قلیایی به علت اهمیتی که در معدنی شدن فسفر آلی خاک و تغذیه گیاهان دارند بیش از سایر گروه‌های فسفاتاز مورد توجه قرار گرفته‌اند. فسفاتازها در چرخه بیوژنوشیمی فسفر نقش مهمی ایفا می‌کنند. فسفاتاز آنزیمی است که از طریق هیدرولیز کردن منواسترهای اسید فسفریک و تبدیل آن‌ها به یون فسفات و مولکولی با یک گروه هیدروکسیل آزاد، گروه فسفات را از پیش ماده خود جدا می‌سازد و فسفات آزاد شده در خاک می‌تواند توسط گیاهان یا میکروارگانیسم‌ها جذب شود (۴۱). اینکه بیوچار قادر به تحریک و افزایش فعالیت‌های میکروبی و آنزیمی در خاک است نیز امری محتمل است (۱۴). از سوی، ماریناری و همکاران (۳۰) گزارش کردند که در پایان فرآیند تولید کمپوست، این فرآورده‌ها حاوی جمعیت زیادی از میکروارگانیسم‌ها هستند و بنابراین با مصرف کمپوست، علاوه بر افزایش مواد آلی و عناصر غذایی در خاک، موجودات زنده نیز وارد خاک می‌شوند. همچنین، مواد ساده و قابل دسترسی که کودهای آلی در اختیار قرار می‌دهند، باعث تحریک و افزایش فعالیت‌های میکروبی همچون فعالیت آنزیمی در خاک می‌گردد. اگرچه ریشه‌های گیاه در تولید فسفاتازها نقش دارند اما فسفاتازهای میکروبی (قارچ‌ها و باکتری‌ها) در هیدرولیز ترکیبات آلی خاک مؤثرتر هستند (۵۱). ترشح آنزیم فسفاتاز توسط قارچ‌های میکوریزی آربسکولار<sup>۱</sup> (AMF) و باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه<sup>۲</sup> (PGPR) گزارش شده است (۳۴).

اجزای ماده آلی اضافه شده به خاک با فسفر برای مکان‌های جذب رقابت می‌کند. در نتیجه فراهمی فسفر در خاک را افزایش می‌دهد. همچنین، برهمکنش‌هایی بین اکسیدهای آهن و آلومینیوم با مواد آلی مشاهده شده که بر کریستالی شدن این اکسیدها اثر بازدارندگی داشته و در نهایت موجب افزایش جذب فسفر می‌شود (۲۰). با این حال، گزارش‌های متناقضی پیرامون زیست فراهمی فسفر توسط بیوچار وجود دارد. لهما و همکاران (۲۶) افزایش زیست فراهمی فسفر در خاک اصلاح شده با بیوچار را گزارش کردند. در حالی که با توجه به حضور غلظت‌های بالایی از اکسیدهای عناصر قلیایی ( $\text{Ca}^{2+}$  و  $\text{Mg}^{2+}$ ) و غلظت کم  $\text{Al}^{+3}$  محلول در خاک (۴۸)، با افزودن

بیوچار به خاک قلیایی جذب فسفر افزایش یافته و فراهمی فسفر کاهش می‌یابد (۱۲). البته بیوچار حاوی مقادیر زیادی فسفر می‌باشد، بنابراین ممکن است بطور مستقیم با آزاد سازی فسفر منجر به افزایش فراهمی آن به‌ویژه برای کوتاه مدت گردد (۹). جذب مولکول‌های آلی (فنولوئیک اسیدها، اسیدهای آمینه، پروتئین‌ها و یاکربوهیدرات‌ها) بر روی سطح بیوچار می‌تواند توانایی آن‌ها را برای کلات با  $\text{Al}^{3+}$ ،  $\text{Fe}^{3+}$  و  $\text{Ca}^{+2}$  در خاک کاهش دهد (۵۵). آتکینسون و همکاران (۲) مشاهده کردند که بیوچار فراهمی فسفر خاک و جذب فسفر توسط گیاهان را بطور غیر مستقیم با تغییر محیط میکروارگانیسم‌ها تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از راهکارهای دیگر برای افزایش فراهمی فسفر استفاده از پتانسیل میکروارگانیسم‌های حل کننده فسفات<sup>۳</sup> می‌باشد. قارچ‌های AM از طریق مکانیسم‌های مختلفی حلالیت عناصر موجود در خاک به ویژه عناصر کم تحرک همانند فسفر را که در حالت عادی برای گیاه کمتر قابل جذب می‌باشند، افزایش داده و با گسترده کردن شبکه هیف‌های خود در خاک، سطح و سرعت جذب ریشه گیاه را افزایش می‌دهند (۳۱). همچنین باکتری‌های PGPR از طریق مکانیسم‌های مختلفی مانند تولید متابولیت‌های موثر در رشد گیاه همانند هورمون‌های گیاهی (اکسین، سیتوکینین، جبریلین)، تثبیت نیتروژن در ریزوسفر، افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول و کم محلول عناصر غذایی همانند فسفر و افزایش فراهمی آن‌ها از طریق تولید اسیدهای آلی و معدنی، تولید فسفاتازها، تولید سیدروفور و تنظیم تولید اتیلن در ریشه‌ها رشد گیاه را افزایش می‌دهند (۴۴). لیانگ و همکاران (۲۷) مشاهده کردند که قرار دادن ماده آلی در اطراف ریزوسفر یا خارج از ریزوسفر تاثیر قابل توجهی در فعالیت میکروبی در ریزوسفر و توده‌ی خاک در پی داشته است. در ریزوسفر تغییراتی مانند اسیدی شدن و افزایش مقدار ماده‌ی آلی در هر دو فاز جامد و محلول خاک، منجر به تغییر در فعالیت میکروبی می‌شود که باعث ایجاد تفاوت بین خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری می‌گردد. ویژگی‌های شیمیایی خاک بر رشد ریشه برای جذب عناصر غذایی بسیار تاثیر گذار می‌باشد. اما شرایط ریزوسفر و دامنه تغییراتی که توسط آن ایجاد می‌شود، تعیین کننده‌ی میزان جذب عناصر غذایی به وسیله ریشه می‌باشد. به طور کلی، ریشه گیاه با جذب یا آزاد سازی عنصر غذایی از محیط احاطه کننده ریشه منجر به تخلیه و یا تجمع و در نتیجه ایجاد تغییر در غلظت عناصری همانند فسفر در اطراف خود می‌شود. محدود کردن ریشه جهت بررسی تغییرات بیولوژیکی و شیمیایی و اینکه این خصوصیات در چه دامنه‌ای از ریزوسفر گسترش یافته‌اند از چالش‌هایی هستند که کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. رایزوباکس<sup>۴</sup> از جمله سیستم‌هایی است که برای مطالعه تغییرات ریزوسفر مورد استفاده قرار

3- Phosphate Solubilizing Microorganisms  
4- Rhizobox

1 - Arbuscular mycorrhizal fungi  
2- Plant growth promoting rhizobacteria

سانتی گراد انجام گردید. همچنین کمپوست آماده ضایعات هرس درختان سیب و انگور از گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه تهیه گردید. در نهایت بیوجار تولید شده و کمپوست ضایعات هرس آسیاب و از الک ۰/۵ میلیمتری عبور داده شد. pH و EC بیوجار در عصاره صاف شده سوسپانسیون ۱ به ۱۰ بیوجار به آب (۱)، فسفر کل بیوجار به روش هضم با اسید (۴۳)، نیتروژن و کربن بیوجار نیز به روش سوزاندن خشک با دستگاه ESC 4010 CHNSO Analyzer (۴۳) اندازه‌گیری گردید. Ph و EC کمپوست در عصاره صاف شده سوسپانسیون ۱ به ۵ کمپوست به آب، نیتروژن کل کمپوست به روش کج‌دال (۱۳)، فسفر کمپوست بعد از هضم خشک به روش آمونیم وانادات (۱۳) و کربن آن به روش والکی و بلاک (۳۷) اندازه‌گیری شد (جدول ۲).

#### آزمون گلخانه‌ای و آنالیز گیاه و خاک

این آزمایش بصورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل ماده آلی (بیوجار ضایعات هرس درختان سیب و انگور، کمپوست ضایعات هرس درختان سیب و انگور و شاهد بدون ماده آلی)، تلقیح میکروبی (قارچ AM، باکتری‌های PGPR) و خاک (خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری) بودند که در گلخانه تحقیقاتی گروه علوم خاک دانشگاه ارومیه اجرا گردید. به منظور کشت گیاه از رایزوباکس استفاده شد. باکس‌های ریزوسفری در ابعاد ۲۰×۱۵×۲۰ سانتی‌متر (طول، عرض و ارتفاع) استفاده شد (شکل ۱). فضای هر باکس با استفاده از صفحات مشبک نایلونی ۳۲۵ مش به دو قسمت: (۱) ناحیه ریزوسفری به ضخامت دو سانتی‌متر، (۲) ناحیه غیرریزوسفری به ضخامت ۵/۸ سانتی‌متر (این ناحیه در طرف دیگر ناحیه ریزوسفری نیز با همان ضخامت تکرار شد) تقسیم شد. برای انجام آزمایش گلخانه‌ای، بیوجار و کمپوست ضایعات هرس سیب و انگور هر کدام برحسب ۱/۵ درصد کربن آلی خالص به خاک (هر باکس شامل ۵/۸ کیلوگرم خاک، ۴۱/۱۹ گرم کمپوست در هر کیلوگرم خاک و ۲۲/۲۱ گرم بیوجار در هر کیلوگرم خاک) اضافه و مخلوط شدند و سپس به باکس‌ها منتقل گردیدند. در تیمارهای شاهد بدون ماده آلی نیز خاک استریل حاوی تلقیح میکروبی استفاده گردید. همچنین مقدار ۸۰ میلی‌گرم فسفر از منبع خاک فسفات به عنوان منابع نامحلول فسفر در هر کیلوگرم خاک استفاده شد. برای تلقیح میکروبی از سویه‌های میکروبی شامل سودوموناس‌های فلورسنت (ترکیبی از گونه‌های *P. aeruginosa*، *P. fluorescens* و *P. putida*) و قارچ میکوریزا گونه گلوموس (*G. fasciculatum*) استفاده گردید. برای کشت گیاه، بذره‌های گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم پیش‌تاز پس از ضدعفونی با هیپوکلریت سدیم به تعداد شش بذر در قسمت ریزوسفری رایزوباکس‌ها کشت گردیدند. پس از جوانه زدن بذرها، چهار گیاه (گیاهان سالم‌تر و قوی‌تر) نگه-

می‌گیرد. رایزوباکس با محدود کردن ریشه‌ها در حجم معینی از خاک، منجر به افزایش تراکم ریشه شده و نمونه‌برداری از خاک ریزوسفری را آسان می‌سازد. تاکنون درک کاملی از اثر متقابل میان ریشه گیاه، بیوجار، کمپوست ضایعات هرس درختان سیب و انگور و تلقیح میکروبی و تأثیر آنها بر فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی به دلیل وجود روابط پیچیده بین این ترکیبات در ریزوسفر گندم حاصل نشده است. همچنین پژوهش‌های کمی در این ارتباط در رایزوباکس انجام گرفته و با توجه به اینکه گندم یکی از محصولات مهم و استراتژیک کشور محسوب می‌شود. لذا هدف از این تحقیق، مطالعه تأثیر بیوجار و کمپوست حاصل از ضایعات هرس درختان سیب و انگور و تلقیح میکروبی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز و فراهمی فسفر در ریزوسفر گندم در شرایط رایزوباکس بود.

#### مواد و روش‌ها

##### انتخاب نمونه خاک و آماده سازی بستر کشت

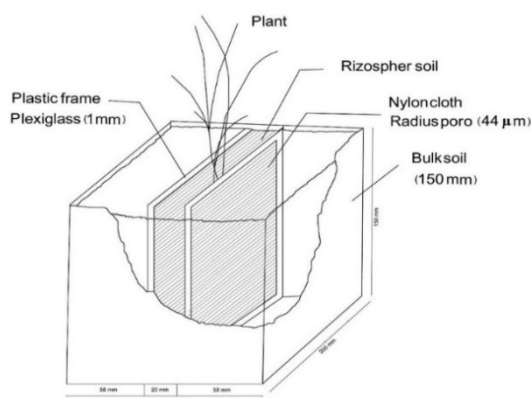
برای انجام این مطالعه، یک نمونه خاک با بافت سبک و مقدار فسفر قابل دسترس پایین از شهرستان سلماس واقع در استان آذربایجان غربی تهیه شد. نمونه خاک بعد از هوا خشک کردن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس در دستگاه اتوکلاو و با دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۵ اتمسفر به مدت دو ساعت استریل شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۷)، pH و EC در عصاره‌های صاف شده سوسپانسیون ۱ به ۵ خاک به آب با استفاده از pH متر و EC متر، ماده آلی به روش والکی و بلاک (۳۷)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون با سود (۵۲)، نیتروژن کل به روش کج‌دال (۵) و پتاسیم به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر (۷) اندازه‌گیری شدند. همچنین، فسفر قابل جذب به روش اولسن و با استفاده از محلول‌های کربنات سدیم ۰/۵ نرمال (pH=۸/۵) استخراج و به روش رنگ سنجی و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد (۳۵ و ۳۹) (جدول ۱).

##### تهیه بیوجار و کمپوست از ضایعات هرس درختان سیب و انگور

ضایعات هرس درختان سیب و انگور از باغات شهرستان ارومیه در استان آذربایجان غربی جمع‌آوری گردیدند. ضایعات هرس به قطعات ۲۰ میلی‌متری خرد و در آون در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. نمونه‌های خشک شده ابتدا به راکتور (استوانه فلزی به قطر ۷ و ارتفاع ۳۱ سانتی‌متر) و سپس به کوره الکتریکی برای تولید بیوجار منتقل گردیدند. تولید بیوجار در دمای ۳۵۰ درجه

آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی نیز به روش طباطبایی و برمنر (۴۹) در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری تعیین گردیدند. همچنین، فسفر قابل جذب به روش اولسن استخراج و به روش رنگ سنجی در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری اندازه‌گیری شد (۳۵ و ۳۹). تجزیه و تحلیل آماری شامل تجزیه واریانس و مقایسات میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد با نرم افزار MSTATC و رسم نمودارها با نرم افزار Excel انجام گردید.

داشته شدند. در طول دوره کشت از آب مقطر به منظور آبیاری و جهت تامین مواد غذایی مورد نیاز برای تغذیه گیاهان از محلول غذایی عاری از فسفر استفاده گردید. در پایان، پس از ۶۵ روز ریزوباکس‌ها باز شدند. از هر ریزوباکس دو نمونه خاک، یکی از بخش ریزوسفر و دیگری از بخش غیرریزوسفری برداشت شد. بخش هوایی و ریشه گیاه پس از شستشو با آب مقطر، به مدت ۴۸ ساعت در آون و در دمای ۶۵ درجه سانتیگراد خشک شدند. سپس، فسفر ریشه و اندام هوایی به روش هضم خشک عصاره‌گیری و از طریق رنگ آمیزی با روش آمونیم وانادات و آنتیمونی تارتارات (۱۳) تعیین شد.



شکل ۱- شماتیکی از سیستم ریزوباکس  
Figure 1- Schematic of the rhizobox system

متر) و کربن آلی بالا (۳۰/۰۲ درصد) بود. از مهم‌ترین مشخصه‌های کمپوست مصرفی فسفر قابل جذب بالا (۷/۵۴ درصد) بود.

## نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بستر مورد استفاده در کشت گلخانه‌ای و بیوپار و کمپوست ضایعات هرس به ترتیب در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. خاک مورد استفاده دارای بافت شنی لومی (رس/۱۶/۴، سیلت ۱۰ و شن ۸۵/۸۴ درصد) بوده که دارای فسفر قابل دسترس پایین (۷/۶۴ میلی گرم بر کیلوگرم)، کربن آلی کم (۰/۲۵ درصد)، ۱۴/۲۵ درصد کربنات کلسیم معادل، غیر شور و با pH خنثی تا قلیایی ضعیف بود. تجزیه بیوپار و کمپوست حاصل از ضایعات سیب و انگور نشان داد که بیوپار ضایعات هرس درختان دارای pH حدود خنثی (۷/۲۹)، هدایت الکتریکی بسیار پایین (۰/۰۸ دسی‌زیمنس بر متر)، مقدار کربن آلی ۶۷/۵۴ درصد و مقدار فسفر کل ۲۷۴۸/۰۷ میلی گرم در کیلوگرم بود. کمپوست ضایعات هرس نیز دارای pH خنثی تا قلیایی ضعیف (۷/۰۵)، هدایت الکتریکی بالا (۱۷/۸۷ دسی‌زیمنس بر

## فعالیت فسفاتاز اسیدی و قلیایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی ماده آلی و خاک بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی ( $p < 0/001$ ) و نیز اثر اصلی تلقیح میکروبی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی ( $p < 0/001$ ) معنی‌دار بود. همچنین اثرات متقابل (ماده آلی  $\times$  تلقیح میکروبی و ماده آلی  $\times$  خاک) نیز بر میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی ( $p < 0/05$ ) و قلیایی ( $p < 0/001$ ) و قلیایی ( $p < 0/001$ ) معنی‌دار بود. در ارتباط با میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی ( $p < 0/001$ ) نتایج نشانگر معنی‌دار بودن اثر متقابل تلقیح میکروبی و خاک بر مقدار این شاخص بود.

جدول ۱- نتایج برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

| Table 1- Results of some physical and chemical properties of the studied soil |      |      |                   |      |                    |      |                          |
|-------------------------------------------------------------------------------|------|------|-------------------|------|--------------------|------|--------------------------|
| K                                                                             | P    | N    | CaCO <sub>3</sub> | O.C  | EC                 | pH   | بافت خاک<br>soil texture |
| mg kg <sup>-1</sup>                                                           |      |      | %                 |      | ds m <sup>-1</sup> |      |                          |
| 98                                                                            | 7.64 | 0.08 | 14.25             | 0.25 | 0.47               | 7.53 | Lomy Sand                |

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های بیوجار و کمپوست حاصل از ضایعات هرس درختان سیب و انگور  
Table 2- Some characteristics of trees pruning waste compost and biochar of apple and grape

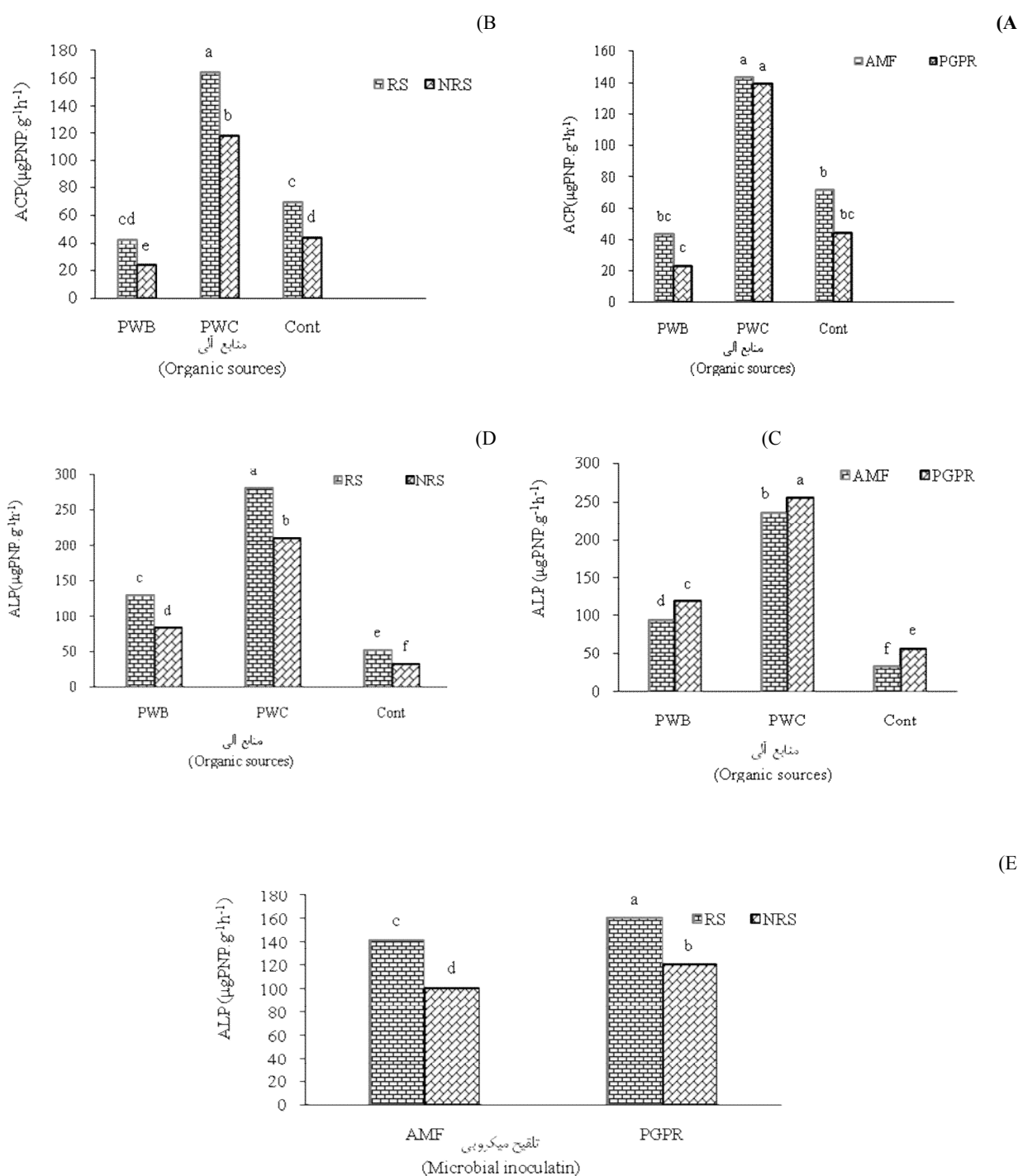
| کمپوست ضایعات هرس<br>سیب و انگور<br>Pruning waste compost<br>(apple and grape) | بیوجار ضایعات هرس<br>Pruning waste biochar | واحد<br>Unit        | ویژگی‌ها<br>Characteristics |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| سیب و انگور<br>Apple and grape                                                 |                                            |                     |                             |
| 7.05                                                                           | 7.29                                       |                     | pH                          |
| 17.87                                                                          | 0.08                                       | dS m <sup>-1</sup>  | EC                          |
| 3.72                                                                           | 0.54                                       | %                   | N                           |
| 30.02                                                                          | 67.53                                      | %                   | C                           |
| -                                                                              | 2748.07                                    | mg kg <sup>-1</sup> | P (Total)                   |
| 7.54                                                                           | -                                          | %                   | P (available)               |

بیوجار و شاهد در هر دو خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری نشان دادند (شکل ۲-D). همچنین، تلقیح باکتریایی نسبت به تلقیح میکوریزایی در افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی کارا تر بود و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در شرایط تلقیح باکتریایی، در خاک ریزوسفری ۱/۳۳ برابر بیشتر از فعالیت این آنزیم در خاک غیرریزوسفری بود (شکل ۲-E).

افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز قلیایی خاک در تیمارهای کمپوست و بیوجار ضایعات هرس افزوده شده نسبت به شاهد را احتمالا می‌توان به افزایش زیست‌توده میکروبی در پاسخ به ماده آلی افزوده شده، عناصر غذایی خاک و بهبود خصوصیات خاک (فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی) نظیر ظرفیت نگهداشت مواد غذایی و آب نسبت داد. همچنین عملکرد بهتر کمپوست در افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در مقایسه با بیوجار احتمالا نشان‌دهنده تجزیه بالای کمپوست ضایعات هرس و نیتروژن کافی در ترکیب آن و در نتیجه تحریک بیشتر فعالیت میکروبی بود. حضور مواد غذایی که به راحتی قابل تجزیه هستند و نیتروژن که به راحتی در ترکیب پسماند قابل جذب می‌باشد، موجب افزایش فعالیت این آنزیم می‌گردد (۲۴). رنلا و همکاران (۴۵) با افزودن پسماند گیاه چاودار به ۳ نوع خاک اسیدی، خنثی و قلیایی مشاهده کردند که فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در خاک قلیایی تیمار شده با پسماند گیاهی تا ۱۵ برابر افزایش یافت.

جین و همکاران (۲۱) گزارش کردند که فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی پس از افزودن بیوجار کود دامی کاهش یافت در حالی که فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی افزایش نشان داد. کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی با افزودن بیوجار به خاک دور از انتظار نبود چرا که خاک مورد مطالعه با pH قلیایی و شرایط آهکی و بیوجار ضایعات هرس با pH قلیایی برای فعالیت این آنزیم مناسب نبود.

بطور کلی تلقیح میکوریزا در همه تیمارها نسبت به تلقیح باکتریایی تأثیر بیشتری بر میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی داشت هر چند که این تفاوت معنی‌دار نبود. تیمار مشترک کمپوست و تلقیح میکروبی بیشترین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی را به خود اختصاص داد بطوریکه تلقیح میکوریزایی این تیمار منجر به افزایش ۲ برابری در مقایسه با تیمار تلفیقی شاهد و تلقیح میکوریزایی شد. کمترین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی مربوط به تیمار مشترک بیوجار و تلقیح میکوریزا بود که تفاوت معنی‌داری با تیمار بیوجار و تلقیح باکتریایی و نیز شاهد و تلقیح میکوریزا نداشت (شکل ۲-A). اثر خاک ریزوسفری بر میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در مقایسه با خاک غیرریزوسفری معنی‌دار بود (شکل ۲-B). کاربرد کمپوست ضایعات هرس منجر به افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفری و غیر ریزوسفری شد به نحوی که فعالیت این آنزیم در خاک ریزوسفر ۱/۳۹ برابر بیشتر از خاک غیرریزوسفری بود. اما بیوجار ضایعات هرس سبب کاهش فعالیت این آنزیم شد (شکل ۲-B). مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمارهای آلی در هر دو نوع تلقیح میکروبی نسبت به تیمار شاهد دارای میانگین بالاتری بود. بالاترین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در تیمار مشترک کمپوست و تلقیح باکتریایی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تلقیح میکوریزایی داشت و افزایش ۴/۴۸ برابری را نسبت به تیمار تلفیقی شاهد و تلقیح باکتریایی نشان داد (شکل ۲-C). تیمارهای آلی به‌طور معنی‌داری میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی را در هر دو خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری نسبت به تیمار شاهد افزایش دادند (شکل ۲-D). بر اساس نتایج، در شرایط استفاده از کمپوست ضایعات هرس، فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در ریزوسفر ۱/۳۳ برابر خاک غیرریزوسفر بود و هر دو خاک در شرایط استفاده از کمپوست ضایعات هرس تفاوت معنی‌داری را با تیمارهای



شکل ۲- مقایسه میانگین منابع آلی و تلقیح میکروبی، منابع آلی و خاک بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی  
Figure 2- Mean comparison of the organic sources and microbial inoculation and, the organic sources and soil on the activity of acid and alkaline phosphatase enzymes

ACP, ALP, Cont, PWB, PWC, AMF, PGPR, RS و NRS به ترتیب آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی، شاهد بدون ماده آلی، بیوجار ضایعات هرس، کمپوست ضایعات هرس، قارچ میکوریزا آربوسکولار، باکتری‌های محرک رشد، خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری هستند.  
ACP, ALP, Cont, PWB, PWC, AMF, PGPR, RS and NRS are acid and alkaline phosphatase enzymes, control (without organic matter), pruning waste biochar, pruning waste compost, arbuscular mycorrhizal fungi, plant growth promoting rhizobacteria, rhizosphere soil and non-rhizosphere soil, respectively.

شاهد در هر دو سطح خاک شد. کمپوست ضایعات هرس مقدار فسفر را در خاک غیر ریزوسفری نسبت به خاک ریزوسفر ۲۱/۱۹ درصد افزایش داد (جدول ۴). تیمارهای میکروبی در هر دو سطح تلقیح باکتریایی و میکوریزایی مقدار فسفر خاک را در خاک غیر ریزوسفری نسبت به خاک ریزوسفری بطور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۵). بیشترین مقدار فسفر در خاک غیرریزوسفری تیمار باکتریایی اندازه‌گیری شد (۵۴/۹۹ میلی گرم بر کیلوگرم) که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با خاک غیرریزوسفری تیمار تلقیح میکوریزایی نداشت و کمترین مقدار فسفر نیز در خاک ریزوسفری تیمار میکوریزایی (۳۸/۹۴ میلی گرم بر کیلوگرم) اندازه‌گیری شد که به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری را با خاک ریزوسفری تیمار باکتریایی نشان داد (جدول ۵).

نتایج نشان دادند که غلظت فسفر ریشه و اندام هوایی تحت تاثیر تلقیح میکروبی به همراه مواد آلی قرار گرفت ( $p < 0.001$ ). تلقیح میکروبی غلظت فسفر ریشه را در تمامی تیمارهای آلی نسبت به تیمار شاهد بطور معنی‌داری افزایش داد. البته قارچ‌های میکوریزا در افزایش غلظت فسفر در ریشه فعال‌تر عمل کردند (شکل ۳-A). بیشترین غلظت فسفر در ریشه مربوط به تیمار تلقیحی کمپوست و تلقیح میکوریزا بود که این مقدار ۱/۸۳ برابر تیمار شاهد و تلقیح میکوریزا بود و اختلاف آماری معنی‌داری با سایر تیمارها داشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که همانند ریشه، تلقیح میکروبی غلظت فسفر بخش هوایی را هم در تیمارهای آلی نسبت به تیمار شاهد افزایش داد و تلقیح میکوریزا در افزایش غلظت فسفر در بخش هوایی فعال‌تر بود (شکل ۳-B). بیشترین غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه در تیمار بیوجار تلقیح میکوریزی بود که ۱/۳۱ برابر بیشتر از تلقیح باکتریایی بود و به لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری با این تیمار و نیز با تیمارهای کمپوست و شاهد در هر دو نوع تلقیح داشت.

در این راستا، خلیل و همکاران (۲۲) گزارش کردند که افزودن کمپوست با باکتری‌های PGPR به خاک منجر به افزایش فسفر قابل استفاده در خاک مورد مطالعه آن‌ها گردید. افزودن مواد کمپوست شده منجر به تحریک باکتری‌های مسئول معدنی کردن فسفر آلی و باکتری‌های حل‌کننده فسفر معدنی و افزودن بیوجار سبب تحریک قارچ‌های میکوریزایی می‌شود که برای چرخه عناصر غذایی به ویژه فسفر بسیار مهم هستند (۲۵). افزایش بیشتر مقدار فسفر قابل استفاده در خاک غیرریزوسفری در تیمار کمپوست نسبت به سایر تیمارها احتمالاً به علت بالا بودن فسفر کمپوست مصرفی بود. فتحی‌گرد لیدانی و همکاران (۱۵) با بررسی تاثیر کمپوست قارچ مصرفی و بیوجار باگاس نیشکر بر قابلیت استفاده و جزء بندی فسفر در خاک آهکی مشاهده کردند که مقدار فسفر قابل استفاده در کمپوست قارچ مصرفی بیشتر از بیوجار بود.

بر اساس مطالعات انجام شده خاکستر بیوجار حاوی کاتیون‌های بازی بوده و منجر به افزایش pH خاک می‌شود (۵۶). افزایش pH خاک بدلیل افزودن بیوجار به خاک باعث افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در خاک می‌شود (۱۱). افزایش فعالیت فسفاتاز قلیایی در خاک ریزوسفری نسبت به خاک غیرریزوسفری را می‌توان ناشی از فعالیت میکروبی و ریشه‌ای گیاه دانست (۵۱). در این راستا، ماکوی و همکاران (۲۹) فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی در ریزوسفر بیشتر از غیرریزوسفر گزارش کردند. بالا بودن فعالیت فسفاتاز قلیایی در تیمار تلقیح PGPR نسبت به قارچ AMF ممکن است بدلیل شرایط محیط رشد باشد به عنوان مثال فسفاتاز اسیدی بیشتر توسط قارچ‌ها ترشح شده و pH مطلوب برای این آنزیم شرایط اسیدی تا خنثی بوده و فسفاتاز قلیایی بیشتر توسط باکتری‌ها ترشح شده و در  $pH > 7$  فعالیت بالاتری دارد. سرعت میکروارگانیزم‌ها در سنتز و آزادسازی فسفاتازها به pH خاک مرتبط است (۵۰). بررسی نتایج مطالعه حاضر نشان داد که مقدار کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در خاک ریزوسفری تیمار بیوجار کمتر از خاک غیرریزوسفری است. بنابراین محیط ریزوسفر اثر اصلاح‌کننده بر اثر منفی بیوجار بر فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی داشته است. بالیک و همکاران (۳) با مطالعه تاثیر کود آلی بر فعالیت‌های آنزیم‌های فسفاتاز در ریزوسفر گیاهان با استفاده از ریزوباکس گزارش کردند که فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی بطور معنی‌داری نسبت به توده خاک افزایش یافت.

#### فراهمی فسفر در خاک و تاثیر آن بر غلظت فسفر در گیاه

فراهمی فسفر در خاک بطور معنی‌داری تحت تاثیر منابع آلی ( $p < 0.001$ )، تلقیح میکروبی ( $p < 0.001$ ) و خاک ( $p < 0.001$ ) قرار گرفت. همچنین اثرات متقابل این فاکتورها نیز بر مقدار فسفر قابل جذب خاک معنی‌دار ( $p < 0.001$ ) بود. بر اساس مقایسه میانگین اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر مقدار فسفر قابل استفاده خاک، اثر تیمارهای منابع آلی در هر دو سطح تلقیح میکروبی بر مقدار فسفر قابل جذب، نسبت به تیمار شاهد معنی‌دار بود. نتایج نشان دادند که تیمارهای مشترک کمپوست و تلقیح با باکتری‌های PGPR و نیز بیوجار و تلقیح میکوریزایی در افزایش زیست فراهمی فسفر خاک موثر بودند (جدول ۳). مقدار فسفر در تلقیح باکتریایی تیمار کمپوست نسبت به تیمار تلقیحی شاهد و تلقیح باکتریایی ۱۰/۷۳ برابر افزایش نشان داد (جدول ۳). در تیمار بیوجار نیز افزایش مقدار فسفر با تلقیح میکروبی وجود داشت که در تلقیح میکوریزایی بیشتر از تلقیح باکتریایی بود. بطور کلی مقدار فسفر در خاک غیرریزوسفری تمامی تیمارها در مقایسه با خاک ریزوسفری بالاتر بود (جدول ۴ و ۵). حضور ماده آلی بالاخص کمپوست در خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری منجر به افزایش معنی‌دار مقدار فسفر نسبت به تیمار

استقرار در منطقه ریزوسفر از ترشحات ریشه استفاده نموده و با تغییر pH یا ترشح آنزیم‌ها، شرایط را برای تبدیل فسفر نامحلول به شکل قابل استفاده فراهم می‌سازند. از طرفی، قارچ میکوریزی آربوسکولار در حالی که به درون پوست ریشه گیاه نفوذ می‌کند از گیاه میزبان خود کربن دریافت می‌کند و در مقابل فسفر و سایر عناصر معدنی را به وسیله هیف‌های گسترده خود در خاک جذب و در اختیار گیاه قرار می‌دهد (۲۳).

مابلا و وارمن (۲۳) گزارش کردند که کاربرد کمپوست زباله شهری در یک مزرعه سیب زمینی منجر به افزایش معنی‌دار فسفر کل خاک گردید. همچنین آن‌ها بیان کردند که کاربرد کمپوست می‌تواند به اندازه کودهای شیمیایی در افزایش فسفر قابل جذب خاک موثر باشد. آن‌ها دلیل احتمالی این امر را افزایش فعالیت میکروبی پس از کاربرد کمپوست و در نتیجه آزاد سازی فسفر در طول معدنی شدن مواد آلی ذکر کردند. میکروارگانیسم‌های حل‌کننده فسفات با

جدول ۳- مقایسه میانگین برهمکنش منابع آلی و تلقیح میکروبی بر میزان فسفر خاک

Table 3- Mean comparisons of the organic sources and microbial inoculation interaction on soil phosphorus content

| مقدار فسفر قابل استفاده خاک<br>Content of available phosphorus (mg.kg <sup>-1</sup> ) |                    |                    |                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| PWC                                                                                   | PWB                | Cont               | تلقیح میکروبی (Microbial inoculation) |
| 87.53 <sup>b</sup>                                                                    | 38.80 <sup>c</sup> | 12.25 <sup>e</sup> | AMF                                   |
| 108.72 <sup>a</sup>                                                                   | 29.77 <sup>d</sup> | 10.13 <sup>e</sup> | PGPR                                  |
|                                                                                       | 4.90               |                    | LSD <sub>0.05</sub>                   |

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمالی ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at 5% probability level according to Duncan test.

Cont, PWB, PWC, AMF, PGPR به ترتیب شاهد بدون ماده آلی، بیوجار ضایعات هرس، کمپوست ضایعات هرس، قارچ میکوریزا آربوسکولار و باکتری‌های محرک رشد هستند.

Cont, PWB, PWC, AMF, PGPR are control (without organic matter), pruning waste biochar, pruning waste compost, arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth, promoting rhizobacteria, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین برهمکنش منابع آلی و خاک بر میزان فسفر خاک

Table 4- Mean comparisons of the organic sources and soil interaction on soil phosphorus content

| مقدار فسفر قابل استفاده خاک<br>Content of available phosphorus (mg.kg <sup>-1</sup> ) |                    |                    |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| PWC                                                                                   | PWB                | Cont               | خاک (Soil)          |
| 88.70 <sup>b</sup>                                                                    | 26.04 <sup>d</sup> | 9.80 <sup>e</sup>  | RS                  |
| 107.50 <sup>a</sup>                                                                   | 42.53 <sup>c</sup> | 12.58 <sup>e</sup> | NRS                 |
|                                                                                       | 4.90               |                    | LSD <sub>0.05</sub> |

میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمالی ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at 5% probability level according to Duncan test.

Cont, PWB, PWC, RS, NRS به ترتیب شاهد بدون ماده آلی، بیوجار، کمپوست ضایعات هرس، خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری هستند.

Cont, PWB, PWC, RS, NRS are control (without organic matter), pruning waste biochar, pruning waste compost, rhizosphere soil and non-rhizosphere soil, respectively.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش تلقیح میکروبی و خاک بر میزان فسفر خاک

Table 5- Mean comparisons of the microbial inoculation and soil interaction on phosphorus soil content

| مقدار فسفر قابل استفاده خاک<br>Content of available phosphorus (mg.kg <sup>-1</sup> ) |                    |                     |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|
| PGPR                                                                                  | AMF                | خاک (Soil)          |
| 44.09 <sup>b</sup>                                                                    | 38.94 <sup>c</sup> | RS                  |
| 54.99 <sup>a</sup>                                                                    | 53.45 <sup>a</sup> | NRS                 |
|                                                                                       | 4.90               | LSD <sub>0.05</sub> |

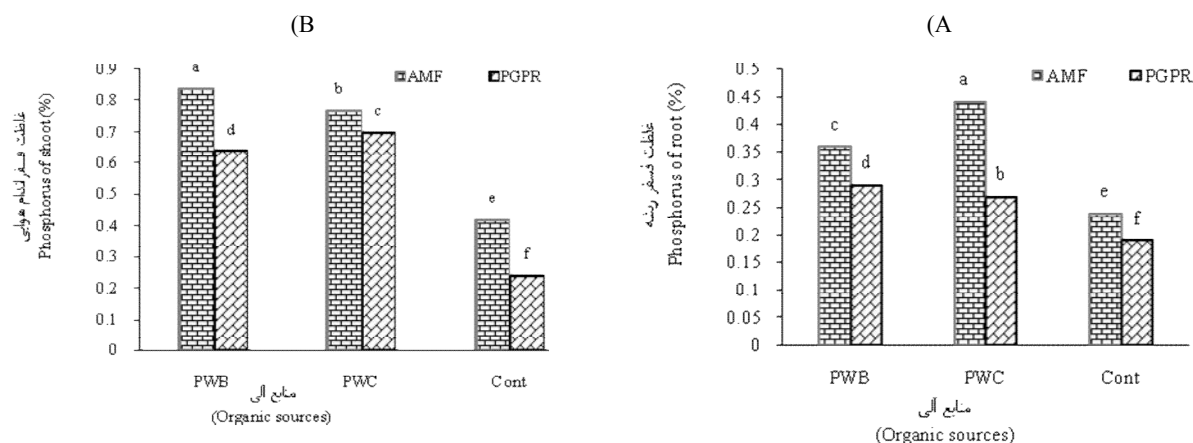
میانگین‌های دارای حروف مشترک بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمالی ۵ درصد اختلاف آماری معنی‌داری ندارند.

Means with similar letters are not significantly different at 5% probability level according to Duncan test.

به ترتیب قارچ میکوریزا آربوسکولار، باکتری‌های محرک رشد، خاک ریزوسفری و غیرریزوسفری هستند. AMF, PGPR, RS و NRS

AMF, PGPR, RS and NRS are arbuscular mycorrhizal fungi, plant growth promoting rhizobacteria, rhizosphere soil and non-rhizosphere soil, respectively.





شکل ۳- اثر متقابل منابع آلی و تلقیح میکروبی بر غلظت فسفر ریشه (A) و اندام هوایی (B)

Figure 3- The interaction of organic sources and microbial inoculation on root phosphorus (A) and shoot phosphorus (B) concentrations

Cont, PWB, PWC, AMF, PGPR are control (without organic matter), pruning waste biochar, pruning waste compost, arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteri, respectively.

و همکاران (۳۶) بیان داشتند که فسفر معدنی، فعالیت فسفاتازها را در خاک متوقف می‌کند. با توجه به سطح پایین‌تر فسفر قابل استفاده در خاک‌های ریزوسفری نسبت به خاک غیرریزوسفری در تحقیق حاضر، دلیل دیگر افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در خاک ریزوسفری احتمالاً پایین بودن سطح فسفر قابل استفاده در این نوع خاک بود که بیانگر نظریه دوم و رابطه منفی بین آنزیم فسفاتاز و فسفر قابل استفاده می‌باشد.

بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که غلظت فسفر بخش هوایی بیشتر از غلظت فسفر در ریشه بود چرا که ریشه به خوبی توانسته بود فسفر قابل استفاده گیاه را از منطقه ریزوسفر جذب کرده و به بخش هوایی گیاه منتقل کند و منجر به کاهش فسفر قابل استفاده در منطقه ریزوسفر نسبت به خاک غیرریزوسفری شود. چنان که مشاهده شد، بیشترین میزان فسفر قابل استفاده خاک در تیمار تلقیحی کمپوست و تلقیح باکتریایی نسبت به تلقیح میکوریزایی بود. تیمار بیوجار نیز در تلقیح میکوریزایی باعث افزایش مقدار فسفر قابل استفاده خاک شده بود که کمتر از تیمار کمپوست بود. کمتر بودن مقدار فسفر خاک در تیمار بیوجار نسبت به تیمار کمپوست، با توجه به مقادیر نسبتاً مشابه غلظت فسفر در گیاه در استفاده از هر دو ماده آلی، می‌تواند ناشی از محتوای فسفر قابل استفاده بالاتر کمپوست مصرفی نسبت به بیوجار باشد. همچنین فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در تیمار کمپوست بالا بود که تأثیر بسزایی در افزایش غلظت فسفر گیاه دارد. بنابراین احتمالاً کمتر بودن مقدار فسفر قابل استفاده در تیمار تلقیح میکوریزا در کمپوست ناشی از جذب بیشتر گیاه بوده و افزایش

هیف‌های قارچ‌های میکوریزا با ترشح اسیدهای آلی و آنزیم‌های فسفاتاز موجب انحلال فسفر خاک می‌گردند (۴) و با توسعه منطقه تخلیه فسفر در اطراف ریشه گیاه و افزایش سرعت جذب فسفر، مقدار فسفر جذب شده در واحد طول ریشه و در واحد زمانرا افزایش می‌دهند. رئیسی وحسین‌پور (۴۲) نیز در بررسی اثرات ریزوسفری گندم بر قابلیت استفاده فسفر در روش رایزوباکس مشاهده کردند که مقدار فسفر عصاره‌گیری شده به روش اولسن در خاک غیرریزوسفری بطور معنی‌داری بیشتر از خاک ریزوسفری بود. به نظر می‌رسد جذب فسفر توسط ریشه گیاه و میکروارگانیسم‌ها منجر به تخلیه مخازن فسفر قابل دسترس در خاک‌های ریزوسفری شده و در نتیجه مقدار فسفر استخراج شده به روش اولسن سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های ریزوسفر پایین‌تر از خاک‌های غیرریزوسفری است. در مورد رابطه بین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی و اسیدی با فسفر قابل استفاده خاک اختلاف وجود دارد. برخی محققین، رابطه مستقیم بین مقدار فسفر قابل استفاده خاک و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی را گزارش کردند (۱۶). شواهدی هم مبنی بر وجود رابطه منفی بین فعالیت آنزیم فسفاتاز و فسفر قابل استفاده خاک وجود دارد (۵۷). در تحقیق حاضر با افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز، فسفر قابل استفاده نیز افزایش یافت که بیانگر ارتباط مستقیم بین مقدار فسفر قابل استفاده و فعالیت آنزیم‌ها بود. از طرفی، افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در خاک ریزوسفری ممکن است به علت افزایش فسفر قابل دسترس خاک توسط کمپوست باشد چرا که بستر کشت مورد مطالعه (خاک)، دارای فسفر قابل دسترس کمتر از حد بحرانی بود. نانی پیری

خصوصیات شیمیایی و بیولوژیکی ریزوسفر را بطور قابل ملاحظه‌ای تغییر داد و منجر به افزایش قابلیت دسترسی فسفر در خاک و در نهایت افزایش فراهمی آن‌ها در گیاه گردید. همچنین استفاده از روش رایزوباکس از تکنیک‌های نوین در ارزیابی خاک ریزوسفری بوده و به همراه تلقیح میکروبی در این شرایط بهتر توانست فرایندهای میکروبی- ریزوسفری مرتبط با فسفر را توجیه نماید. افزودن مواد آلی به خاک همانند کمپوست در تلقیح با میکروارگانیسم‌ها به ویژه باکتری‌های PGPR در محیط ریشه منجر به افزایش فراهمی فسفر در خاک گردید. به دنبال کاربرد مواد آلی، میکروارگانیسم‌ها به سرعت رشد کرده و افزایش فعالیت‌های بیولوژیکی همانند افزایش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز در ریزوسفر خاک مشاهده شد. در نتیجه، فعالیت فسفاتازها در خاک توسط کاربرد مواد آلی همانند کمپوست و تلقیح میکروبی در افزایش زیست فراهمی فسفر معدنی خاک موثر واقع گردید. برهمکنش مثبت کمپوست و بیوچار با قارچ AM در ریزوسفر سبب شد که ریشه گیاه به آسانی نیاز خود به عناصر غذایی را از این منطقه جذب کند و منجر به افزایش زیست فراهمی فسفر در ریشه و اندام هوایی گیاه گردید. لذا استفاده از مواد آلی اصلاحی به ویژه کمپوست و بیوچار و استفاده از میکروارگانیسم‌های حل کننده فسفر می‌تواند به عنوان جایگزینی برای کودهای شیمیایی و همچنین کاهشدهنده خطرات زیست محیطی ناشی از مصرف زیاد این کودها و هزینه‌های هنگفت کودهای شیمیایی مطرح باشد.

### سپاسگزاری

بخشی از نتایج این تحقیق در قالب طرح پژوهشی شماره ۸۵۱۲۵/۶۰ با استفاده از اعتبارات "صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور" انجام گردیده که بدینوسیله تقدیر و تشکر می‌گردد.

فعالیت‌های بیولوژیکی در این تیمار، باعث افزایش غلظت فسفر در ریشه و در بخش هوایی (کمتر از بیوچار بخش هوایی) شده است. غلظت عناصر در گیاه تحت تأثیر غلظت عناصر در خاک است. انتظار می‌رود که با افزایش غلظت عناصر در خاک، غلظت آن‌ها در گیاه نیز بیشتر شود یا با کاهش غلظت عناصر در خاک جذب بیشتری توسط گیاه انجام گرفته باشد (۳۲). جسکویانی و همکاران (۱۹) گزارش کردند که حضور فسفر زیاد در کمپوست و تشکیل کمپلکس‌های فسفوهمیک سبب کند شدن فرآیند تثبیت فسفر در خاک شده و می‌تواند بخشی از نیاز گیاه به فسفر را تأمین کند. در ارتباط با تیمار بیوچار نیز می‌توان چنین بیان کرد که تلقیح میکوریزا توانسته فعال تر از تلقیح باکتریایی عمل کرده و مقدار بیشتری از فسفر قابل استفاده خاک را از طریق ریشه جذب و به بخش هوایی گیاه منتقل کند که منجر به افزایش غلظت فسفر در ریشه و بخش هوایی گردید. ونک و لهما (۵۳) با مطالعه غلظت فسفر در لوبیا از طریق برهمکنش بین بیوچار و میکوریزا گزارش کردند که کاربرد بیوچار با قارچ‌های AM منجر به افزایش غلظت فسفر در اندام هوایی نسبت به ریشه شد و غلظت فسفر در بخش هوایی گیاه بطور قابل توجهی بیشتر از تیمار شاهد (خاک) شد. در تغذیه گیاه، فعالیت فسفاتاز اسیدی با سطح کمبود فسفر در ارتباط می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص گردید که در بیوچار ضایعات هرس فعالیت این آنزیم در خاک کمتر بود بنابراین افزایش فسفر در گیاه در تیمار بیوچار به نوعی پاسخگوی کاهش فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی با افزودن بیوچار به خاک می‌باشد. نوروز زامان و همکاران (۳۸) گزارش کردند که فعالیت فسفاتاز اسیدی در ریزوسفر گیاهان لگوم و گندم تحت شرایط کمبود فسفر هم در غلات و هم در لگوم‌ها بیشتر بود.

### نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، استفاده از منابع آلی،

### منابع

- 1- ASTM standard. 2009. Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. American Society for Testing and Materials (ASTM) International: Conshohocken, PA.
- 2- Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., and Hipsley N.A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil*, 337:1-18.
- 3- Balík J., Pavlíková D., and Vaněk V. 2007. The influence of long-term sewage sludge application on the activity of phosphatases in the rhizosphere of plants. *Plant and Soil Environmental*, 53:375-381.
- 4- Bolan N. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and soil*, 34:189-207.
- 5- Bremner J.M., and Mulvaney C.S. 1982. Nitrogen-Total. P. 595-624, In: A.L. Page et. al. (eds). *Methods of soil analysis*. Part 2. 2nd ed. Agron. Monograph 9.
- 6- Cakmak O., Oztur L., Karanlık S., Ozkan H., Kaya Z., and Cakmak I. 2001. Tolerance of 65 Durum wheat genotypes to zinc deficiency in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition*, 24:1381-1847.
- 7- Chapman H.D., and Pratt P.F. 1978. *Methods of analysis for soils, plants and waters*. Division of Agricultural Sciences, University of California, Berkeley, USA, 3043p.

- 8- Caravaca F., Figueroa D., Alguacil M. M., and Rolan A. 2003. Application of composted urban residue enhanced the performance of afforested shrub species in a degraded semiarid land. *Bioresource Technology*, 90: 65-70.
- 9- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie, A., and Joseph S. 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45:629-634.
- 10- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., and Joseph S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research*, 46:437.
- 11- Chen J., Liu X., Zheng J., Zhang B., Lu H., Chi Z., Pan G., Li L., Zheng J., and Zhang X. 2013. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China. *Applied Soil Ecology*, 71:33-44.
- 12- Chintala R., Mollinedo J., Schumacher T.E., Malo D.D, and Julson J.L. 2013. Effect of biochars on chemical properties of acidic soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60:393-404.
- 13- Emami A. 1997. Plant analysis methods (Volume I). Agricultural research, Soil and Water Research Institute. (in Persian)
- 14- Emmerling C., Embacher A., and Haubold-Rosar Mand Schröder D. 1996. Initiierung und forderung der mikrobiellen Biomasse und mikrobieller Aktivitäten in jungen Kippsubstraten durch organische Reststoffe. *VDLUFA-Schriftenr*, 44:579-582.
- 15- Fathi Gerdelidani A., Mirseyed Hosseini H., and Farahbakhsh M. 2016. Effect of spent mushroom compost (SMC) and sugar cane bagasse biochar on availability and fractions of inorganic phosphorus in a calcareous soil. *Journal of Agricultural Engineering*, 9 (39):127-144. (In Persian)
- 16- Garg S., and Bahl G.G. 2008. Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer phosphorus associated with phosphatase activity in soils. *Bioresource Technology*, 5773-5777.
- 17- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Physical and Mineralogical Methods. Pp: 383-409. In: Clute A (ed). *Methods of Soil Analysis*, part 1. ASA and SSSA, Madison Wisconsin.
- 18- Ginting D., Kessavalou, A., Eghball, B., and Doran, J.W. 2003. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure and compost applications. *Journal of Environmental Quality*, 32: 23-32.
- 19- Giusquiani P.L., Arucchini C.M., and Businelli M. 1988. Chemical properties of soils amended with compost of urban waste. *Plant and Soil*, 109:73-78.
- 20- Huang P. M. and Violante A. 1986. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum. Pages 159-221 in P. M. Huang and M. Schnitzer, eds. *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. SSSA, Madison, WI.
- 21- Jin Y., Liang X., He M., Liu Y., Tian G., and Shi J. 2016. Manure biochar influence upon soil properties, phosphorus distribution and phosphatase activities: a microcosm incubation study. *Chemosphere*, 142:128-135.
- 22- Khalil H.M.A., and Hassan R.M. 2015. International Journal of Plant Research, Raising the Productivity and Fiber Quality of Both White and Colored Cotton Using Eco-Friendly Fertilizers and Rice Straw, *International Journal of Plant Research*, 5(5):122-135.
- 23- Koide R.T., and Mosse B. 2004. A history of research on arbuscular mycorrhiza. *Mycorrhiza*, 14:145-163.
- 24- Kourtev P.S., Ehrenfeld J.G., and Häggblom M. 2003. Experimental analysis of the effect of exotic and native plant species on the structure and function of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 35:895-905.
- 25- Lambers H., Raven J.A., Shaver G.R., and Smith S.E. 2008. Plant nutrient acquisition strategies change with soil age. *Trends in Ecology and Evolution*, 23:95-103.
- 26- Lehmann J. D.a., Silva J.P. Jr., Steiner C., Nehls T., Zech W., and Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249:343-357.
- 27- Liang Y., Nikolic M., Peng Y., Chen W., and Jiang Y. 2005. Organic manure stimulates biological activity and barley growth in soil subject to secondary salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, 37:1185-1195.
- 28- Liu Y., Yang M., Wu Y., Wang H., Chen Y., and Wu W. 2011. Reducing CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from waterlogged paddy soil with biochar. *Journal of Soils and Sediments*, 11:930-939.
- 29- Makoi J. H. J. R., Bambara S., and Ndakidemi P.A. 2010. Rhizosphere phosphatase enzyme activities and secondary metabolites in plants as affected by the supply of Rhizobium, lime and molybdenum in *Phaseolus vulgaris* L. *Australian Journal of Crop Science*, 4:590-597.
- 30- Marinari S., Masciandaro G., Ceccanti B., and Grego S. 2000. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology*, 72:9-17.
- 31- Marschner H., and Dell B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis, *plant and Soil*, 159: 89-10.
- 32- Mengel K., and Kirkby E. 2001. Principles of plant nutrition. 5th Ed., International Potash Institute, Bern, Switzerland.
- 33- Mkhabela M.S., and Warman P.R. 2005. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 106:57-67.

- 34- Mishra R.R. 2007. Soil microbiology. Translated by: A. Fallah, H. Besharati, & H. Khosravi, Aeeizh publisher, Pp:179.
- 35- Murphy J., and Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphorous in natural waters. *Analytica Chemica Acta*, 27:31-36.
- 36- Nannipieri P., Giagnoni L., Renella G., Puglisi E., Ceccanti B., Masciandaro G., Fornasier F., Moscatelli M.C., and Marinari S. 2012. Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 48:743-762.
- 37- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter, Pp:539-579.
- 38- Nuruzzaman M., Lambers H., and Bolland M.D.A. 2006. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. *Plant and Soil*, 281: 109-120.
- 39- Olsen S. R., Cole C.V., Watanabe F. S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extracting with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939. U. S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- 40- Priya k., and Garg V.K. 2004. Dynamics of biological and chemical parameters during vermicomposting of solid textile mill sludge mixed with Cow dung and agricultural residues. *Bioresource Technology*, Pp:203-209.
- 41- Quiquampoix H., and Mousain D. 2005. Enzymatic hydrolysis of organic phosphorus. In: Turner BL, Frossard E, Baldwin DS (eds) *Organic phosphorous in the environment*. CABI, Wallingford, UK, Pp:89-112.
- 42- Raiesi T., and Hosseinpour A.R. 2013. The rhizospheric effects of wheat (*Triticum aestivum* L.) on phosphorus availability and some biological properties in calcareous soils from Shahrekord plain. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 3;4 (4):51-65. (In Persian)
- 43- Rajkovich S., Enders A., Hanley K., Hyland C., Zimmerman A.R., and Lehmann J. 2011. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils*, 48(3):271-284.
- 44- Reis V.J., Reis F.B.J., Quesada D.M., de., Oliveira O.C.A., Alves B.J.R., Urquiaga S., and Boddey R.M. 2001. Biological nitrogen fixation associated with tropical pasture grasses. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28:837-844.
- 45- Renella G., Landi L., Ascher M.T., Ceccherini M.T., Pietramellara G., and Nannipieri P. 2006. Phosphomonoesterase production and persistence and composition of bacterial communities during plant material decomposition in soils in soil with different pH values. *Soil Biology and Biochemistry*, 38:795-802.
- 46- Roberts K.G., Gloy B.A., Joseph S., Scott N.R., and Lehmann J. 2010. Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science and Technology*, 44:827-833.
- 47- Saviozzi A., Levi-Minzi R., Cardelli R., and Riffaldi R. 2001. A comparison of soil quality in adjacent cultivated, forest and native grassland soils. *Plant and Soil*, 233:251-259.
- 48- Steiner C., Teixeira W.G., Lehmann J., Nehls T., de Macêdo J. L. V., Blum W. E. H., and Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal, and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291:275-290.
- 49- Tabatabai M.A., and Bremner J.M. 1969. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1:301-307.
- 50- Tabatabai M.A. 1994. Soil enzymes. In: Weaver RW, Angle JS, Bottomley PS (eds) *Methods of soil analysis. Part 2 - Microbiological and biochemical properties*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, US, Pp:775-833.
- 51- Tarafdar J.C., and Jungk A. 1987. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. *Biology and Fertility of Soils*, 3:199-204.
- 52- Tandon H.L.S. 1998. *Methods of Analysis of Soils, Plants, Waters and Fertilizers*. Fertilizers Development and Consultancy Organization, New Dehli.
- 53- Vanek S.J., and Lehmann J. 2014. Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar, *Plant and Soil*, 395:1-19, 105-123.
- 54- Whalen J.K., Chi C., and Olsen B.M. 2001. Nitrogen and phosphorous mineralization potentials of soil receiving repeated annual cattle manure applications. *Journal of Biology and Fertility of Soils*, 34:334-341.
- 55- Xu G., Sun J., Shao H., and Chang S.X. 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*, 62:54-60.
- 56- Yuan L., Fang D.H., Wang Z.H., Shun H., and Huang J.G. 2000. Bio-mobilization of potassium from clay minerals: I. By ectomycorrhizas. *Pedosphere*, 10:339- 346.
- 57- Yu S., Hea Z.L., Stoffella P.J., Calvert D.V., Yanga X.E., Banks D.J., and Baligar V.C. 2006. Surface runoff phosphorus (P) loss in relation to phosphatase activity and soil P fractions in Florida sandy soils under citrus production. *Soil Biology and Biochemistry*, 38:619-628.



## Effect of Pruning Waste Biochar and Compost and Microbial Inoculation on Phosphorus Availability

M.H. Rasouli-Sadaghiani<sup>1\*</sup> - R. Vahedi<sup>2</sup> - M. Barin<sup>3</sup>

Received: 25-09-2017

Accepted: 07-07-2018

**Introduction:** Millions of tons of trees pruning waste are produced annually in Iran, which can contribute to supplying soil organic matter. Soils in arid and semi-arid regions, due to lack of sufficient vegetation and the return of low amounts of plant residues to the soil, contain little organic matter. These soils are often calcareous, and as a result, many plants in these soils are faced with nutritional problems, especially phosphorus deficiency. Phosphorus, as an essential element for plant growth, combines with soil components and changes into less soluble and insoluble compounds in calcareous soils with low amounts of organic matter. Organic matter and biological amendments can affect the solubility and mobility of nutrients in the rhizosphere and improve their bioavailability by creating different chemical and biological conditions. The pruning waste of trees can be used to produce biochar and compost and consequently improves soil physical and chemical properties and plays an important role in the dynamics and living of soil microorganisms. Biochar is a carbon-rich solid material produced during pyrolysis which is the thermal degradation of biomass under oxygen limited conditions. It has recently received much attention as a soil amendment which can be used to increase nutrient availability, improve the soil microbial diversity and biological activities such as enzyme activity in rhizosphere and sequester carbon in agricultural soils. In addition, compost is a chemical derived product from organic waste and contains many beneficial elements that are gradually released into soil and available to plants. Another approach to improve the bioavailability and mobility of phosphorus in the rhizosphere is the use of potential of phosphate-solubilizing microorganisms including arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). Limiting the roots to examine the biological and chemical changes and the extent to which these properties have expanded in the rhizosphere are challenges that have been less addressed Rhizobox is one of the systems used to study rhizosphere changes. The aim of this study was to investigate the effect of biochar and compost prepared from pruning waste of apples and grapes trees as well as microbial inoculation on phosphatase activity and phosphorus availability at wheat rhizosphere under rhizobox condition.

**Materials and Methods:** This study was carried out on a completely randomized design with a factorial arrangement in three replications, under greenhouse condition in rhizobox. The factors were organic matter (pruning waste biochar (PWB), pruning waste compost (PWC) and control (without organic matter)), microbial inoculation (AMF and PGPR) and soil type (rhizosphere and non-rhizosphere soil). For this purpose, a soil sample with light texture and low available phosphorus content was prepared. PWB used in the experiment was produced from mix pruning waste of apple and grape at the final temperature of approximately 350°C for 3 hours. Moreover, pruning waste compost of apple and grape trees was prepared from Department of Soil Science, Urmia University. The biochar and compost were ground and screened through a 0.5 mm sieve for the greenhouse experiment. The seeds of wheat were planted in 20 × 15 × 20 cm rhizobox (length, width and height). At greenhouse experiment, the biochar and compost were added to the boxes in terms of 1.5% pure organic carbon before planting (each box contained 5.8 kg of soil). In control treatments (without organic matter), sterile soil was used with microbial inoculation. Microbial strains used for inoculation included *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida* and mycorrhizal fungus (*Glomus fasciculatum*). Wheat seeds (*Triticum aestivum* L. cv. Pishtaz) were grown in rhizobox. At the end of the vegetative growth period, acid phosphatase (ACP) and alkaline phosphatase (ALP) enzymes activities were assayed by spectrophotometry method. Soil available P was extracted with 0.5 M NaHCO<sub>3</sub> (Olsen-P) in the rhizosphere and non-rhizosphere soils and phosphorus concentrations in the root and shoot were determined by the standard method.

**Results and Discussion:** The results showed that the application of PWC and microbial inoculation significantly increased ACP and ALP enzymes activity and the availability of phosphorus compared to the control. The highest increase in ALP enzyme activity and available phosphorus was observed in PWC treatment inoculated with PGPR. Furthermore, PWC increased the ACP and ALP enzymes activities in the rhizosphere soil

1, 2 AND 3- Professor, MSc Student and Assistant Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Iran  
(\*-Corresponding Author Email: m.rsadaghiani@urmia.ac.ir)

by 1.39 and 1.33 times compared to non-rhizosphere soil, respectively. However, phosphorus availability in the non-rhizosphere soil of the PWC treatment was 21.19% higher than that in the rhizosphere soil. The lowest available phosphorus content was observed in rhizosphere soil of AMF treatment. In addition, the highest phosphorus concentrations in plant root and shoot were, respectively, found in the compost and biochar treatments inoculated with AMF. In PWB treatment, the inoculation of AMF increased shoot phosphorus concentration by 1.31 times relative to PGPR inoculation.

**Conclusions:** In general, applying organic matter and microbial inoculation had a significant positive effect on phosphorus availability and plant growth. Adding organic matter to the soil, such as compost and inoculation with microorganisms particularly PGPR bacteria in the root zone, led to increased soil available phosphorus. The activity of phosphatases in soil was influenced by using organic materials such as compost and microbial inoculation which enhance the bioavailability of inorganic phosphorus. More positive interaction of PWC and PWB with AMF than PGPR in the rhizosphere caused greater increase of phosphorus bioavailability in the root zone and plant phosphorus uptake. In general, according to the results of this study, it seems that the use of organic materials and biological potential of the microorganisms have a significant effect on phosphorus availability and improve plant growth.

**Keywords:** Available P, Microorganisms, Organic matter, Rhizosphere

## بررسی تغییرات اندازه ذرات با استفاده از روش نوین پراش لیزری و کانی‌شناسی رسی خاک‌های مدرن لسی در طول گرادیان اقلیمی در شمال ایران

جعفر شریفی گرم دره<sup>۱</sup> - فرهاد خرمالی<sup>۲\*</sup> - کریستین رلف<sup>۳</sup> - مارتین کهل<sup>۳</sup> - علی شهریار<sup>۳</sup> - مانفرد فرشن<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

### چکیده

مطالعه لس‌های شمال ایران به دلیل قرار گرفتن در میانه کمربند لسی آسیا و اروپا دارای اهمیت بسزایی است. علاوه بر این لس‌ها به دلیل قرار گرفتن در یک شیب اقلیمی که از شمال به جنوب و از غرب به شرق میزان بارندگی در آن افزایش می‌یابد و تقریباً دما در آن ثابت است برای بررسی تغییرات اقلیمی و شرایط محیطی بسیار مناسب است. هدف از این مطالعه بررسی روند تغییرات اندازه ذرات در این شیب اقلیمی و استفاده از اندازه ذرات و کانی‌شناسی رسی و پذیرفتاری مغناطیسی برای تعیین منشأ رسوبات خاک‌های مدرن بود. از این رو، ۶ خاک‌رخ در طول گرادیان اقلیمی با بارندگی‌های مختلف از حدود ۲۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد و آنالیزهای اندازه ذرات و کانی‌شناسی رسی بر روی آنها انجام شد. نتایج نشان داد که میانه اندازه ذرات و U-ratio به سمت مناطق با بارندگی بیشتر کاهش و مقدار رس و سیلت ریز افزایش یافت. میکا و کلریت و کائولینیت کانی‌های بخش رس و کوارتز و پلاژیوکلاز کانی‌های بخش سیلت مواد مادری در طول گرادیان اقلیمی مقدارشان ثابت بود. تغییرات اندازه ذرات نشان داد که با دور شدن از منطقه با بارش کمتر در شمال منطقه از منبع اصلی دور شده و روند کانی‌شناسی رسی نشان دهنده وجود منبع مشترک بین خاک‌های مدرن بود؛ با این تفاوت که اقلیم تغییراتی در مقدار برخی کانی‌ها در سولوم خاک ایجاد کرده است.

**واژه‌های کلیدی:** بارندگی، پذیرفتاری مغناطیسی، کانی‌های سیلتی و رسی، منشأ رسوبات لسی

### مقدمه

کانی‌های رسی و میزان کانی‌های مغناطیسی خاک می‌شود (۱۴) و (۲۲). هوادیدگی و تشکیل خاک در شرایط زهکشی مناسب باعث تشکیل اکسیدهای آهن مغناطیسی می‌شود (۳). از اینرو پذیرفتاری مغناطیسی در مدل چینی در پالئوسول‌ها بیشتر از مواد مادری است (۱۱) و با افزایش بارندگی مقدار پذیرفتاری مغناطیسی افزایش می‌یابد (۲۰ و ۲۳) از طرفی تحت شرایط احیایی مقدار پذیرفتاری مغناطیس کاهش پیدا می‌کند (۱۱ و ۳۳) علاوه بر این گیلجسو و آرنولد (۷) بیان کردند در طی هوادیدگی، تخریب و تشکیل کانی‌ها می‌تواند باعث تشکیل کانی‌های مختلف رسی در محیط‌های اقلیمی متفاوت گردد و با بررسی کانی‌هایی با قطر کمتر از ۲ میلی‌متر می‌توان بهتر تغییرات در مناطق منبع، فرآیندهای انتقال (شدت باد) و رژیم هوادیدگی (بارش و دما) در طول زمان را درک کرد، همچنین تغییرات وابسته به مناطق منبع، فرآیند انتقال و رژیم هوادیدگی در طول زمان در تغییرات کانی‌شناسی ثبت می‌شود بطوریکه این محققین در توالی رس قرمز-لس لینگتای در فلات لسی چین پیشنهاد کردند که مقدار بالای کائولینیت، کلریت و کوارتز در رس قرمز رنگ، با تغییرات شدید در مقدار نسبی کانی‌ها در مرز بین رس قرمز-لس در ۲/۶ میلیون سال پیش دلیل بر تغییر در منبع می‌باشد. آن‌ها همچنین بیان کردند که روند کانی‌شناسی و تفاوت بین واحدهای لس-پالئوسول نشان داد که

لس‌های شمال ایران قطعه گمشده‌ای از کمربند لسی آسیا و اروپا می‌باشند از اینرو آنالیز و اندازه گیری رسوبات و خصوصیات مختلف توالی‌های آن‌ها به فهم و ارتباط یافته‌های گوناگون قبلی هر دو کمربند لسی کمک می‌کند (۱ و ۲). اندازه ذرات، ترکیب کانی‌شناسی و پذیرفتاری مغناطیسی به تغییرات اقلیمی حساس هستند و از این خصوصیات برای فهم بهتر محیط و اقلیم گذشته استفاده می‌شود (۱۷ و ۲۷). اقلیم از طریق رطوبت و دما می‌تواند اثر مستقیمی بر روی خصوصیات خاک داشته باشد. با افزایش بارندگی میزان تشکیل و تکامل خاک افزایش می‌یابد و موجب افزایش مقدار رس و تغییر در

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و استاد گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران  
(Email: fkhormali@gau.ac.ir)  
(\*) نویسنده مسئول:

۳- استاد گروه مغناطیس، موسسه ژئوفیزیک کاربردی لیننیز، هانوفر، آلمان

۴- استاد انسیتوی جغرافیا، دانشکده آمار و علوم طبیعی، دانشگاه کلن، آلمان

۵- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

۶- استاد گروه زمین کرونولوژی، موسسه ژئوفیزیک کاربردی لیننیز، هانوفر، آلمان

مناطق منبع متفاوتی در ۵/۰ میلیون سال اخیر وجود داشته است. علاوه بر کانی‌شناسی و پذیرفتاری مغناطیسی که در شناخت منشأ رسوبات مفید هستند، اندازه ذرات به عنوان یکی دیگر از خصوصیات توالی‌های لس-پالئوسول برای بازسازی فرآیندهای فرسایش و انتقال (۸) و همچنین تغییرات بعد از رسوبگذاری (۲۸) استفاده می‌شود. ترکیب دانه‌بندی لس‌ها اساساً بر مبنای شدت باد و فاصله از منبع رسوبات می‌باشد (۲۷). در این رابطه بررسی‌ها نشان می‌دهند که ذرات درشت و همین‌طور ذرات اندازه سیلت با بادهای نزدیک سطح زمین منتقل می‌شوند و از یک مکان به مکان دیگری حرکت می‌کنند (۲۸ و ۳۲). این ذرات درشت معمولاً در نزدیک منابع تولید آنها و در جهت باد تجمع پیدا می‌کنند. برعکس ذرات ریز می‌توانند تا فواصل بسیار طولانی و در عرضهای بالاتر حرکت کنند. این ذرات عمدتاً با جریانات هوایی با سطح بالا حرکت می‌کنند و بنابراین می‌توانند تا فواصل دورتری از منبع حرکت کنند (۶، ۳۸، ۲۸ و ۳۲).

در سال‌های اخیر خاک‌های لسی شمال ایران به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند لسی اروپا و آسیا و تغییرات منحصر به فرد این خاک‌ها که نشان‌دهنده تغییرات گسترده اقلیمی و شرایط محیطی گذشته است توسط تعداد زیادی از محققین مورد بررسی قرار گرفته است.

کهل (۱۲) در آق‌بند که در یک منطقه نیمه خشک با بارندگی ۳۵۰ میلی‌متر قرار دارد اندازه ذرات ۲۹ میکرون را برای لس‌های این منطقه با روش پیپت و غربال بدست آورد. در حالی که در سال ۲۰۱۶ طی یک عملیات میدانی وسیع که حدود ۵۰ متر خاک‌رخ پله‌ای در این مکان حفر شد که شامل ۲ قسمت ۱ و ۲ بود میانه اندازه ذرات به روش آنالیز کننده پراش لیزری برای آق‌بند شماره ۱ حدود ۳۳ و آق‌بند شماره ۲ حدود ۲۷ میکرون متر محاسبه گشت (۱۹). همچنین این محققین (۱۹) در منطقه آق‌بند چندین تغییر درشت‌شدن و ریز شدن اندازه ذرات در لایه‌های مختلف را مشاهده کردند، آن‌ها بیان کردند تغییر در سرعت باد دلیل این تغییرات می‌باشد. کهل (۱۲) با روش غربال و پیپت میانگین میانه اندازه ذرات را در نوده که در منطقه‌ای با بارش ۶۰۰ میلی‌متر قرار دارد ۱۱ و در نکا با بارش ۷۵۰ میلی‌متر ۹ میکرون برآورد کرد. مطالعه دیگری توسط فلامینک و همکاران (۳۵) در توشن برای اندازه‌گیری اندازه ذرات با روش پراش لیزری در یک منطقه نیمه مرطوب با بارندگی ۶۵۰ میلی‌متر در نزدیک شهر گرگان در استان گلستان صورت گرفت که میانه اندازه ذرات در این منطقه ۱۰ میکرومتر برآورد شد.

کهل و همکاران (۱۲) نزدیکی به مناطق منبع را دلیل بالا بودن مقدار بالای شن ریز و سیلت درشت در آق‌بند عنوان کردند در حالی که آنها بیان کردند برای برش نکا و نوده انتقال با فاصله زیاد ممکن است اتفاق افتاده باشد. از سوی دیگر، آنها بیان کردند از آنجایی که

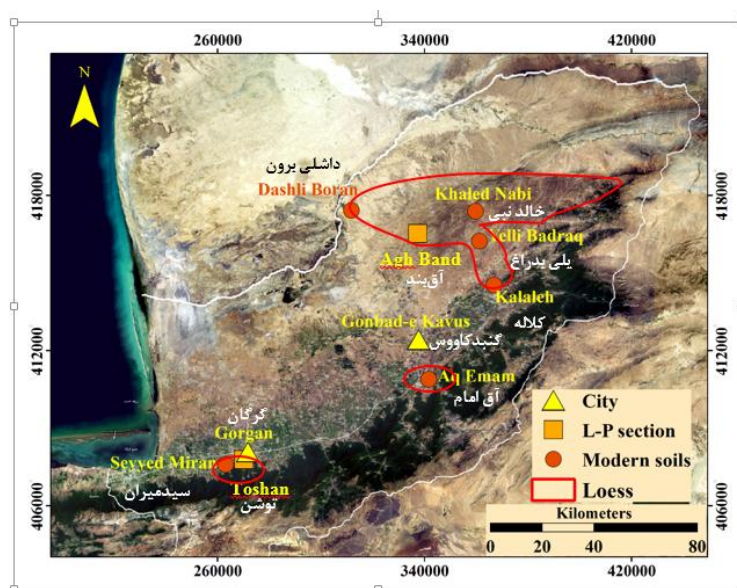
اکثر لس‌های این منطقه در ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر قرار دارند (۱۸) به احتمال زیاد بیشتر گرد و غبار موجود در شمال ایران از دشتهای سیلابی منطقه‌ای رودهای اترک و گرگان گرفته شده است. برخی از مواد رسوبی توسط رود گرگان و اترک وارد دریای خزر شده، علاوه بر این رسوبات ایجاد شده در قله البرز به سمت دریای خزر حرکت کرده و طی عقب نشینی‌های دریای خزر بصورت تپه‌های دریایی به عنوان منبعی از رسوبات بادی در معرض قرار می‌گیرد (۵). بر اساس مطالعات خرمالی و همکاران (۱۵) کانی‌های رسی ایلیت، کلریت و کائولینیت و اسمکتیت در مواد مادری این خاک‌ها وجود دارد که منشأ آنها ارثی است از طرفی آنها بیان کردند مقدار و نوع کانی‌های رسی با افزایش بارندگی تغییر می‌کند و مقدار اسمکتیت و وریمیکولیت پدوژنیک افزایش یافته است. مطالعاتی که تا کنون در این منطقه انجام شده بیشتر بر روی رسوبات لس-پالئوسول‌های با بارندگی در حدود ۳۵۰ میلی‌متر و بالاتر از ۶۰۰ میلی‌متر است و تاکنون مطالعاتی در خاکهای مدرن و با میزان بارندگی متفاوت در این منطقه انجام نشده است. علاوه بر این مطالعاتی بر روی کانی‌شناسی و پذیرفتاری مغناطیسی و همین‌طور اندازه ذرات با این هدف که می‌توان از آن‌ها به عنوان یک متغیر برای منشأیابی خاک‌های لسی استفاده کرد صورت پذیرفته است. از اینرو هدف از این مطالعه ۱- بررسی تغییرات اندازه ذرات و کانی‌شناسی در طول یک گرادیان اقلیمی و ۲- بررسی یکنواختی منشأ خاک‌های لسی مدرن با استفاده از پارامترهای گفته شده در طول گرادیان اقلیمی بود.

## مواد و روش‌ها

### مناطق مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در لس‌های استان گلستان قرار دارد، بطوریکه ضخامت رسوبات لسی در نزدیکی پای کوه البرز به حدود ۳۰ متر و در فلات لسی ایران به حدود ۷۰ متر در نزدیکی شهر گنبد کاووس می‌رسد. این رسوبات در یک شیب اقلیمی که از شمال به جنوب میزان بارندگی حدوداً ۲۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر تغییر می‌کند قرار دارد (شکل ۱). میزان دما در این منطقه تغییر چندانی ندارد و میانگین دما در حدود ۱۷ تا ۱۸ درجه سانتیگراد می‌باشد (جدول ۱) از این رو برای بررسی تغییرات خصوصیات خاک با میزان بارندگی بسیار مناسب است. پوشش گیاهی در این منطقه از مراتع با پوشش پراکنده در شمال تا پوشش متراکم در مناطق با بارندگی بیشتر و در نهایت جنگل تغییر می‌کند. (جدول ۱).





شکل ۱- موقعیت قرار گرفتن خاک های مدرن لسی و برش لس-پارینه آق بند و توشن (استان گلستان)

Fig 1- Location map of the study area and the sites of the modern soils and loess sections at Aq Band and Toshan (Golestan province)

## نمونه برداری و اندازه گیری نمونه ها

### نمونه برداری

۶ خاکرخ در نقاط پایدار با زهکشی مناسب و بدون فعالیت های کشاورزی در طول این گرادیان اقلیمی انتخاب شد (جدول ۱). پس از تشریح خاکرخ ها و تعیین افق ها، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی بررسی و طبق سیستم تاکسونومی (۳۰) طبقه بندی شد. برای بررسی اندازه ذرات و خصوصیات مغناطیسی از هر خاکرخ نمونه هایی با فاصله ۱۰ cm برداشت شد، همچنین از هر خاکرخ نمونه هایی برای بررسی کانی های رسی و سیلتی انتخاب شد.

### آنالیز اندازه ذرات

تعیین اندازه ذرات با تحلیل پراش لیزر با استفاده از دستگاه Beckman-Coulter LS 13320 PIDS در آزمایشگاه انسیتو ژئوفیزیک کاربردی لایپزیک صورت گرفت. تجزیه کننده اندازه ذرات پراش لیزری از اصل پراکندگی رو به جلوی نور تکرنگ و پراش آن تحت یک زاویه خاص، بسته به اندازه ذرات استفاده می کند. زاویه پراش به طور معکوس متناسب با اندازه ذرات است. این بدان معنی است که ذرات بزرگ تر زاویه کوچکتری نسبت به ذرات کوچکتر ایجاد می کنند. این روش فوایدی نسبت به روش های پیت و روش قدیمی غربال کردن دارد از جمله اینکه مقدار کمی نمونه نیاز دارد، نمونه با این روش در مدت زمان کوتاهی می تواند اندازه گیری شود و نتایج آن دارای تکرار پذیری قابل اعتمادی می باشد.

این روش دامنه وسیعی از اندازه ذرات از حدود ۰/۴ تا ۲۰۰۰ میکرومتر را پوشش می دهد و داده ها رقومی شده هستند و نیازی به محاسبه ندارند. با این وجود تشخیص در اندازه رس ممکن است به دلیل شکل صفحه ای ذرات رس و کانی شناسی ذرات برآورد واقعی نداشته باشد و برآورد آن کمتر از مقدار واقعی باشد. بنابراین ذرات با قطر کمتر از ۵/۵ میکرومتر به عنوان ذرات رس در نظر گرفته می شوند. تعیین اندازه ذرات براساس پروتکل نمونه استاندارد مچالت و همکاران (۲۱) با استفاده از تئوری فرانوفر برای ارزیابی طیف اندازه ذرات انجام شد. با در نظر گرفتن اینکه مواد آلی کمتر از ۲ درصد می باشد حذف این مواد صورت نگرفت که البته ممکن است در این حالت اشتباه قابل اغماض برای اندازه گیری اندازه ذرات صورت گیرد (۲۱). کرنات کلسیم معادل هم برای این نمونه ها حذف نشد زیرا روش قابل اعتماد و عملی برای حذف کرنات کلسیم معادل ثانویه وجود ندارد. سپس خاکدانه ها با هیدروکسید آمونیم ۱ درصد پراکنده شدند و پس از آن نمونه ها به مدت ۱۲ ساعت در یک روتیتر قرار گرفتند. اضافه کردن هیدروکسید آمونیوم به منظور این است که دیگر خاکدانه سازی و تشکیل حباب هوا در طی پیش تیمار فراصوت متناوب صورت نگیرد (۲۱).

### کانی شناسی رس

نمونه های خاک عبور داده شده از الک ۲ میلی متری به منظور خالص سازی رس استفاده شد. برای از بین رفتن عوامل شیمیایی سیمان کننده و جدا شدن ذرات رس از یکدیگر روش های مهرا و

جکسون (۲۵)، کیتریک و هوپ (۱۶) و جکسون (۹) به کار گرفته شد.

جدول ۱- اطلاعات اقلیمی منطقه مورد مطالعه  
Table 1- Climatically information of the study area

| منطقه       | پوشش گیاهی       | میانگین بارش سالیانه | مانگین دمای سالیانه هوا | ارتفاع از سطح دریا |
|-------------|------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| Region      | Vegetation cover | MAP (mm)             | MAAT (°C)               | Altitude (m a.s.l) |
| داشلی برون  | علفزار           | 200                  | 18                      | 54                 |
| DashliBorun | Grassland        |                      |                         |                    |
| خالدنی      | علفزار           | 330                  | 17.5                    | 380                |
| KhaledNabi  | Grassland        |                      |                         |                    |
| یلی بدرآغ   | علفزار           | 405                  | 17                      | 385                |
| YelliBadraq | Grassland        |                      |                         |                    |
| کلاله       | علفزار           | 480                  | 17                      | 205                |
| Kalaleh     | Grassland        |                      |                         |                    |
| آق امام     | بوته‌زار         | 600                  | 17                      | 320                |
| AqEmam      | Shrub land       |                      |                         |                    |
| سید میران   | جنگل             | 670                  | 17                      | 218                |
| SeyyedMiran | Forest           |                      |                         |                    |

MAP: Mean annual precipitation; MAAT: Mean annual air temperature; Altitude (m a.s.l)

و با افزایش مقدار بارندگی به ترتیب رده‌های Mollisol، Inseptisol و Alfisol پدیدار شد. همچنین مقدار رس افزایش یافته و مقدار سیلت کاهش می‌یابد.

آنالیز اندازه ذرات با روش پراش لیزری نشان داد که مقدار رس و سیلت ریز در خاکرخ واقع در داشلی‌برون کمترین و مقدار U-ratio که مقدار آن از نسبت بین سیلت متوسط ( $34-16 \mu\text{m}$ ) به سیلت ریز ( $5/5-16 \mu\text{m}$ ) بدست می‌آید و میانه اندازه ذرات بیشترین مقدار را در طول این گرادیان اقلیمی دارد. مقدار رس و سیلت ریز به ترتیب برابر  $12/09$  و  $7/03$  و مقدار U-ratio و میانه اندازه ذرات برابر  $6/35$  و  $48/24$  می‌باشد، در حالی که با افزایش بارندگی و دور شدن از شمال منطقه مقدار رس و سیلت ریز افزایش و مقدار U-ratio و میانه اندازه ذرات در آن کاهش می‌یابد. بطوریکه مقدار رس و سیلت ریز در سید میران با بیشترین مقدار بارندگی به ترتیب برابر  $36/56$  و  $28/02$  درصد به حداکثر خود می‌رسد و مقدار U-ratio و میانه اندازه ذرات برابر  $1/00$  و  $8/78$  میکرون به حداقل مقدار خود می‌رسد (شکل ۲).

کانی‌های رسی در مواد مادری این خاکرخ‌ها در طول گرادیان اقلیمی شامل میکا، کلریت، کائولینیت و اسمکتیت، می‌باشد. با افزایش مقدار بارش مقدار ورمیکولیت و اسمکتیت پدوژنیک افزایش می‌یابد (جدول ۳). کانی‌های بخش سیلت شامل کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم‌دار، میکا و کلریت و کلسیت می‌باشد. که مقدار کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم در مواد مادری تغییری نمی‌کند (جدول ۴). در خاکرخ‌های داشلی‌برون تا یلی‌بدرآغ و تا حدودی کلاله کانی‌های غالب میکا و کلریت می‌باشند.

سپس از هر نمونه رس به دست آمده چهار تیمار شامل منیزیم، منیزیم و اتیلن گلیکول، پتاسیم در دمای معمولی و پتاسیم در دمای  $550^\circ\text{C}$  درجه سانتی گراد تهیه گردید و جهت شناسایی کانی‌های رسی نمونه‌ها از دستگاه پرتو ایکس<sup>۱</sup> استفاده شد. پس از آن تخمین نیمه کمی کانی‌های رسی با پیک رده اول تیمار گلیکول صورت گرفت (۱۰).

### خصوصیات مغناطیسی

همه نمونه‌ها در آزمایشگاه انستیتو ژئوفیزیک کاربردی لایپزیک بعد از هوا خشک شدن نمونه‌ها پودر شدند. و در بسته‌های پلاستیکی با اندازه ۶ سانتی‌متر قرار گرفتند. برای تعیین پذیرفتاری مغناطیسی از دستگاه (MINIKAPPA (KLF-3) و برای مشخص کردن پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس از دو فرکانس  $50.5$  و  $500.5$  با استفاده از دستگاه MagnonGmbH استفاده شد (۲۹).

### نتایج و بحث

نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاکرخ‌های مورد مطالعه در جدول شماره ۲ آورده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که خاکرخ منطقه داشلی برون با کمترین مقدار بارش در رده Entisol قرار دارد

<sup>۱</sup> دستگاه پرتو ایکس (XRD) مدل ADVANCE D8 (در زوایای  $2\theta$  بین  $2$  تا  $30$  درجه، ولتاژ  $40$  کیلو ولت و جریان  $30$  میلی آمپر و فلز هدف مس)

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک‌رغ‌های مدرن  
Table 2- Some physicochemical properties of modern soils

| منطقه                    | افق            | عمق        | رنگ مرطوب    | هدایت الکتریکی |           | کربن آلی | رس   | سیلت   | شن   | گچ     |
|--------------------------|----------------|------------|--------------|----------------|-----------|----------|------|--------|------|--------|
| Region                   | Horizon        | Depth (cm) | Moist color  | pH             | EC (dS/m) | OC       | Clay | Silt % | Sand | Gypsum |
| Typic Torriorthents      |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| داشلی برون<br>D-B        | A              | 0-10       | 10YR 6/3     | 8.3            | 0.8       | 0.5      | 21.9 | 59.1   | 18.9 | 3.21   |
|                          | C              | 10-50      | 10YR 6/4     | 8.3            | 4.7       | 0.3      | 19.3 | 59.1   | 21.4 | 3.13   |
|                          | C <sub>Y</sub> | 50-100     | 10YR 6/4     | 8.3            | 12.7      | 0.3      | 14.2 | 62.8   | 23.0 | 3.90   |
| Typic Haploxerepts       |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| خالد نبی<br>K-N          | A              | 0-10       | 10YR5/4      | 7.4            | 1.8       | 0.7      | 15.0 | 73.8   | 11.2 | 2.9    |
|                          | B <sub>w</sub> | 10-40      | 10YR6/4      | 7.7            | 0.8       | 0.4      | 15.0 | 68.8   | 16.2 | 2.8    |
|                          | C              | 40-90      | 10YR6/3      | 7.6            | 3.6       | 0.2      | 15.0 | 68.8   | 16.2 | 2.8    |
|                          | C <sub>y</sub> | 90-110     | 10YR6/3      | 7.8            | 9.6       | 0.1      | 12.5 | 71.3   | 16.2 | 5.1    |
| Typic Calcixerepts       |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| یلی بدراغ<br>Y-B         | A              | 0-28       | 10YR 4/3     | 8.1            | 1.0       | 2.6      | 27.3 | 65.1   | 7.5  | 3.1    |
|                          | Bky1           | 28-54      | 10YR5/3      | 8.3            | 0.8       | 1.4      | 22.0 | 64.4   | 13.5 | 4.3    |
|                          | Bky2           | 54-68      | 10YR 6/4     | 8.2            | 1.1       | 1.0      | 21.9 | 66.9   | 11.0 | 3.1    |
|                          | Bky3           | 68-112     | 10YR 6/4     | 7.9            | 3.7       | 0.7      | 27.1 | 65.7   | 7.1  | 3.1    |
|                          | Bky4           | 112-130    | 10YR 6/4     | 7.9            | 6.7       | 0.6      | 29.7 | 62.1   | 8.1  | 3.1    |
|                          | C              | 130-150    | 10YR 6/3     | 8.6            | 2.5       | 0.4      | 29.6 | 59.3   | 11.0 | 3.0    |
| Typic Calcixerolls       |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| کلاله<br>K               | A              | 0-27       | 10YR 2/2     | 8.1            | 0.9       | 3.9      | 31.8 | 59.4   | 8.7  | -      |
|                          | AB             | 27-37      | 10YR 2/2-3/2 | 8.3            | 0.5       | 3.3      | 29.8 | 62.4   | 7.6  | -      |
|                          | Bk1            | 37-52      | 10YR5/3      | 8.1            | 0.5       | 2.2      | 29.7 | 64.7   | 5.5  | -      |
|                          | Bk2            | 52-89      | 10YR 6/4     | 8.2            | 0.4       | 1.2      | 19.4 | 71.9   | 8.6  | -      |
|                          | Bk3            | 89-104     | 10YR 6/4     | 8.1            | 0.8       | 0.9      | 23.3 | 60.7   | 15.8 | -      |
|                          | Ck             | 104-130    | 10YR 6/4     | 8.2            | 0.9       | 0.6      | 22.3 | 65.4   | 12.2 | -      |
| Calcic PachicArgixerolls |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| آق امام<br>A- E          | A              | 0-30       | 10YR3/3      | 6.8            | 1.4       | 1.9      | 40.0 | 43.1   | 16.9 | -      |
|                          | AB             | 30-80      | 10YR2/2      | 6.3            | 1.3       | 1.7      | 42.5 | 46.3   | 11.2 | -      |
|                          | Bt             | 80-110     | 10YR3/4      | 6.7            | 0.8       | 1.0      | 42.5 | 48.8   | 8.7  | -      |
|                          | Bk             | 110-150    | 10YR6/4      | 7.5            | 0.5       | 0.4      | 25.0 | 56.3   | 18.7 | -      |
| Calcic Haploxerafls      |                |            |              |                |           |          |      |        |      |        |
| سید میران<br>S-M         | A              | 0-10       | 10YR3/2      | 6.6            | 1.1       | 5.7      | 40.0 | 40.7   | 19.3 | -      |
|                          | Bw             | 10-28      | 10YR4/4      | 6              | 0.6       | 1.6      | 40.0 | 46.3   | 13.7 | -      |
|                          | Bt             | 28-65      | 10YR4/5      | 6.5            | 1.0       | 0.6      | 40.0 | 43.1   | 16.9 | -      |
|                          | Btk            | 65-90      | 10YR5/3      | 7.5            | 0.6       | 0.7      | 30.0 | 53.8   | 16.2 | -      |
|                          | Bk             | 90-120     | 10YR5/4      | 7.6            | 0.3       | 0.5      | 32.5 | 53.8   | 13.7 | -      |
|                          | Ck             | 120-160    | 10YR6/4      | 7.6            | 0.4       | 0.3      | 25.0 | 56.3   | 18.7 | -      |

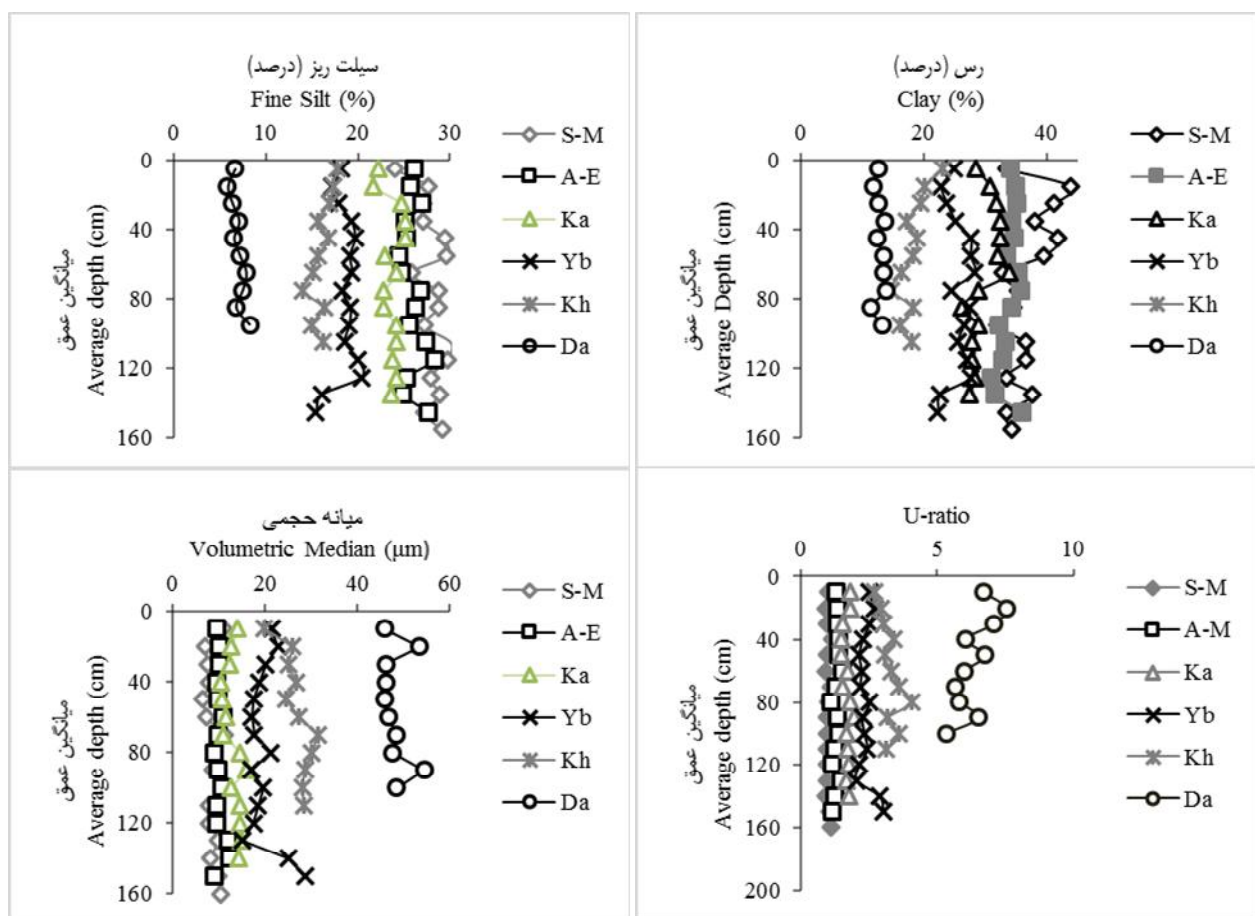
دارد علاوه بر این برای تشکیل آن نیاز به شرایط حاره‌ای می‌باشد که در این منطقه چنین شرایطی فراهم نیست از اینرو این کانی از مواد مادری به ارث رسیده است (۱۵). در سولوم خاک‌رغ‌های مالی سول کلاله و آق امام و آلفی سول سیدمیران مقدار اسمکتیت و ورمیکولیت افزایش می‌یابد (جدول ۳). خرمالی و همکاران (۱۵) در این رابطه بیان می‌کنند که افزایش رطوبت قابل استفاده خاک و متعاقباً شستشوی نسبی برای رهایی  $K^+$  از کانی‌های میکا در محیط‌های آهکی با تحرک بالای منیزیم و سیلیسیم ممکن است شرایط مساعد را برای

این کانی‌ها هم‌منظور در مواد مادری غالب می‌باشند. کلریت و میکا دو کانی متداول در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که در این مناطق تشکیل خاک با محدودیت مواجه است (۴ و ۳۷). وجود این کانی‌ها در خاک‌ها تا حد زیادی به دلیل وجود آن‌ها در مواد مادری می‌باشد (۱۵). هر چند میکا می‌تواند از تثبیت K در لایه‌های اسمکتیت در شرایط گرم و خشک به وجود آید (۲۴) ولی در بیشتر مطالعات مربوط به لس از مواد مادری منشاء می‌گیرد. کائولینیت در مواد مادری و سولوم خاک تمام خاک‌رغ‌ها تقریباً به یک نسبت وجود

از ۲۰ درصد می‌باشد که این لس‌ها را لس‌های رسی می‌نامند. میانگین اندازه ذرات تابعی از حداکثر سرعت باد و فاصله از منشأ می‌باشد. علاوه بر این همانطور که بیان شد میزان هواپیدگی توسط بارش می‌تواند بر روی اندازه ذرات تاثیر بگذارد و تغییراتی در میزان کانی‌های اندازه سیلت و بخصوص رس به وجود آورد. از طرفی با درک تغییرات کانی‌های رسی می‌توان تغییرات وابسته به منبع، فرآیندهای انتقال و نوع اقلیم را از آنجایی که این تغییرات در این کانی‌ها ثبت می‌شوند را بدست آورد (۷). U-ratio و میانه اندازه ذرات به سمت مناطق با بارندگی بیشتر کاهش می‌یابد که این می‌تواند نشاندهنده کاهش سرعت باد و یا فاصله از منبع باشد (شکل ۲).

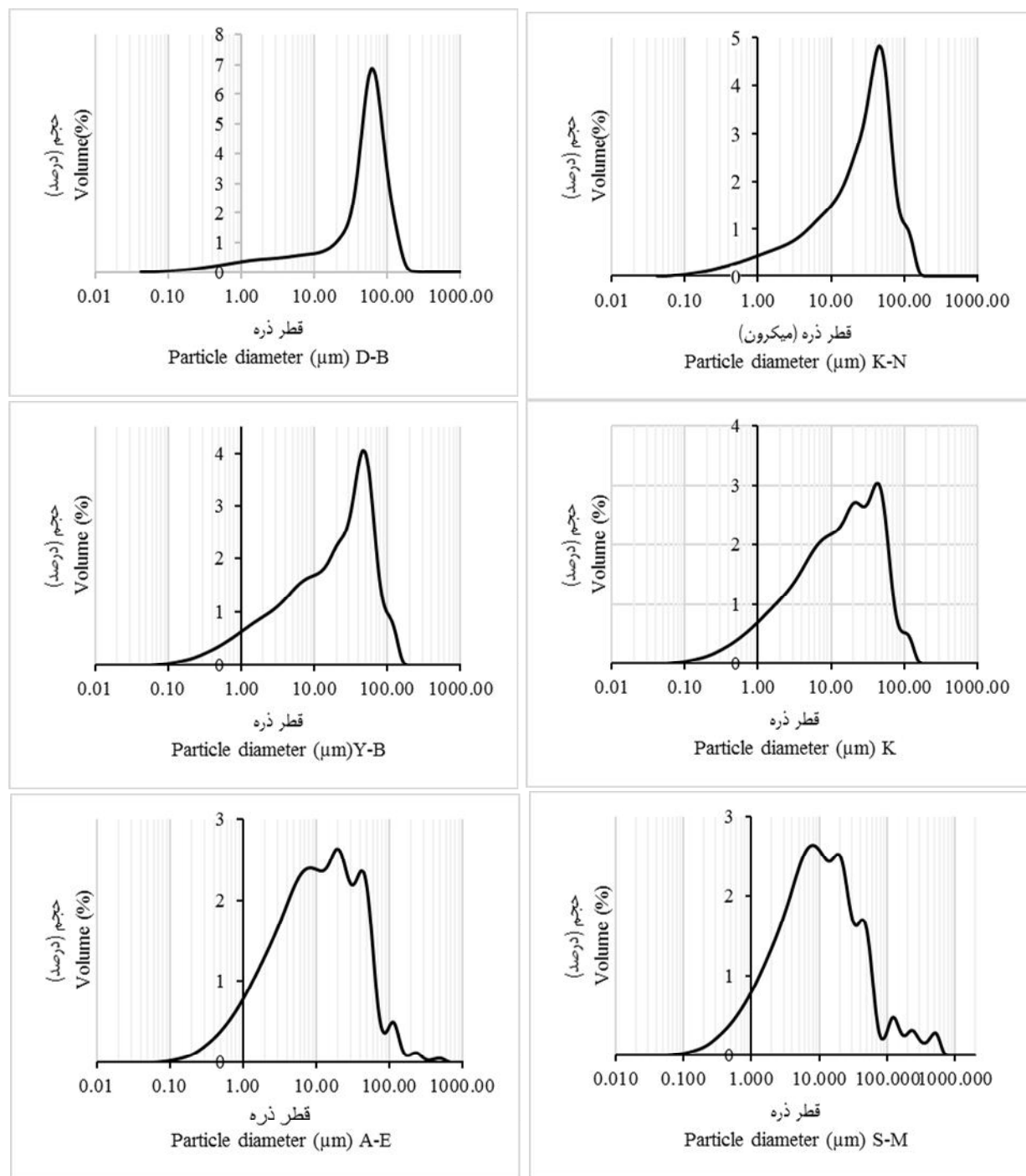
تغییر شکل اسمکتیت فراهم کرده باشد. عدم حضور و مقدار کمتر اسمکتیت و ورمیکولیت در مواد مادری این مناطق و افزایش آن در سولوم خاک نشان دهنده پدوژن بودن این کانی‌ها در این خاک‌ها می‌باشد. علاوه بر این مقدار میکا و کلریت در افق Bt خاک‌های آق‌امام و سیدمیران کاهش یافته و مقدار کانی‌های اسمکتیت، ورمیکولیت و کانی‌های مختلط افزایش یافته است که دلیل دیگری بر پدوژن بودن این کانی‌ها می‌باشد (جدول ۳).

داشلی برون را می‌توان لس شنی نامید، زیرا، بیش از ۲۰ درصد شن دارد. لس موجود در خالد نبی یک لس تیپیک است که مقدار رس و شن در آن کمتر از ۲۰ درصد می‌باشد. مقدار رس در خاک‌های بعدی با بارندگی بیشتر از خالد نبی و فاصله از منبع مقدار رس بیشتر



شکل ۲- تغییرات برخی پارامترهای توزیع اندازه ذرات با عمق که نشان داد میانه اندازه ذرات و U-ratio با افزایش بارندگی مقدارشان کاهش یافته است و مقدار رس و سیلت ریز افزایش یافته است.

Figure 2- Change in some grain size parameters with depth showed the medium grain size and U-ratio decreased from low rainfall regions to higher rainfall and clay and fine silt contents showed the reverse trend



شکل ۳- منحنی توزیع اندازه ذرات برای خاکرخ ها در طول گرادیان اقلیمی از تک نمایی در منطقه خشک تا چند نمایی در مناطق نیمه مرطوب  
Figure 3- Grain size distribution curves of the samples from arid region with unimodal to polymodal in semi-arid region.

مغناطیسی و پذیرفتاری وابسته به فرکانس در هر خاکرخ با افزایش بارندگی افزایش می‌یابد بطوریکه نسبت ذرات بسیار ریز در داشلی‌برون و خالد نبی با حداقل بارش در حدود ۰/۸۷ و در سید میران با بیشترین مقدار بارش به ۱/۶۳ می‌رسد (شکل ۴). افزایش ذرات ریز نشان‌دهنده فاصله از منبع و همینطور افزایش بارندگی

از سوی دیگر، به دلیل همزمانی تجمع رسوبات و خاکسازای استفاده از U-ratio برای سرعت باد دارای محدودیت‌هایی است و بهتر است از آن به عنوان شاخصی برای پایداری بافتی مواد مادری و تغییر در گسترش منابع گردوغبار استفاده شود. میانگین نسبت ذرات بسیار ریز (U<sub>fm</sub>) و همینطور پذیرفتاری

می‌باشد. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی هم با افزایش بارندگی زیاد و مقدار میانگین پذیرفتاری مغناطیسی از  $2/5 (10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg})$  در داشلی‌برون و خالدهی به  $10/1 (10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg})$  در سیدمیران می‌رسد. مقدار پذیرفتاری وابسته به فرکانس هم روند مشابهی با پذیرفتاری مغناطیسی دارد و مقدار میانگین آن در داشلی‌برون با کمترین مقدار بارش  $0/7$  درصد تا  $7/9$  درصد در آق‌امام و سیدمیران تغییر می‌کند (شکل ۴).

طبق گفته کهل و همکاران (۱۳) جهت باد در شمال ایران عمدتاً از اختلاف فشار بین گودی دریای خزر و ارتفاعات ایران مرکزی ناشی می‌شود. طوری که در تابستان توده هوای کم فشار قوی در بالای مناطق مرکزی ایران دلیل جریان هوای شمال غربی به شمال شرقی از دریای خزر و استپ‌های ترکمن می‌باشد و در زمستان جهت جریان عکس خواهد شد. همچنین میدلتون (۲۶) بیان کرد بادهای گرم و خشک در دامنه کوه البرز و کپه داغ به نام بادهای گرمسیر می‌تواند تشکیل شود که حجم وسیعی از گردوغبار و شن را وارد ترکمن صحرا کند از اینرو به دلیل نزدیکی خاکرخ داشلی‌برون به رود اترک و جهت باد شمال غرب به شمال شرق از سمت دریای خزر باعث تشکیل یک خاکرخ لسی شنی در داشلی‌برون شده است. کانی‌شناسی رسی ذرات داشلی‌برون هم همانند کانی‌شناسی رسی خاکرخ خالد نبی است با این تفاوت که داشلی‌برون بسیار به منبع خود که همان رود اترک است نزدیکتر می‌باشد و میانگین ذرات در آن بصورت یک تابع تک نمایی می‌باشد (شکل ۳). این نمودار برای داشلی‌برون نشان‌دهنده زیاد بودن سیلت درشت و شن می‌باشد که طبق گفته محققان بسیاری این ذرات تنها از طریق کشش و غلطیدن جابه‌جا می‌شوند (۳۴ و ۳۶). با افزایش بارندگی در خالد نبی و پیدا شدن افق B کمبیک جوان، درصد رس که نشان‌دهنده تکامل بیشتر این خاکرخ نسبت به خاکرخ داشلی‌برون می‌باشد افزایش می‌یابد. میانه اندازه ذرات که رابطه عکس با مقدار رس دارد در این خاکرخ کمتر از خاکرخ داشلی‌برون است که دلیل بر افزایش میزان تکامل این خاکرخ‌ها دارد علاوه بر این در افق C یا همان مواد مادری خاکرخ خالد نبی مقادیر بیشتری رس نسبت به خاکرخ داشلی‌برون وجود دارد که به دورتر شدن از منبع مربوط می‌باشد. ذرات رس می‌توانند چسبیده و در کنار ذرات درشت‌تر سیلت به این خاکرخ رسیده باشند.

نتایج کانی‌شناسی بخش رس (جدول ۳) در خاکرخ‌های داشلی‌برون، خالد نبی و یلی بدراغ نشان می‌دهد که این خاکرخ‌ها در مراحل ابتدایی تکامل هستند و تغییری در میزان کانی‌های رسی در این خاکرخ‌ها مشاهده نمی‌شود. از طرفی مقدار و نوع کانی‌ها در خاکرخ‌های گفته شده در بالا نشان از آن دارد که این خاکرخ‌ها باید منابع اولیه یکسان داشته باشند. از خالد نبی به یلی بدراغ بطور افقی ۱۱ کیلومتر فاصله وجود دارد و ارتفاع تقریباً برابر است و به سمت کلاله ارتفاع کم می‌گردد.

به نظر می‌رسد ذرات با باد غالب شمال غرب به شمال شرق به سمت خالد نبی منتقل شده و پس از آن با باد گرمسیری که از سمت کپه داغ جریان دارد از خالدهی به سمت یلی بدراغ و کلاله حرکت کرده باشد. همچنین ممکن است ذرات با باد غالب شمال غرب به شمال شرق به سمت خالد نبی، یلی بدراغ و کلاله حرکت کرده و به دلیل مسافت بیشتر یلی بدراغ و کلاله ذرات درشت آن، شن ریز و سیلت درشت با فاصله از منبع کمتر شده، از طرفی با افزایش مقدار بارندگی مقدار ذرات ریز از طریق پدوژن نیز بدان افزوده شده باشد. به نظر می‌رسد رسوبات پس از رسیدن به این نقطه توسط حرکت افقی توسط باد و همینطور از طریق حوزه‌های آبریز وارد گرگانرود که در نزدیکی شهر کلاله قرار دارد شده علاوه بر این رس‌های ایجاد شده در قتل البرز هم وارد این رود شده و از طریق این رود به نقاط داخلی‌تر استان گلستان حمل شده، و در دشت‌های گنبد کاووس، گرگان و آق‌قلا بصورت دشت سیلابی ته‌نشین شده باشد.

پس از ته‌نشینی رسوبات که توسط آب به منطقه گنبد کاووس و گرگان آورده شده است. از آنجا که با دور شدن از رود و نزدیک شدن به کوهپایه‌های البرز رسوبات ذرات ریز رس بیشتر می‌شوند. احتمالاً این ذرات با باد گرمسیری شمال به جنوب کپه داغ به سمت کوهپایه‌های البرز منتقل شده و در پای رشته‌کوه البرز انباشته شده‌اند. از طرفی از آنجاییکه که همه این خاکرخ‌ها در ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر هستند انتقال با فاصله زیاد منتفی است (۱۸) و انتقال نزدیک سطح زمین برای همه ذرات محتمل‌تر به نظر می‌رسد. و ذرات رس از طریق چسبیدن به ذرات درشت‌تر و یا پدوژن به خاک اضافه شده است (۲۸ و ۳۱). از طرفی کانی‌شناسی رسی خاکرخ‌های آق‌امام و سید میران شبیه هم است و کانی‌های رسی این خاکرخ‌ها میکا، کلریت و کائولینیت، اسمکتیت و ورمیکولیت می‌باشد. در مواد مادری هر دوی این خاکرخ‌ها مقادیر میکا، کلریت، کائولینیت و اسمکتیت با هم برابر است. از طرفی کانی‌شناسی بخش سیلت در مواد مادری دو خاکرخ گفته شده به ثابت بودن مقادیر کوارتز، پلاژیوکلاز، و فلدسپار پتاسیم اشاره دارد (جدول ۴). عمده تغییر کانی‌شناسی بخش سیلت با حرکت در طول شیب اقلیمی از منطقه خشک به مرطوب، تغییر در مقدار کانی کلریت بود که در افق‌هایی که تجمع کریستال‌های ثانویه (افق کلسیت) داشتند بخصوص در مناطق با بارندگی بیشتر، افزایش می‌یافت.

جدول ۳- تخمین نیمه کمی کانی‌شناسی رسی در خاک‌های مورد مطالعه  
Table 3- Semiquantitative analyses of clay minerals in the studied soils.

| خاکرخ<br>Pedon   | افق<br>Horizon   | میکا<br>mica | کلریت<br>Chlorite | اسمکتیت<br>Smectite | کائولینیت<br>Kaolinite | ورمیکولیت<br>Vermiculite | کانی‌های مختلط<br>Mixed minerals |
|------------------|------------------|--------------|-------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| داشلی برون (D-B) | A                | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| داشلی برون (D-B) | Cy               | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| خالد نبی (K-N)   | A                | +++          | +++               | -                   | +                      | +                        | -                                |
| خالد نبی (K-N)   | Bw               | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| خالد نبی (K-N)   | Cy               | +++          | ++                | +                   | +                      | -                        | ++                               |
| یلی بدراغ (Y-B)  | A                | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| یلی بدراغ (Y-B)  | Bky <sub>2</sub> | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| یلی بدراغ (Y-B)  | C                | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| کلاله (K)        | A                | +++          | +++               | +                   | +                      | -                        | -                                |
| کلاله (K)        | Bk <sub>2</sub>  | +++          | ++                | ++                  | +                      | +                        | -                                |
| کلاله (K)        | C                | +++          | ++                | -                   | +                      | -                        | ++                               |
| آق امام (A-E)    | A                | +++          | +                 | ++                  | +                      | ++                       | -                                |
| آق امام (A-E)    | Bt               | ++           | +                 | +++                 | +                      | ++                       | +                                |
| آق امام (A-E)    | Bk               | +++          | ++                | ++                  | +                      | -                        | -                                |
| سید میران (S-M)  | A                | +++          | +                 | ++                  | +                      | +++                      | -                                |
| سید میران (S-M)  | Bt               | ++           | +                 | +++                 | +                      | ++                       | +                                |
| سید میران (S-M)  | Ck               | +++          | ++                | +++                 | +                      | -                        | -                                |

\* عدم حضور: -، ۱۵ درصد: +، ۳۰-۱۵ درصد: ++، ۵۰-۳۰ درصد: +++، ۵۰ درصد: ++++  
 +: <10%، ++: 15-30%، +++: 30-50%، ++++: >50%  
 -: not present

جدول ۴- نتایج کانی‌شناسی بخش سیلت در خاکرخ‌های مورد مطالعه  
Table 4- Semiquantitative analyses of silt minerals in the studied soils.

| خاکرخ<br>Pedon  | افق<br>Horizon  | کوارتز<br>Quartz | کلسیت<br>Calcite | پلاژیوکلاز<br>Plagioclase | فلدسپار پتاسیم‌دار<br>Potassium feldspar | میکا<br>mica | کلریت<br>Chlorite |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------|---------------------------|------------------------------------------|--------------|-------------------|
| خالد نبی (K-N)  | A               | +++              | -                | ++                        | +                                        | +            | +                 |
| خالد نبی (K-N)  | Bw              | +++              | -                | ++                        | -                                        | +            | +                 |
| خالد نبی (K-N)  | Cy              | +++              | -                | ++                        | +                                        | +            | +                 |
| کلاله (K)       | A               | ++++             | -                | ++                        | +                                        | +            | +                 |
| کلاله (K)       | Bk <sub>1</sub> | +++              | -                | ++                        | -                                        | -            | +++               |
| آق امام (A-E)   | A               | +++              | -                | ++                        | -                                        | +            | +                 |
| آق امام (A-E)   | Bt              | +++              | -                | ++                        | +                                        | +            | +                 |
| آق امام (A-E)   | Bk              | +++              | -                | ++                        | +                                        | +            | +++               |
| سید میران (S-M) | A               | +++              | -                | ++                        | +                                        | +            | +                 |
| سید میران (S-M) | Bt              | +++              | -                | +++                       | +                                        | +            | +                 |
| سید میران (S-M) | Ck              | +++              | ++               | ++                        | +                                        | -            | ++                |

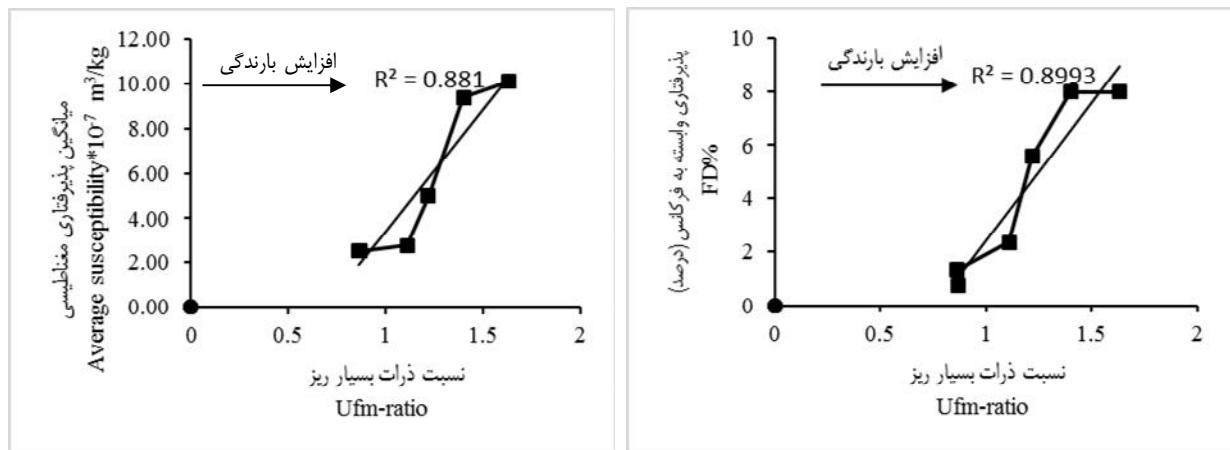
\* عدم حضور: -، ۱۵ درصد: +، ۳۰-۱۵ درصد: ++، ۵۰-۳۰ درصد: +++، ۵۰ درصد: ++++  
 +: <10%، ++: 15-30%، +++: 30-50%، ++++: >50%  
 -: not present

سطحی و به خصوص افق تجمع رس در آن زیادتر است که موجب کاهش مقادیر برخی کانی‌های بخش رس و سیلت و تبدیل شدن آن به کانی‌های دیگر شده است. بطوریکه کلریت شرایط تبدیل شدن به

در اثر افزایش بارندگی در رژیم حاکم در این منطقه تغییراتی در میزان کانی‌های این منطقه در افق‌های سطحی و افق تجمع رس Bt وجود دارد. بطوریکه مقادیر اسمکتیت و ورمیکولیت در افق‌های

شاخصی از یکی بودن منبع این خاکرخ‌ها دلالت کند. از طرفی کانی‌های پایدار کوارتز و پلاژیوکلاز در ذرات بخش سیلت هم به دلیل مقاومت بالا برای هوازدگی می‌تواند شاخص مناسبی مانند کائولینیت در بخش سیلت باشد. از طرفی این رسوبات به احتمال زیاد نباید تحت آب گرفتگی قرار گرفته باشند. چرا که اگر تحت تاثیر شرایط احیایی قرار گرفته باشند مقدار پذیرفتاری مغناطیس آنها باید کاهش پیدا می‌کرد (۱۱ و ۳۳) در حالی که طبق شکل ۴ مقدار پذیرفتاری مغناطیسی و پذیرفتاری وابسته به فرکانس در مواد مادری خاکرخ‌های آق امام و سید میران بیشتر است که نشان می‌دهد به احتمال زیاد یا بلافاصله بعد از نشست رسوبات در دشت سیلابی فرآیند انتقال صورت گرفته و یا در این مناطق وضعیت زهکشی خوب بوده است.

ورمیکولیت و میکا شرایط تبدیل شدن به اسمکتیت را دارد. عمده تغییر کانی‌شناسی بخش سیلت با حرکت در طول شیب اقلیمی از منطقه خشک به مرطوب، تغییر در مقدار کانی کلریت بود که در افق‌هایی که تجمع کریستال‌های ثانویه (افق کلسیت) داشتند بخصوص در مناطق با بارندگی بیشتر، افزایش یافت. ولی مقدار کانی کائولینیت تقریباً در تمام خاکرخ‌ها ثابت است. این کانی در این خاکرخ‌ها از مواد مادری به ارث رسیده و در همه افق‌ها وجود دارد، این کانی می‌تواند در شرایط خاصی به کانی دیگر تبدیل شود و همینطور در خاک تشکیل شود و در این حالت نیاز به اقلیم گرم حاره دارد. با توجه به شرایط آب و هوایی که طی مطالعاتی که تاکنون انجام شده از حدود ۲۰۰ هزار سال قبل اقلیم در منطقه لسی شمال ایران شبیه به عصر کنونی است و اقلیم حاره‌ای حکمفرما نبوده است پس تشکیل این کانی منتفی است (۱۵ و ۳۵). از اینرو این کانی می‌تواند به عنوان



شکل ۴- ارتباط بین ذرات بسیار ریز با پذیرفتاری مغناطیسی و پذیرفتاری وابسته به فرکانس در طول گرادیان اقلیمی  
Figure 4- Relation between Ufm-Ratio and Percentage of frequency dependent Susceptibility (FD %) and Average susceptibility.

## منابع

- Buggle B., Hambach U., Glaser B., Gerasimenko N., Markovic S.B., Glaser I., and Zöller L. 2009. Stratigraphy and spatial and temporal paleoclimatic trends in Southeastern/Eastern European loess paleosol sequences. *Quaternary International*, 196(1-2): 86-106.
- Chen T., Xu H., Xie Q., Chen J., Ji J., and Lu H. 2005. Characteristics and genesis of maghemite in Chinese loess and paleosols: mechanism for magnetic susceptibility enhancement in paleosols. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3-4): 790-802.
- Evans M., and Heller F. 2001. Magnetism of loess/palaeosol sequences: recent developments. *Earth-Science Reviews*, 54(1-3): 129-144.
- Fanning D.S., Keramidas V.S., and El-Desoky M.A. 1989. Micas. In: Dixon, J.B., Weed, S.B. (ed.), *Minerals in Soil Environments*. 2<sup>nd</sup> ed. Soil Science Society of America Journal Madison, WI
- Frechen M., Kehl M., Rolf C., Sarvati R., and Skowronek A. 2009. Loess chronology of the Caspian Lowland in Northern Iran. *Quaternary International*, 198(1-2): 220-223.
- Glaccum R.A. and Prospero J.M. 1980. Saharan aerosols over the tropical North Atlantic-Mineralogy. *Marine geology*, 37(3-4): 295-321.
- Gylesjö S., and Arnold E. 2006. Clay mineralogy of a red clay-loess sequence from Lingtai, the Chinese Loess Plateau. *Global and Planetary Change*, 51: 181-194.



- 8- Hartge K. 1978. Structural stability as a function of some soil properties. p. 217-223. In *Modification of Soil Structure*. Emerson, W.W. et al., (ed). J.W. Wiley, New York.
- 9- Jackson M.L. 1975. *Soil Chemical Analysis. Advanced Course*. University of Wisconsin, College of Agriculture, Department of Soils, Madison, Wisconsin
- 10- Johns W.D., Grim R.E., and Bradley W.F. 1954. Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods. *Journal of Sedimentary Research*, 24(4).
- 11- Karimi A., Khademi H., and Ayoubi S. 2013. Magnetic susceptibility and morphological characteristics of a loess-paleosol sequence in northeastern Iran. *Catena*, 101: 56-60.
- 12- Kehl M. 2010. Quaternary loesses, loess-like sediments, soils and climate change in Iran, Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- 13- Kehl M., Sarvati R., Ahmadi H., Frechen M., and Skowronek A. 2005. Loess paleosol-sequences along a climatic gradient in Northern Iran. *E and G- Quaternary Science Journal*, 55(1).
- 14- Khormali F., Ghergherechi S., Kehl M., and Ayoubi S. 2012. Soil formation in loess-derived soils along a subhumid to humid climate gradient, Northeastern Iran. *Geoderma*, 179: 113-122.
- 15- Khormali F. and Kehl M. 2011. Micromorphology and development of loess-derived surface and buried soils along a precipitation gradient in Northern Iran. *Quaternary International*, 234(1-2): 109-123.
- 16- Kittrick J. and Hope E. 1963. A procedure for particle size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5): 319-325.
- 17- Kravchinsky V.A., Valentina S.Z., and Vladimir S.Z. 2008. Magnetic indicator of global paleoclimate cycles in Siberian loess-paleosol sequences. *Earth and Planetary Science Letters*, 265(3-4): 498-514.
- 18- Lateef A. 1988. Distribution, provenance, age and paleoclimatic record of the loess in Central North Iran. p. 93-101. *Loess-Its Distribution, Geology and Soil*. Rotterdam, Balkema.
- 19- Lauer T., Vlamincq S., Frechen M., Rolf C., Kehl M., Sharifi J., and Khormali F. 2017. The Agh Band loess-palaeosol sequence- A terrestrial archive for climatic shifts during the last and penultimate glacial-interglacial cycles in a semiarid region in northern Iran. *Quaternary International*, 429: 13-30.
- 20- Liu X.M., Rolph T., Bloemendal J., Shaw J., and Liu T.S. 1995. Quantitative estimates of palaeoprecipitation at Xifeng, in the Loess Plateau of China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113(2-4): 243-248.
- 21- Machalett B., Oches E.A., Frechen M., Zöller L., Hambach U., Mavlyanova N.G., Markovic S., and Endlicher W. 2008. Aeolian dust dynamics in central Asia during the Pleistocene: Driven by the long-term migration, seasonality, and permanency of the Asiatic polar front. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(8).
- 22- Maher B.A., Alekseev A., and Alekseeva T. 2003. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201(3-4): 321-341.
- 23- Maher B.A., Thompson R., and Zhou L.P. 1994. Spatial and temporal reconstructions of changes in the Asian palaeomonsoon: a new mineral magnetic approach. *Earth and Planetary Science Letters*, 125(1-4): 461-471.
- 24- Mahjoory R.A. 1975. Clay Mineralogy, Physical, and Chemical Properties of Some Soils in Arid Regions of Iran. *Soil Science Society of America Journal*, 39(6): 1157-1164.
- 25- Mehra O. and Jackson M. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays and clay minerals: proceedings of the Seventh National Conference*, Elsevier.
- 26- Middleton, N. 1986. A geography of dust storms in South-west Asia. *International Journal of Climatology*, 6(2): 183-196.
- 27- Novothny Á., Frechen M., Horváth E., Wacha L., and Rolf C. 2011. Investigating the penultimate and last glacial cycles of the Süttő loess section (Hungary) using luminescence dating, high-resolution grain size, and magnetic susceptibility data. *Quaternary International*, 234(1-2): 75-85.
- 28- Pye K. 1987. *Aeolian Dust and Dust Deposits*, Academic Press, Géographie physique et Quaternaire, 42(2): 205-206.
- 29- Rolf C., Hambach U., Novothny A., Horvath E., and Schnepf E. 2014. Dating of a Last Glacial loess sequence by relative geomagnetic palaeointensity: a case study from the Middle Danube Basin (Süttő, Hungary). *Quaternary International*, 319: 99-108.
- 30- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil Taxonomy*, 12<sup>th</sup> ed. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- 31- Sun D.H., Su R.X., Li Z.J., and Lu H.Y. 2011. The ultrafine component in Chinese loess and its variation over the past 7· 6 Ma: implications for the history of pedogenesis. *Sedimentology*, 58(4): 916-935.
- 32- Tsoar H. and K. Pye. 1987. "Dust transport and the question of desert loess formation." *Sedimentology* 34(1): 139-153.
- 33- Valaee M., Ayoubi S., Khormali F., Lu S.G., and Karimzadeh, H.R. 2016. Using magnetic susceptibility to discriminate between soil moisture regimes in selected loess and loess-like soils in northern Iran. *Journal of Applied Geophysics*, 127: 23-30.
- 34- Vandenberghe J. 2013. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process

- identification. *Earth-Science Reviews*, 121: 18-30.
- 35- Vlaminc S., Kehl M., Lauer T., Shahriari A., Sharifi J., Eckmeier E., Lehndorff E., Khormali F., and Frechen M. 2016. Loess-soil sequence at Toshan (Northern Iran): Insights into late Pleistocene climate change. *Quaternary International*, 399: 122-135.
- 36- Wang X., Wei H., Khormali F., Taheri M., Kehl M., Frechen M., Lauer T., and Chen F. 2017. Grain-size distribution of Pleistocene loess deposits in northern Iran and its palaeoclimatic implications. *Quaternary International*, 429: 41-51.
- 37- Wilson, M. 1999. The origin and formation of clay minerals in soils: past, present and future perspectives. *Clay Minerals*, 34(1): 7-25.
- 38- Windom, H. L. 1975. Eolian contributions to marine sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 45(2).



## Grain Size and Mineralogy Variations along the Climatic Gradient on the Surface Loess-Derived Soils in Northern Iran

J. Sharifi Garmdareh<sup>1</sup> - F. Khormali<sup>2\*</sup> - M. Kehl<sup>3</sup> - C. Rolf<sup>4</sup> - A. Shahriari<sup>5</sup> - M. Frechen<sup>6</sup>

Received: 09-10-2017

Accepted: 16-07-2018

**Introduction:** The study of the northern Iranian loess is important since they are located in the middle of the Asian and European loess belt. In addition, presence of a climatic gradient i.e. increases in rainfall from north to south and from west to east, and the constant temperature, provide a unique area to study climate change and environmental conditions. There are many recent studies on loess-palaeosol sequences in this region, that show the grain size variation and clay mineralogy changed with increasing precipitation. The purpose of this study was to investigate the trend of grain size variations and clay mineralogy in this climatic gradient to infer origin of the surface loess in this region.

**Methods and Materials:** Grain size and XRD analyses were carried out on six soil profiles extending from low precipitation in DashliBorun (200mm) to high precipitation in SeyyedMiran (670mm) regions. The grain size analysis was carried out with Beckman-Coulter LS 13320 PIDS. The device uses the principle of the forward scattering of monochromatic light and its diffraction under a certain angle. The angle of diffraction is inversely proportional to particle size. That means coarser particles cause a smaller angle of diffraction compared to finer particles. This method is quick, its results offer a good reproducibility and the data are digital and direct. Necessity for only small amounts of sample material, and covering a wide range from 0.4 to 2000  $\mu$ m in diameter are other advantages of this method. Nevertheless, the amount of clay percentage may be subjected to certain underestimations because particles smaller than 0.4  $\mu$ m diffract light in all directions that can cause problems with detecting the signal correctly. Hence the sum of particles with less than 5.5  $\mu$ m in diameter were chosen as an estimate of clay percentage. Clay fractions were separated based on the methodology outlined by Kittrick and Hope (1963) and Jackson (1975). The carbonates were initially removed using 1 N sodium acetate buffered at pH 5. The organic matter was then oxidized by treating the carbonate-free soils with 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, and digestion in a water bath. Free iron oxides were removed from samples by the citrate dithionate method of Mehra and Jackson (1960). The clay separates were removed by centrifuge and studied by a Bruker D8 Advance X-ray diffractometer. Clay minerals were estimated semi-quantitatively from the relative x-ray peak areas of glycol-treated samples.

**Result and Discussion:** The grain size analysis by laser diffraction method showed that the amount of clay (12.09 %) and fine silt (7.03%) in the soil located in Dashlibron (200 mm/yr) profile had the lowest amount and the U-ratio (6.35) and the medium grain-sized particle (48.28  $\mu$ m) had the highest amount during this climatic gradient. Increasing precipitation had clear impact on these parameters, so that the maximum amount of clay (36.56 %) and fine silt (28.02%) and the minimum amount of U-ratio (1.00) and the average medium grain size (8.78  $\mu$ m) were observed in SayedMiran profile with the highest precipitation (670 mm/yr). Clay mineralogical study of soil parent material showed mica, chlorite, kaolinite and smectite as dominant minerals in the soils. As the amount of precipitation increases along the climate gradient, the amount of pedogenic vermiculite and smectite increase. Silt minerals included quartz, plagioclase, potassium feldspar, mica, chlorite and calcite. The amount of quartz, plagioclase or potassium feldspar minerals did not change in parent materials. The average medium grain size and U-ratio are function of the maximum wind speed and distance from the source. In addition, weathering can affect the size of the particles and cause changes in the mineralogy and amount of minerals in the size of the silt and clay fractions. On the other hand, understanding the changes of clay minerals can provide origin-dependent changes, transport processes, and climatic variations as they are recorded in these minerals.

**Conclusion:** In general, it can be concluded that the medium grain size and U-ratio decreased from low

1 and 2- Ph.D. student and Professor, Department of Water and Soil engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

(\*- Corresponding Author Email: fkhormali@gau.ac.ir)

3- Professor, Institute of Geography, Faculty of Mathematics and Natural Sciences University of Cologne, Cologne, Germany

4- Professor, Department of Rock Physics and Borehole Geophysics, Leibniz Institute for Applied Geophysics, Hannover, Germany

5- Assistant Professor, Department of Water and Soil Science, University of Zabol, Zabol, Iran

6- Professor, Department of Geochronology, Leibniz Institute for Applied Geophysics, Hannover, Germany

rainfall regions to higher rainfall and clay and fine silt contents showed a reverse trend. Clay minerals included mica, chlorite, and kaolinite and dominant silt minerals were quartz and plagioclase in all studied soil profiles along the climatic gradients. The results showed that changes in grain size reflect the distance from the loess material sources and also indicate intensity of pedogenic processes. Mineralogical analysis showed the similar mineral types in all loess parent materials of different regions, probably indicating the similar sources for the loess. The change in minerals abundances in the upper horizons indicate the pedogenic processes affected by climatic conditions along the climate gradient.

**Keywords:** Clay and silt mineralogy, Climate and Northern Iranian loess deposits, Grain size



## نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک (مطالعه موردی: مریوان، استان کردستان)

شلیر اسکندری<sup>۱</sup> - کمال نبی‌اللهی<sup>۲\*</sup> - روح‌الله تقی‌زاده مهرجردی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

### چکیده

کربن آلی خاک یکی از خصوصیات مهم خاک می‌باشد که اطلاعات پیرامون تغییرات مکانی آن جهت مدیریت زراعی، تخریب اراضی و مطالعات زیست محیطی حائز اهمیت می‌باشد. هدف از این پژوهش استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی برای تهیه نقشه کربن آلی خاک می‌باشد. بنابراین، تعداد ۱۳۷ نمونه خاک از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک‌های منطقه مریوان استان کردستان برداشت شده و خصوصیت کربن آلی خاک اندازه‌گیری شد. متغیرهای محیطی که در این پژوهش استفاده شد شامل اجزاء سرزمین و داده‌های تصویر ETM<sup>+</sup> ماهواره لندست می‌باشد. جهت ارتباط دادن بین کربن آلی خاک و متغیرهای کمکی، از مدل شبکه عصبی مصنوعی بهره گرفته شد. بر اساس نتایج آنالیز حساسیت به روش رگر، برای پیش‌بینی کربن آلی خاک، متغیرهای کمکی شامل شاخص خیزی، شاخص همواری دره، فاکتور LS، شاخص NDVI و باند ۳ مهم‌ترین بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی دارای ۰/۸۰، ۰/۰۱- و ۰/۶۷ به ترتیب برای ضریب تبیین، میانگین خطا و میانگین ریشه مربعات خطا می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود که جهت تهیه نقشه رقومی خاک از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی در مطالعات آینده استفاده شود.

**واژه‌های کلیدی:** متغیرهای محیطی، تغییرات مکانی، نقشه برداری رقومی

### مقدمه

می‌شوند (۱۹). مک براتنی و همکاران (۱۹) یک چهارچوب پیش‌بینی کننده با ارزش برای تخمین تغییرپذیری خاک در مناطق با داده‌های محدود خاک از طریق ترکیب اندازه‌گیری‌های مستقیم خصوصیات خاک با یکسری داده‌های کمکی سهل‌الوصول ارائه کردند. داده‌های کمکی جهت افزایش صحت پیش‌بینی خصوصیات خاک از طریق مشاهدات مستقیم محدود به کار می‌روند. بر اساس مطالعات پیشین نقشه مدل رقومی ارتفاع، داده‌های سنجش از دور از جمله مهم‌ترین داده‌های کمی هستند که جهت پیش‌بینی خصوصیات خاک می‌توانند مفید باشند (۳۱، ۱، ۸) در سال‌های اخیر، تکنیک‌های مختلفی همچون جنگل تصادفی (۲۳)، فازی (۱۱)، شبکه عصبی مصنوعی (۲۹، ۳۷، ۷)، رگرسیون درختی (۱۳)، رگرسیون لجستیک (۳۲، ۱۲) و زمین آمار (۲۴ و ۳۳) توسط محققین جهت نقشه‌برداری رقومی به کار برده شده است.

شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان یکی از معمول‌ترین تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی با شبیه‌سازی و الهام از مطالعه سیستم مغز و شبکه عصبی موجودات زنده اشتقاق یافته است (۲۰). در این روش سعی می‌شود، بر اساس روابط ذاتی میان داده‌ها، مدلی خطی یا غیرخطی بین متغیرهای مستقل و وابسته برقرار شود. (۱۷). مبنای این شبکه‌ها روش‌های داده‌کاوی هستند که بر مبنای قواعد و

کربن آلی خاک یک شاخص مهم در ارزیابی حاصلخیزی خاک و تخریب اراضی می‌باشد که تاثیر زیادی بر روی خصوصیات خاک دارد (۱۶). اقدامات انجام شده برای پایش و ارزیابی کربن آلی خاک، به طور فزاینده‌ای در سطح دنیا در حال گسترش است. این در حالی است که نمونه‌برداری مستقیم همراه با اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی یا صحرایی، معمولاً، پرهزینه و وقت‌گیر بوده و در نتیجه، برای اهداف کاربردی دارای محدودیت است. از این رو نیاز به روش‌هایی احساس می‌شود که بتواند براحتی سطح گسترده‌ای از مناطق را پایش کرده و روند تغییرات کربن آلی خاک را مورد بررسی قرار دهد. یکی از راه‌های چاره جهت غلبه بر این چالش استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک است. در نقشه‌برداری رقومی خاک، خصوصیات خاک بر اساس ارتباطشان با متغیرهای محیطی به صورت رقومی نقشه‌برداری

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

(\*)- نویسنده مسئول: (Email: k.nabiollahi@uok.ac.ir)

۳- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اردکان

پیش‌بینی کربن آلی خاک با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی در منطقه مریوان استان کردستان است.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه حوضه‌ای با وسعت ۲۰۰۰۰ هکتار بوده که در شهرستان مریوان در استان کردستان واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارندگی سالیانه ۹۱۳ میلیمتر و متوسط درجه حرارت سالیانه ۱۳/۸ درجه سانتی گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب زیریک و مزیک می‌باشد. واحدهای فیزیوگرافی منطقه شامل دشت‌های دامنه‌ای، کوه و تپه و کاربری‌های اصلی منطقه شامل زراعت، جنگل و تالاب می‌باشد.

### نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی

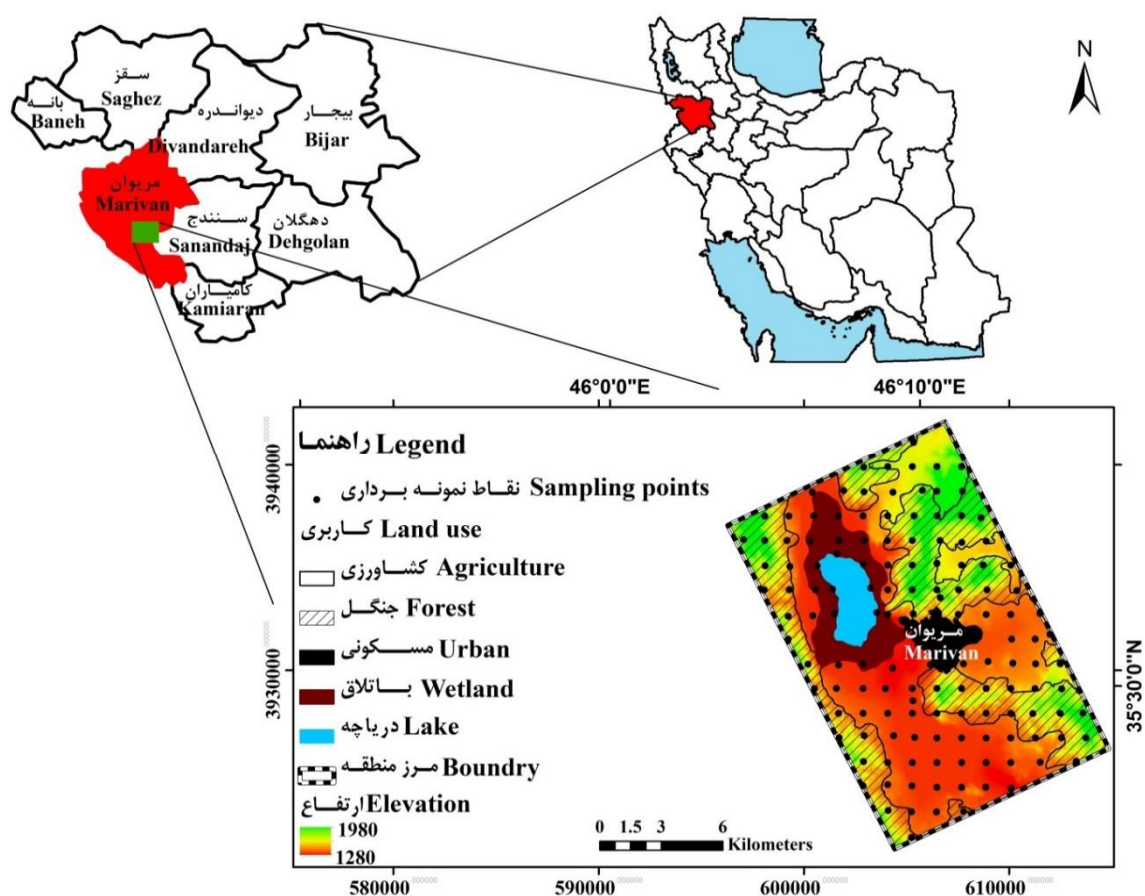
بر اساس متغیرهای کمکی همچون نقشه کاربری و مدل رقومی ارتفاع محل ۱۳۷ نمونه به روش تصادفی طبقه‌بندی شده در منطقه مریوان استان کردستان به وسعت ۲۰۰۰۰ هکتار انتخاب شده و سپس نمونه‌برداری از عمق ۳۰-۵۰ سانتی‌متری صورت گرفت (شکل ۱). نمونه‌های خاک پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلیمتری کربن آلی خاک به روش تیتراسیون (۲۱) اندازه‌گیری شد.

### داده‌های کمکی توپوگرافی و سنجش از دور

در نقشه‌برداری رقومی خاک، علاوه بر داده‌های خاک نیاز به داده‌های کمکی می‌باشد. در مطالعه حاضر از مدل رقومی ارتفاع سازمان زمین‌شناسی آمریکا (رزولیشن ۹۰ متر) استفاده گردید. بعد از آماده کردن مدل رقومی ارتفاع، از آن برای استخراج کردن اطلاعات کمکی استفاده گردید. پارامترهای زمین‌نما (۱۵ پارامتر) شامل فاکتور LS<sup>۱</sup>، شاخص خیزی، شاخص همواری دره، شیب، ارتفاع، انحنای پروفیلی، انحنای سطح، انحنای عمق دره، موقعیت نسبی شیب، مساحت حوضه آبخیز، الگوی خمیدگی، مشخصات خمیدگی، خمیدگی کلی، بیشترین و کمترین خمیدگی در محیط سامانه جغرافیایی ساگا محاسبه و استخراج گردید. روش استخراج تمام پارامترهای مزبور در روش ارائه شده توسط هنگل و همکاران (۱۰) تشریح گردیده است. همچنین در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده ETM<sup>+</sup> استفاده گردید. تصاویر این سنجنده مربوط به تابستان ۱۳۹۴ (هم‌زمان با زمان نمونه‌برداری از خاک) می‌باشد.

قوانین ریاضی عمل می‌کنند. یکی از نکات مثبت شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی بررسی ارتباط بین حجم و تعداد زیادی از داده‌ها بدون هیچ اطلاع قبلی در مورد ارتباط بین آنها است (۱۸). شبکه‌های هوشمند عصبی دارای قابلیت برآورد خوبی هستند و به عنوان پردازش‌گرهایی هوشمند و موفق در پیش‌بینی خصوصیات خاک نتایج خوبی ارائه داده‌اند و می‌توانند فرآیند تصمیم‌گیری در مسائل خاک را آسان کنند. ایوبی و همکاران (۲) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی کربن آلی خاک را در دو منطقه سمیرم و لردگان پیش‌بینی و ضریب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۸۴ به ترتیب برای این مناطق گزارش کرده و نشان دادند که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی با دقت بالا و قابل قبولی توانایی تخمین کربن آلی خاک را بر اساس داده‌های کمکی دارند. رادیانتو و همکاران (۲۶) با استفاده از سه مدل شبکه عصبی مصنوعی، جنگل تصادفی و رگرسیون درختی نقشه رقومی کربن آلی خاک را در دو منطقه در اندونزی تهیه کردند و به ترتیب ضرایب تبیین ۰/۸۶-۰/۵۹، ۰/۹۸-۰/۹۳ و ۰/۹۹-۰/۹۵ را برای این مدل‌ها گزارش نمودند. غلامعلی‌زاده آهنگر (۹) با مقایسه روش‌های رگرسیون خطی، زمین‌آمار و شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی کربن آلی در اراضی خشک دشت سیستان، تنها ۵ درصد تغییرات کربن آلی در منطقه مورد مطالعه توسط متغیرهای موجود در مدل رگرسیون خطی توجیه گردید (ضریب تبیین ۰/۵). همچنین بهترین روش زمین‌آمار، یعنی کوکریجینگ ساده با استفاده از متغیر کمکی رس، با ضریب تبیین ۰/۲۳ فقط تا اندازه‌های توانایی تخمین میزان کربن آلی را داشت. این در صورتی است که شبکه عصبی مصنوعی کارایی بسیار بهتری با ضریب تبیین ۰/۷۹ در تخمین مقدار کربن آلی نسبت به روش‌های رگرسیون خطی و زمین‌آمار داشت. ملون و همکاران (۱۵) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و داده‌های کمکی (باند‌های تصاویر ماهواره‌ای و مشتقات مدل رقومی ارتفاع) نقشه رقومی کربن آلی خاک را تهیه و ضریب همبستگی ۰/۴۴ و ۰/۲۰ را به ترتیب برای مرحله آموزش و تست گزارش کردند.

منطقه مریوان در استان کردستان جزو مناطق جنگلی زاگرس می‌باشد که با توجه به افزایش جمعیت در چند دهه اخیر و متعاقباً افزایش نیاز به غذا مورد تهدید قرار گرفته و متأسفانه بخش‌های از آن تحت کشت زراعت رفته است. از طرف دیگر هم استان کردستان یکی از قطب‌های مهم کشاورزی در ایران است که بایستی بخش کشاورزی آن مورد توجه قرار گیرد. لذا تهیه نقشه کربن آلی خاک جهت افزایش تولید محصولات و مدیریت بهتر اراضی در مناطق جنگلی و جلوگیری از تخریب اراضی ضروری می‌باشد، اما متأسفانه هیچ گونه نقشه جامع در سطح استان وجود ندارد که چنین اطلاعاتی را در اختیار ما قرار دهد. از طرفی هم تهیه نقشه کربن آلی خاک زمان‌بر و هزینه‌بر است. لذا جهت غلبه بر این مشکل کاربرد نقشه-برداری رقومی می‌تواند مفید واقع شود. بنابراین هدف از این مطالعه



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعاتی و پراکنش مکانی نقاط نمونه‌برداری  
Figure 1- Location of study area and spatial variability of sample points

لایه‌های اطلاعاتی موثر در فرآیند پیش‌بینی حائز اهمیت می‌باشد. بسیاری از روش‌ها برای انتخاب ویژگی‌ها در دهه اخیر معرفی شده‌اند. الگوریتم‌های انتخاب ویژگی بسته به روند ارزیابی آن‌ها به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند. اگر انتخاب ویژگی مستقل از هر گونه الگوریتم یادگیری انجام شود (یعنی به صورت پیش‌پردازنده کاملاً مجزا)، آن را روش فیلتر یا حلقه باز می‌گویند. در این مورد ویژگی‌های نامطلوب قبل از استنتاج دور ریخته می‌شوند. اما، اگر روند ارزیابی با یک الگوریتم طبقه‌بندی در ارتباط باشد، روش انتخاب ویژگی را روش رپر<sup>۳</sup> یا حلقه بسته می‌نامند. این روش، جستجو در فضای زیرمجموعه‌ها را بر اساس تخمین دقت ناشی از انتخاب یک زیرمجموعه خاص، تحت شرایط الگوریتم طبقه‌بندی مورد استفاده انجام می‌دهد. الگوریتم‌های دسته دوم معمولاً نتایج بهتری به دست می‌دهند. مهم‌ترین بخش در روش انتخاب ویژگی حلقه بسته، الگوریتم جستجویی است که در آن به کار رفته است. در این مقاله از روش رپر با الگوریتم جستجوی تکاملی از نوع الگوریتم ژنتیک استفاده گردید. این روش به جعبه سیاه

این تصویر از باندهای (باند ۱: ۴۵-۵۲/۰ میکرومتر، باند ۲: ۵۲-۶۰/۰ میکرومتر، باند ۳: ۶۳-۶۹/۰ میکرومتر، باند ۴: ۷۶-۹۰/۰ میکرومتر، باند ۵: ۵۵-۷۵/۱ میکرومتر، باند ۷: ۰۸-۲۵/۲ میکرومتر) تشکیل شده است. همچنین شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و روشیابی (BI<sup>۲</sup>) نیز با استفاده از نرم افزار ArcGIS از ترکیب باندها محاسبه گردید (رابطه ۱ و ۲)

$$NDVI = \frac{ShortwaveIR1 - NIR}{Shortwave1 + NIR} \quad (۱)$$

$$Brightness\ index = \sqrt{Red^2 + NIR^2} \quad (۲)$$

### آنالیز حساسیت

در اغلب موارد بسیاری از ویژگی‌ها (لایه‌های اطلاعاتی)، نامربوط و زائد هستند و کارایی الگوریتم یادگیری را کاهش داده و در بعضی موارد دقت و سرعت مدل‌سازی را پایین می‌آورند. بنابراین انتخاب

1- Normalized difference vegetative index  
2- Brightness Index

همه موقعیت‌های نمونه‌برداری انجام می‌شود. پس از تعیین مدل مناسب، با استفاده از ضریب تبیین بین مقادیر واقعی و برآورد شده کربن آلی خاک و همچنین با استفاده از محاسبه شاخص‌های میانگین ریشه مربعات خطا (رابطه ۱) و میانگین خطای مدل (رابطه ۲) که واحد اندازه‌گیری‌شان درصد است اعتبارسنجی شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_o - Z_p)^2} \quad (1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_o - Z_p) \quad (2)$$

که در آنها  $Z_0$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $Z_p$  مقادیر مشاهداتی و  $n$  تعداد داده‌ها است.

## نتایج و بحث

در جدول ۱ خلاصه خصوصیات آماری کربن آلی خاک در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری آمده است. مقادیر کربن آلی خاک در منطقه از ۰/۲۶-۸/۴۵ درصد متغیر است و میانگین آن در منطقه با ۳/۰۸ درصد نشان دهنده کربن آلی متوسط منطقه مورد بررسی است. بیشترین میزان کربن آلی خاک در مناطق جنگلی (۸/۴۵ درصد) و تالاب (۷/۳۳) و کمترین میزان آن در اراضی کشاورزی (۰/۲۶) مشاهده شد. در منطقه مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که جایگاه زمین‌نما در توزیع مکانی رطوبت خاک و پوشش گیاهی مؤثر بوده و این عوامل هم منجر به تغییرات کربن آلی در منطقه شده‌اند. کربن آلی خاک بر اساس چولگی و تست کولموگوروف-اسمیرنوف دارای توزیع نرمال می‌باشد و همچنین دارای ضریب تغییرات متوسط می‌باشد (۴۶/۶).

## آنالیز حساسیت

در اغلب موارد بسیاری از ویژگی‌ها (لایه‌های اطلاعاتی)، نامربوط و زائد هستند و کارایی الگوریتم یادگیری را کاهش داده و در بعضی موارد دقت و سرعت مدل‌سازی را پایین می‌آورند. بنابراین انتخاب لایه‌های اطلاعاتی مؤثر در فرآیند پیش‌بینی حائز اهمیت می‌باشد. آنالیز حساسیت مدل رگرسیون نشان داد که متغیرهای کمکی مانند شاخص خیزی (۱۸ درصد)، شاخص همواری دره (۱۳/۷۰ درصد)، فاکتور LS (۱۳/۲۰ درصد)، شاخص NDVI (۳۰/۶۱ درصد) و باند ۳ (۲۴/۴۸ درصد) بالاترین تاثیر را بر روی پیش‌بینی کربن آلی خاک را در منطقه مورد مطالعه دارند (شکل ۲).

معروف است. دلیل استفاده از الگوریتم ژنتیک این است که این الگوریتم می‌تواند یک جستجوی تصادفی را انجام دهد و مستعد گیر افتادن در کمینه محلی نمی‌باشد (۲۲). بر اساس نتایج آنالیز حساسیت به روش رگر، مهمترین پارامترها جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک تشخیص داده شد. سپس تمام لایه‌های اطلاعاتی یا کمکی به فرمت رستری با اندازه سلولی ۳۰ متری تهیه شد (پارامترهای مدل رقومی ارتفاع با اندازه پیکسل ۹۰ متری با استفاده از روش نزدیکترین همسایه و اقدام به نمونه‌گیری مجدد<sup>۱</sup> به پیکسل ۳۰ متری تبدیل گردید). در نهایت تمامی اطلاعات (کربن آلی خاک و متغیرهای محیطی) به فرمت نهایی txt تبدیل شده و برای انجام فرآیند مدل‌سازی در نرم‌افزارهای مربوطه آماده شدند و در نهایت به نقشه رستری تبدیل شدند.

## مدل‌سازی خاک

در این تحقیق شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون<sup>۲</sup> چند لایه با یک لایه مخفی که دارای تابع فعال‌سازی سیگموئید<sup>۳</sup> در لایه مخفی و تابع فعال‌سازی خطی در لایه خروجی بوده و تعداد نرون‌های آن از دو تا ۱۰ نرون متغیر بوده و بهترین تعداد نرون به صورت سعی و خطا تعیین شد. همچنین به علت کارایی، سادگی و سرعت بالا در این تحقیق الگوریتم آموزشی لونیگ مارکواریت<sup>۴</sup> استفاده شد. در تحقیق حاضر از نرم‌افزار متلب<sup>۵</sup> برای ساختن شبکه عصبی مصنوعی و در نهایت پیش‌بینی کربن آلی خاک استفاده شد.

## ارزیابی مدل و نقشه

برای بررسی ارزیابی نقشه کربن آلی خاک، اعتبارسنجی به روش حذف یک داده و پیش‌بینی آن انجام گرفت. در شرایطی که زمان و بودجه کافی برای برداشت نمونه احتمالی وجود ندارد، بهترین گزینه اعتبارسنجی به روش حذف داده است (۴). برخلاف روش تقسیم داده‌ها به تست و آموزش، در این روش تقسیم کردن به طور تکرارپذیری انجام می‌شود و این روش را مؤثرتر می‌کند. در چنین شرایطی بهترین گزینه برای اعتبارسنجی مدل نقشه‌برداری رقومی، اعتبارسنجی به روش حذف داده و پیش‌بینی آن است. پایگاه داده ( $n$ ) به  $n-1$  موقعیت برای واسنجی و یک موقعیت برای اعتبارسنجی تقسیم می‌شود. در هر تکرار، مدل برای موقعیت حذف شده اجرا می‌گردد و متغیر حذف شده پیش‌بینی می‌گردد. سپس با مقدار واقعی مقایسه می‌گردد و خطای پیش‌بینی محاسبه می‌شود. این فرآیند برای

- 1- Resampling
- 2- Perceptron
- 3- Sigmoid
- 4- Lvenberg-Marquardt
- 5- Matlab



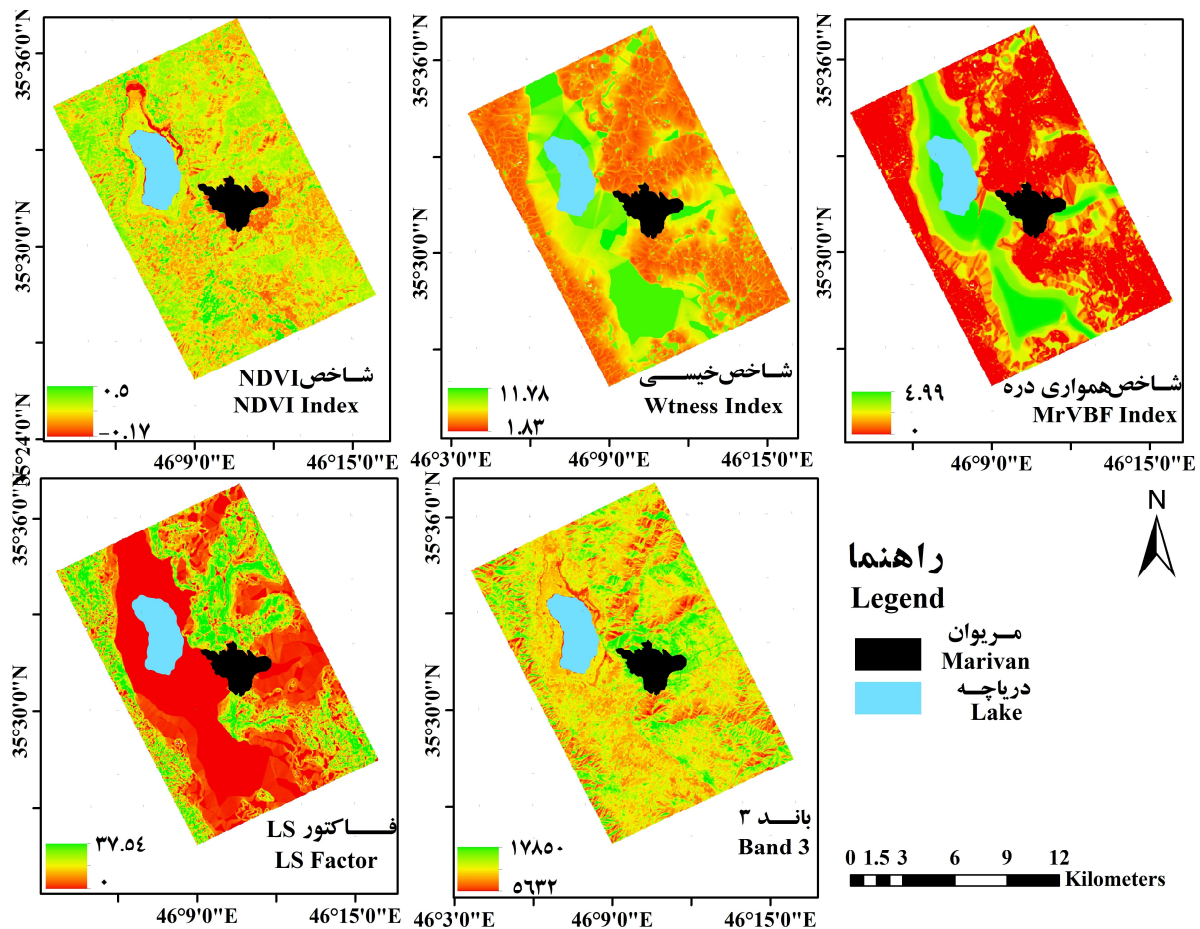
جدول ۱- پارامترهای آماری مربوط به کربن آلی خاک و داده‌های کمکی  
Table 1- Statistic parameters of soil organic carbon and auxiliary data

| ضریب تغییرات<br>Coefficient of Variation | حداقل<br>Minimum | حداکثر<br>Maximum | حداکثر<br>Mean | چولگی<br>Skewness | کشیدگی<br>Kurtosis | خصوصیت<br>Characteristic                    |
|------------------------------------------|------------------|-------------------|----------------|-------------------|--------------------|---------------------------------------------|
| 46.65                                    | 0.26             | 8.45              | 3.08           | 1.00              | 0.92               | کربن آلی خاک (%)<br>Soil organic carbon (%) |
| 125.51                                   | 0                | 4.99              | 1.39           | 0.95              | 0.59               | شاخص همواری<br>MrVBF index                  |
| 45.88                                    | 1.83             | 11.78             | 5.77           | 0.88              | -0.48              | شاخص خیسگی<br>Wetness index                 |
| 113.79                                   | 0                | 37.54             | 2.95           | 1.03              | 0.14               | فاکتور LS<br>LS factor                      |
| 64.33                                    | -0.17            | 0.50              | 0.09           | 1.22              | 4.85               | شاخص NDVI<br>NDVI index                     |
| 10                                       | 5772             | 17850             | 7236.23        | 0.71              | 0.94               | باند ۳<br>Band 3                            |

این موضوع نشان دهنده آن است که در منطقه مورد مطالعه، پستی و بلندی و پوشش گیاهی از مهمترین فاکتورهای خاک‌سازی بوده و در توزیع مکانی خاک و ویژگی‌های آن از جمله کربن آلی خاک مؤثر می‌باشد، چرا که توپوگرافی و پوشش گیاهی هر منطقه یکی از ویژگی‌های مهم و تأثیرگذار بر ویژگی‌های خاک آن منطقه از جمله کربن آلی خاک می‌باشد. نتایج پژوهش‌های زیادی بیانگر رابطه پارامترهای سرزمین و تصاویر ماهواره‌ای با ویژگی‌های خاک بوده است. دای و همکاران (۷)، توزیع مکانی ماده آلی خاک را با استفاده از پارامترهای ورودی ارتفاع، درجه‌حرارت، بارندگی و شاخص NDVI و مدل شبکه عصبی مصنوعی-کریجینگ پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که ضرایب همبستگی بین ماده آلی خاک با پارامترهای ارتفاع، بارندگی، درجه حرارت و NDVI به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۱۶، ۰/۲۱ و ۰/۲ بود.

تقی‌زاده و همکاران (۳۰)، برای تهیه نقشه رقومی کربن آلی خاک در منطقه بانه استان کردستان، از متغیرهای کمکی داده‌های سنجش از دور، پارامترهای سرزمین و مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، راندوم فارست، رگرسیون لاجستیک، درخت تصمیم و الگوریتم ژنتیک استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین متغیرهای کمکی جهت پهنه‌بندی کلاس خاک و کربن آلی خاک شاخص NDVI، شاخص رس، شیب، جهت شیب، انحنای سطح، شاخص MrVBF، شاخص خیسگی بودند. ایوبی و همکاران (۲) جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک در دو کاربری مرتع (سمیرم استان اصفهان) و جنگل (لردگان استان چهارمحال و بختیاری) از داده‌های سنجنده ETM استفاده کردند و نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که در کاربری مرتع باند ۱ بیشترین تأثیر، باند ۲ و ۵ تأثیر متوسط و باند ۷ و شاخص NDVI تأثیر کمتر در تغییرات کربن آلی خاک داشتند و در کاربری جنگل شاخص NDVI دارای بیشترین تأثیر بود. راتناپاک و همکاران (۲۵) جهت تهیه نقشه رقومی کربن آلی خاک در اراضی شالیزار منطقه

سريلانکا از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و مدل رقومی ارتفاع استفاده نمودند و نتایج آنها نشان داد که مهم‌ترین داده‌های کمکی جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری ارتفاع، باندهای ۲، ۴، ۷، نسبت باندهای ۴/۳ و ۴/۷ و در عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری باندهای ۲، ۵، ۶ شاخص NDVI، نسبت باندهای ۴/۳ و ۴/۷ بودند. وانگ و همکاران (۳۵) با استفاده از داده‌های کمکی اقلیم (بارندگی و دما)، پستی و بلندی (شاخص خیسگی و ارتفاع)، سنگ‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای نقشه رقومی کربن آلی خاک در اراضی مرتعی استرالیا را در دو عمق ۵-۰ و ۳۰-۰ سانتی‌متری تهیه کردند و نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که در عمق ۵-۰ سانتی‌متری باندهای ۱، ۲ و ۳ و در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری بارندگی، باند ۱ و ۲ دارای بیشترین تأثیر در پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک می‌باشند. وانگ و همکاران (۳۶) در نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک در چین در چهار عمق ۵-۰، ۱۵-۵، ۳۰-۱۵، ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی‌متری با استفاده از متغیرهای کمکی بارندگی، دما، کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاع، بر اساس نتایج آنالیز حساسیت به این نتیجه رسیدند که پارامترهای توپوگرافی ارتفاع درصد شیب و شاخص خیسگی و شاخص NDVI بیشترین تأثیر را در پیش‌بینی کربن آلی خاک دارند. ساینای هبورا (۲۷) در مقایسه تکنیک‌های نقشه‌برداری رقومی خاک برای مقادیر کربن آلی و رس در فلات مرکزی برونودی از ۱۶ متغیر کمکی از جمله متغیرهای مشتق شده از نقشه‌های خاک موجود، مشتقات مدل رقومی ارتفاعی و تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده کردند و نشان دادند که بهترین پارامترها در مدل‌سازی شامل واحدهای سنگ‌شناسی، مشتقات مدل رقومی ارتفاع و شاخص NDVI بود.



شکل ۲- نقشه‌های مهمترین داده‌های کمکی جهت تخمین کربن آلی خاک بر اساس آنالیز حساسیت

Figure.2- Maps of the most important auxiliary data to estimate soil organic carbon based on sensitivity analysis

دست آمدند. در این پژوهش، تعداد نرون ۲ تا ۱۰ و تعداد تکرار ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت. برای تعیین بهترین ترکیب از شاخص ریشه مربعات خطا استفاده شد. نتایج نشان داد که تعداد نرون ۶ و تکرار ۸۷۰ دارای بهترین ترکیب برای پیش‌بینی کربن آلی خاک می‌باشد (جدول ۲). نتایج ریشه مربعات خطا، میانگین خطا و ضریب تبیین برای کربن آلی خاک ۰/۶۷، ۰/۱۹- و ۰/۸۰ بدست آمد. بعد از بدست آوردن ساختار بهینه در مرحله آموزش شبکه عصبی مصنوعی که در بالا توضیح داده شد، شبکه آموزش دیده با روش اعتبارسنجی آزمایش کرده تا دقت این مدل برای پیش‌بینی کربن آلی خاک مشخص شود که نتایج ریشه مربعات خطا، میانگین خطا و ضریب تبیین برای کربن آلی خاک در جدول ۲ آمده است. در شکل ۳ نمودار پراکنش داده‌های پیش‌بینی شده برای مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده است. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود بهترین خط برازش شده دارای زاویه‌ای نزدیک به ۴۵ درجه بوده که نشان دهنده

#### مدل‌سازی مکانی

توپولوژی شبکه یک فاکتور اساسی در طراحی شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد به علت اینکه این ساختار اثر تاثیرگذار برروی سرعت یادگیری و صحت طبقه‌بندی نهایی می‌گذارد. تعداد لایه‌های مخفی و تعداد نرون‌ها جزء اجزای اصلی شبکه پرسپترون می‌باشد. بجز توپولوژی شبکه عصبی مصنوعی که ذکر شد تعداد اپوک در مرحله یادگیری بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی ثابت بوده و بسته به تعداد ورودی (متغیرهای کمکی) و خروجی (کربن آلی خاک) مدل به کار گرفته شده دارد. لایه ورودی شبکه شامل ۲۵ ورودی می‌باشد. لایه خروجی شامل یک نرون می‌باشد. تعداد نرون‌ها و لایه‌های مخفی بستگی به پیچیدگی مسئله مورد نظر دارد. در اینجا یک لایه مخفی برای ایجاد شبکه پرسپترون مورد استفاده قرار گرفت. تعداد نرون‌های لایه مخفی و همچنین تعداد اپوک در فرایند آموزش و به‌صورت سعی و خطا به

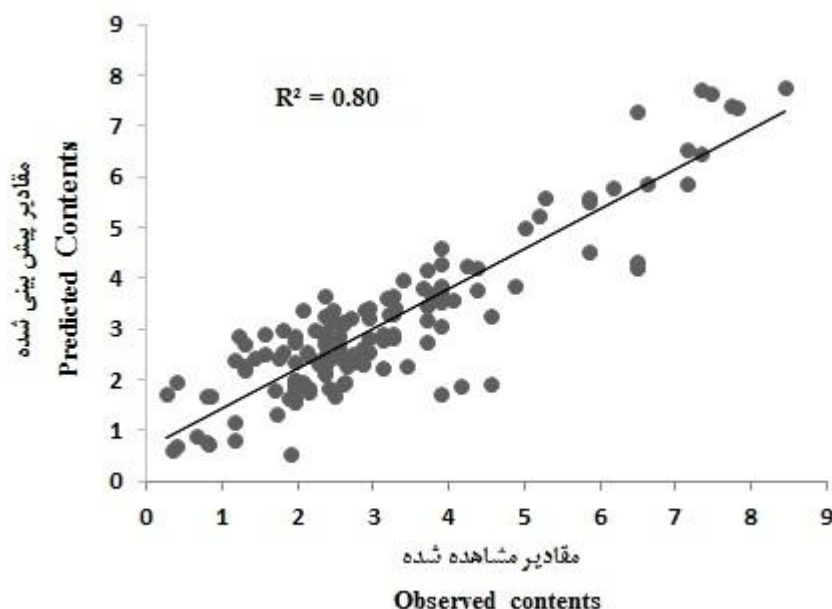
پیش‌بینی کربن آلی خاک در این عمق‌ها به ترتیب نرون‌های ۵، ۷، ۱۴ و ۱۰ بودند. دایی و همکاران (۷) با یک فرایند دو مرحله‌ای شامل استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و سپس بهره‌گیری از کربجینگ معمولی نقشه‌ی پراکندگی کربن آلی خاک را در فلات تبت تهیه و ضریب همبستگی ۰/۷۵ را گزارش کردند. سومارانت و همکاران (۲۸) در سریلانکا با استفاده از دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه کربن آلی خاک در در کاربری‌های مختلف پیش‌بینی و به ترتیب ضرایب همبستگی ۰/۸۳-۰/۹۲ و ۰/۷۳-۰/۸۲ را گزارش نمودند. ویر و همکاران (۳۴) با استفاده از روش‌های رگرسیون برداری پشتیبان، شبکه‌ی عصبی مصنوعی و روش جنگل تصادفی اقدام به نقشه‌برداری و پیش‌بینی ذخایر کربن آلی خاک در کنیا کردند و به این نتیجه رسیدند که روش رگرسیون برداری پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی کمترین میزان ریشه‌ی مربعات خطا (به ترتیب ۱۵/۵ و ۱۴/۹ مگاگرم کربن بر هکتار) و بیشترین مقادیر ضریب تبیین (۰/۶) را داشته است.

دقت بالایی برآورد توسط مدل شبکه عصبی مصنوعی است. در نهایت نقشه کربن آلی خاک با استفاده مدل شبکه عصبی مصنوعی در محیط ArcGIS تهیه شد (شکل ۴). محققین دیگری نیز از مدل شبکه عصبی در نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک استفاده کرده‌اند. ایوبی و همکاران (۲) با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای لندست و دو مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه، کربن آلی خاک را در دو منطقه سمیرم در استان اصفهان و لردگان در استان چهارمحال و بختیاری پیش‌بینی کردند. نتایج آنها نشان داد که برای دو منطقه سمیرم و لردگان مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چند لایه (به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۹۹ و ۰/۸۴) دارای کارایی بهتری نسبت به مدل رگرسیون خطی چندگانه (به ترتیب با ضریب تبیین ۰/۷۷ و ۰/۵۴) بود. نقی زاده و همکاران (۳۰) در منطقه بانه استان کردستان ضریب همبستگی ۰/۶۸، ۰/۵۷، ۰/۴۹ و ۰/۴۱ را جهت نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک (به ترتیب برای عمق‌های ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متری) با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی گزارش کردند و بهترین نرون‌ها هم جهت

جدول ۲- مقادیر RMSE برای تعداد نرون مختلف در پیش‌بینی کربن آلی خاک

Table 2- Contents of Root Mean Square Error of different number of neuron to estimate soil organic carbon

| تعداد نرون<br>Number of neuron                    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| میانگین ریشه مربعات خطا<br>Root Mean Square Error | 0.81 | 0.74 | 0.80 | 0.70 | 0.67 | 0.71 | 0.78 | 0.90 | 0.87 |



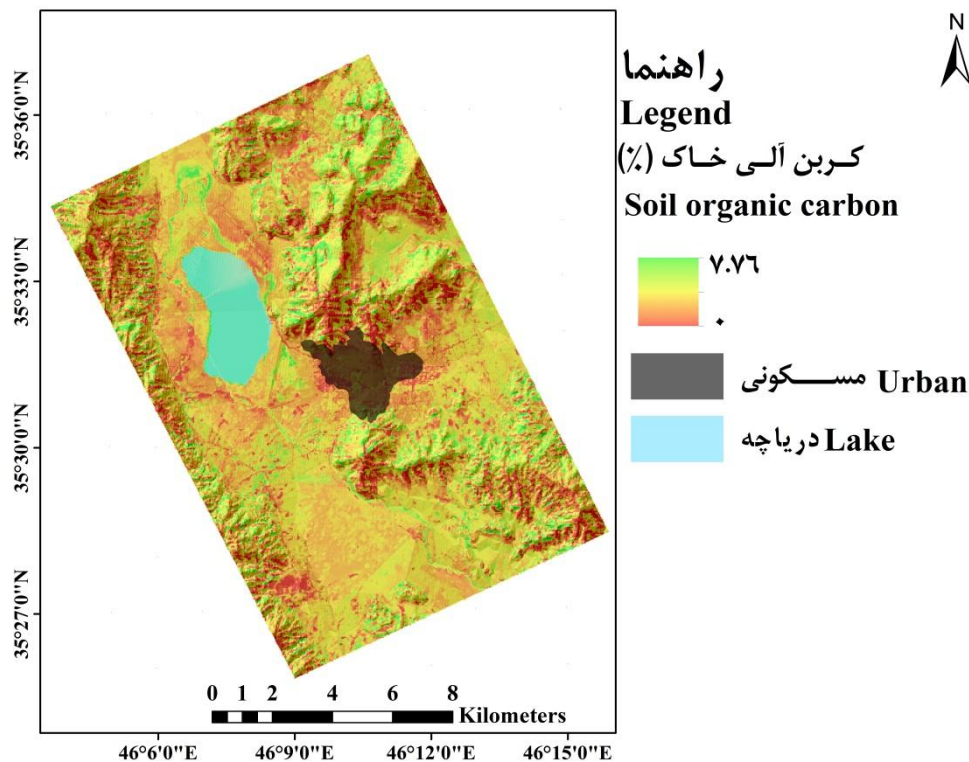
شکل ۳- نتایج مدل شبکه عصبی برای تخمین کربن آلی خاک

Figure 3- Results of artificial neural model to estimate soil organic carbon

جدول ۳- نتایج مدل برای پیش‌بینی کربن آلی خاک

Table 3- Results of models to estimate soil organic carbon

| مدل<br>Model                                  | میانگین خطا<br>Mean error | ضریب تبیین<br>determination of coefficient | میانگین ریشه مربعات خطا<br>Root Mean Square Error |
|-----------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| شبکه عصبی مصنوعی<br>Artificial neural network | 0.019                     | 0.80                                       | 0.67                                              |



شکل ۴- نقشه کربن آلی خاک منطقه مورد مطالعه

Figure 4- Soil organic carbon map of the study area

کشت‌های زراعی منطقه هم می‌تواند مزید بر علت باشد که منجر به زیاد شدن کربن آلی خاک در اراضی زراعی شده است. در تالاب منطقه مورد مطالعه هم به دلیل عدم وجود شرایط هوازی جهت تجزیه، کربن آلی خاک بیشتر از کاربری زراعت می‌باشد. بونفاتی و همکاران (۳) در نقشه برداری رقومی کربن آلی خاک در جنوب برزیل بیان کردند که خاک‌های تحت پوشش جنگل دارای مقادیر بالاتر کربن آلی (۱۸۴ تن کربن بر هکتار) بود چون جنگل‌ها دارای مقادیر بالاتری بقایای آلی است که به خاک وارد می‌شود. به‌طور کلی ورود بقایای تازه و میزان نسبتاً کم تجزیه به‌طور کلی سطح کربن آلی خاک را نسبت به چمنزارها افزایش می‌دهد. در مراتع (۲۰۵ تن کربن بر هکتار)، ریشه‌های عمیق سبب تجمع کربن آلی تا عمق خاک می‌شود. خاک‌های تحت کشت محصولات زراعی و تاکستان کمترین مقدار کربن آلی (۱۶۳ تن کربن بر هکتار)، به دلیل کاهش ورود مواد آلی و افزایش تجزیه دارند.

#### آنالیز مکانی کربن آلی خاک و مهمترین داده‌های کمکی

مطابق با نقشه رقومی کربن آلی خاک (شکل ۴) بیشترین مقادیر کربن آلی خاک در مناطق غربی، شمال شرقی، جنوب شرقی قرار دارد، که این بخش‌ها عمدتاً دارای پوشش جنگلی و فیزیوگرافی کوه و تپه هستند. همچنین مناطق تحت پوشش تالاب که در اطراف دریاچه قرار گرفته‌اند دارای کربن آلی خاک بالایی هستند. در شکل ۵ هم میانگین کربن آلی خاک را در کاربری‌های زراعت، جنگل و تالاب نشان می‌دهد. میزان کربن آلی خاک در کاربری زراعت کمتر از تالاب و جنگل می‌باشد اگرچه از لحاظ آماری دارای اختلاف معنی‌داری نیستند. دلیل این عدم معنی‌داری احتمالاً می‌تواند به سه دلیل باشد: ۱- قرار گرفتن جنگل‌ها در اراضی شیب‌دار ۲- قرار گرفتن قسمت عمده اراضی زراعی در مناطق کم شیب ۳- تحت کشت رفتن بخشی از تالاب منطقه (در سال‌های اخیر به دلیل بارندگی‌های کم تالاب عقب نشینی کرده است و تحت کشت رفته) ۴- آبی بودن اغلب

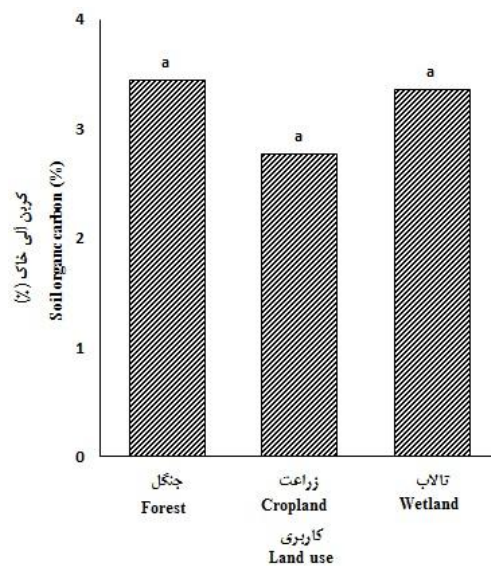
گیاهی اثر می‌گذارد، مرتبط باشد. بونفاتی و همکاران (۳) در جنوب برزیل مهم‌ترین متغیرهای کمکی جهت نقشه‌برداری کربن آلی خاک در مناطق زراعی را ویژگی‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاع مانند عمق دره و شاخص خیسی توپوگرافی و رده‌ی خاک‌ها گزارش کردند. چارتین و همکاران (۵) از مشتقات حاصل از مدل رقومی ارتفاع به‌عنوان متغیر کمکی محیطی استفاده کرده و در بین آنها فاکتور LS در کنار سطح آب زیر زمینی، ذرات رس و سیلت به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر در توضیح تغییرات مکانی مقدار کربن آلی خاک در مقیاس مزرعه‌ای شناخته شد.

بر اساس آزمون آنالیز حساسیت، در میان داده‌های مربوط به تصاویر ماهواره‌ای، باند ۳ و شاخص NDVI مهم‌ترین متغیرهای داده‌های تصاویر ماهواره‌ای جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک انتخاب شدند. هر چه پوشش گیاهی بیشتر باشد به دلیل جذب بیشتر طیف الکترومغناطیسی، بازتاب در باند ۳ کمتر خواهد بود. در کاربری زراعت به دلیل جذب کمتر و بازتاب بیشتر، بیشترین مقدار باند ۳ را دارد و در جنگل مقادیر باند ۳ کمتر از کاربری زراعت می‌باشد (شکل ۶ و ۲). مقدار باند ۳ هم در تالاب به دلیل داشتن سطح خیس آب دارای بیشترین جذب می‌باشد لذا کمترین مقدار باند ۳ را دارا می‌باشند (شکل ۶). ملون و همکاران (۱۵) در نقشه‌برداری میزان ذخایر کربن عوامل محیطی مهم برای پیش‌بینی کربن آلی خاک را ارتفاع بالای شبکه آبراه‌های، شاخص قدرت جریان و باندهای ۳ و ۴ گزارش کردند. شاخص NDVI که نشان دهنده میزان پوشش گیاهی است دارای میانگین ۰/۰۹ درصد و دامنه تغییرات آن ۰/۱۷-۰- در منطقه است (شکل ۲). هر چه پوشش گیاهی بیشتر باشد، میزان شاخص NDVI بیشتر خواهد بود. در منطقه مورد مطالعه اگرچه مقادیر بیشتری در جنگل نسبت به دو کاربری دیگر دارند اما از لحاظ آماری برای اختلاف معنی‌دار نیستند (شکل ۶) که احتمالاً دلیل این عدم معنی‌داری هم می‌تواند به قرار گرفتن جنگل‌ها در اراضی شیب‌دار و اراضی زراعی در مناطق کم شیب‌تر نسبت داده شود. ملون و همکاران (۱۵) هم در نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک در استرالیا نشان دادند که مناطقی که دارای پوشش جنگلی بودند دارای شاخص NDVI بیشتری هستند در مقایسه با مناطقی که تحت پوشش زراعت هستند. ایوبی و همکاران (۲) در پیش‌بینی تغییرات مقدار ماده آلی خاک با استفاده از سنجش از دور در دو منطقه سمیرم اصفهان در مرکز ایران با کاربری مرتع و منطقه لردگان چهارمحال و بختیاری در غرب ایران با کاربری جنگل طبیعی نشان داد که همبستگی بین ماده آلی و شاخص NDVI در سطح یک درصد، معنی‌دار و مثبت بود.

کومار و همکاران (۱۴) در نقشه‌برداری رقومی کربن آلی خاک با استفاده از روش رگرسیون کریجینگ در مقایسه میزان کربن آلی ذخیره در خاک کاربری‌های مختلف در پنسیلوانیا نشان داد که جنگل‌ها بیشترین مقدار کربن آلی ذخیره را داشتند (۶۴ درصد). دلیل بیشتر بودن میزان ذخایر کربن آلی خاک در جنگل‌ها می‌تواند به دلیل مساحت بیشتر اراضی جنگلی و عملیات شخم باعث کاهش خاکدانه‌سازی در خاک‌های زراعی می‌شود و حفاظت فیزیکی ماده آلی خاک را کاهش می‌دهد. در نتیجه زمین‌های زراعی عموماً مقادیر پایین‌تری ذخیره‌ی کربن آلی نسبت به ظرفیت بالقوه خود دارند. باتلاق‌ها در پنسیلوانیا حدود ۲/۳٪ (۰/۲۷ پتاگرم) از مجموع (۱/۱۲ پتاگرم) ذخایر کربن آلی خاک را به‌خود اختصاص می‌دهد. شرایط بی‌هوای طولانی مدت خاک‌ها در باتلاق‌ها، میزان تجزیه بقایای آلی را در مقایسه با سایر کاربری‌ها کاهش داده و باعث افزایش ذخایر کربن آلی خاک در آن‌ها می‌شود.

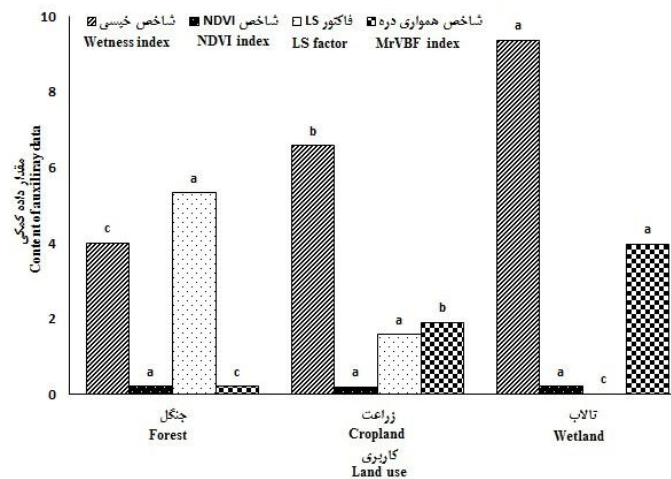
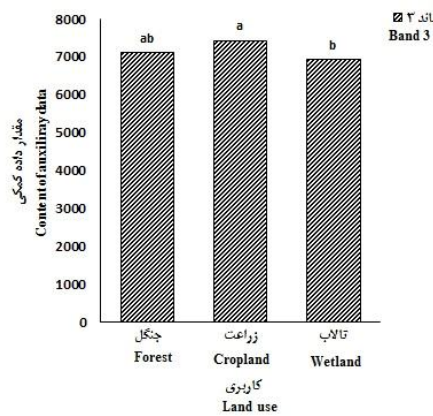
کلایک (۶) هم در بررسی تأثیر تغییر کاربری بر میزان ماده آلی خاک در سه کاربری جنگل، مرتع و اراضی زراعی نشان داد که درصد ماده آلی خاک اندازه‌گیری شده در اراضی زراعی در لایه صفر تا ده سانتی‌متر، ۴۴ و ۴۸ درصد و در لایه ۲۰-۰ سانتی‌متری خاک ۴۸ و ۵۰ درصد در مقایسه با کاربری جنگل و مرتع کاهش پیدا کرده است. بر اساس آزمون آنالیز حساسیت، شاخص خیسی، شاخص همواری دره و فاکتور LS به‌عنوان مهم‌ترین متغیرهای پارامترهای سرزمین جهت پیش‌بینی کربن آلی خاک انتخاب شدند. شاخص خیسی که یکی از متغیرهای توپوگرافی مورد استفاده است بیانگر توزیع مکانی رطوبت بوده و درواقع میزان تجمع آب در خاک و در سطح زمین را نشان می‌دهد و در حقیقت این ناحیه پتانسیل بالای تجمع مواد شسته شده از مناطق بالادست را نشان می‌دهد. میانگین شاخص خیسی برای منطقه در حدود ۵/۷۷ درصد و دامنه تغییرات آن ۱۱/۷۸-۱/۸۳ درصد است (شکل ۲). شاخص همواری دره هم نشان‌دهنده قسمت‌های هموار پایین دره است که میانگین آن در منطقه ۱/۳۹ درصد و دامنه تغییرات آن ۴/۹۹-۰ درصد می‌باشد (شکل ۲). شاخص‌های خیسی و همواری دره در اراضی جنگلی به دلیل داشتن سطوح شیب‌دار و قرار گرفتن در واحدهای فیزیوگرافی کوه و تپه، کمترین مقدار و در تالاب دارای بیشترین مقدار می‌باشند (شکل ۶). با افزایش این شاخص‌ها میزان کربن آلی خاک می‌تواند به دلیل تجمع رطوبت بیشتر، افزایش یابد. در نقطه مقابل این شاخص‌ها، فاکتور LS که میانگین آن در منطقه ۲/۹۴ درصد و دامنه تغییرات آن ۳۷/۵۴-۰ درصد می‌باشد (شکل ۲) در کاربری جنگل دارای بیشترین مقدار و در تالاب کمترین مقدار را دارند (شکل ۶). تأثیر پارامترهای توپوگرافی بر ترکیب و توزیع کربن آلی خاک می‌تواند به تأثیر آن‌ها بر توزیع خاک از طریق فرسایش و رسوب، حفظ پوشش گیاهی و عمق ریشه و بر زهکشی خاک که بر تجزیه کربن آلی خاک و نیز پوشش





شکل ۵- میانگین کربن آلی خاک در کاربری‌های مختلف

Figure 5- Mean value of soil organic carbon indifferent land uses.



شکل ۶- میانگین داده‌های کمکی در کاربری‌های مختلف (میانگین‌های که حروف مشترک ندارند مطابق با آزمون تی در سطح ۱ درصد اختلاف معنی داری باهم دارند (مقدار  $P < 0.05$ ))

Figure 6- Mean value of auxiliary data in different land uses. Means ( $n = 3$ ) that share a letter are not significantly different at the level 0.01 ( $p > 0.05$ ) according to T's tes

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از مدل شبکه عصبی مصنوعی جهت بررسی تغییرات مکانی کربن آلی خاک در منطقه مریوان استان کردستان استفاده شد. نتایج نشان داد بیشترین میزان کربن آلی خاک به ترتیب در اراضی جنگلی، تالاب و زراعت می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که مهمترین متغیر کمکی شاخص NDVI می‌باشد و وجود ارتباط قوی بین داده خاک و پارامترهای محیطی نیز یکی از

فاکتورهای تاثیرگذار برروی دقت مدل می‌باشد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که تکنیک‌های پدومتری بخصوص شبکه عصبی می‌توانند در گستره‌ای وسیع جهت نقشه‌برداری رقومی خصوصیات خاک‌ها به کار گرفته شود. لذا پیشنهاد می‌گردد که جهت تهیه نقشه رقومی خاک از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، و داده‌های کمکی همچون اجزاء سرزمین و تصاویر ماهواره‌ای در مطالعات آینده استفاده شود.

## منابع

- 1- Adhikari K., Minasny B., Greve B.G., and Greve M.H. 2014. Constructing a soil class map of Denmark based on the FAO legend using digital techniques. *Geoderma*, 214-215: 101-113.
- 2- Ayoubi S., Shahri A.P., Karchegani P.M., and Sahrawat K.L. 2011. Application of artificial neural network (ANN) to predict soil organic matter using remote sensing data in two ecosystems. In *Tech Publication*, 181-196.
- 3- Bonfatti B., Hartemink A.E., Giasson E., Tornquist C.G., and Adhikari K. 2016. Digital mapping of soil carbon in a viticultural region of Southern Brazil. *Catena*, 261: 204-221.
- 4- Brus D.J., Kempen B., and Heuvelink G.B.M. 2011. Sampling for validation of digital soil maps. *European Journal of Soil Science*, 62: 394-407.
- 5- Chartin C., Stevens A., Goidts E., Kruger I., Carnol M., and Wesemael B.V., 2017. Mapping Soil Organic Carbon stocks and estimating uncertainties at the regional scale following a legacy sampling strategy (Southern Belgium, Wallonia). *Geoderma Regional*, 9: 73-86.
- 6- Celik I. 2005. Land-use Effects on Organic Matter and Physical Properties of Soil in a Southern Mediterranean Highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83: 270-277.
- 7- Dai P.F., Qigang Z., Zhiqiang L.V., Xuemei W., and Gangcai L. 2014. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 45: 184-194.
- 8- Greve M.H., Kheir R.B., and Greve B.M. 2012. Using Digital Elevation Models as an Environmental Predictor for Soil Clay Contents. *Soil Science Society of America Journal*, 76: 2116-2127.
- 9- Gholamalizadeh Ahangar A., Sarani F., Hashemi M., and Shabani A. 2015. Comparison of Linear Regression Methods, Geostatistical and Artificial Neural Network Modeling of Organic Carbon in Dry Land of Sistan Plain. *Journal of Water and Soil*, 28: 1250-1260. (In Persian with English abstract)
- 10- Hengel T., Rossiter D.G., and Stein A. 2003. Soil sampling strategies for spatial prediction by correlation with auxiliary maps. *Geoderma*, 120: 75-93.
- 11- Heung B., Bulmer C.E., and Schmidt M.G. 2014. Predictive soil parent material mapping at a regional-scale: a random forest approach. *Geoderma*, 214-215: 141-154.
- 12- Jafari A., Finke P.A., Van deWauw J., Ayoubi S., and Khademi H. 2012. Spatial prediction of USDA-great soil groups in the arid Zarand region, Iran: comparing logistic regression approaches to predict diagnostic horizons and soil types. *European Journal of Soil Science*, 63: 284-309.
- 13- Jafari A., Khademi H., Finke P., Wauw J.V.D., and Ayoubi S. 2014. Spatial prediction of soil great groups by boosted regression trees using a limited point dataset in an arid region, southeastern Iran. *Geoderma*, 232-234: 148-163.
- 14- Kumar S., Lal R., and Liu D., 2012. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. *Geoderma*, 189-190: 627-634.
- 15- Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma*, 154: 138- 152.
- 16- Manlay R., Feller C., and Swift M. 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 119: 217-233.
- 17- Marcel G.S., Feike J.L., Martinus T., and van Genuchten H. 1998. Neural Network Analysis for Hierarchical Prediction of Soil Hydraulic Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 847-855.
- 18- Mattara, M.A., Alazbab, A.A., and Zin El-Abedin T.K. 2015. Forecasting furrow irrigation infiltration using artificial neuralnetworks. *Agricultural Water Management*, 148: 63-71.
- 19- McBratney A.B., Santos M.L.M., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma*, 117: 3-52.

- 20- Minasny B., and McBratney A. 2002. The method for fitting neural network parametric pedotransfer functions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2): 352-361.
- 21- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539-594. In: Page, A.L., R.H., D.R., Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2-Chemical and Microbiological Properties*. ASA-SSSA, Madison, WI.
- 22- Nosrati H., and Eftekhari M. 2014. A new approach for variable selection using fuzzy logic. *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, 4: 71-83. (In Persian with English abstract)
- 23- Pahlavan-Rad M.R., Toomanian N., Khormali F., Brungard C.W., Komaki C.B., and Bogaert P. 2014. Updating soil survey maps using random forest and conditioned Latin hypercube sampling in the loess derived soils of northern Iran. *Geoderma*, 232-234: 97-106.
- 24- Piccini C., Marchetti A., and Francaviglia R. 2014. Estimation of soil organic matter by geostatistical methods: use of auxiliary information in agricultural and environmental assessment. *Ecological Indicators*, 36: 301-314.
- 25- Ratnayake R.R., Karunaratne R.B., Lessels J.S., Yogenthiran N., Rajapaksha R.P.S.K., and Gnanavelrajah N. 2016. Digital soil mapping of organic carbon concentration in paddy growing soils of Northern Sri Lanka. *Geoderma Regional*, 7: 167-176.
- 26- Rudiyanto Minasny B., Setiawan BI, Arif C, Saptomo SK, and Chadirin Y. Digital mapping for cost-effective and accurate prediction of the depth and carbon stocks in Indonesian peatlands. *Geoderma*, 272: 20-31 (2016).
- 27- Sindayihebura A., Ottoy S., Dondeyne S., Meirvenne M.V., and Orshoven J.V. 2017. Comparing digital soil mapping techniques for organic carbon and clay content: Case study in Burundi's central plateaus. *Catena*. 156: 161-175.
- 28- Somaratne S., Seneviratne G., and Coomaraswamy U. 2005. Prediction of Soil Organic Carbon across Different Land-use Patterns: A Neural Network Approach. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 1580-1589.
- 29- Taghizadeh-Mehrjardi M., Neupane R., Sood K., and Kumar S. 2017. Artificial bee colony feature selection algorithm combined with machine learning algorithms to predict vertical and lateral distribution of soil organic matter in South Dakota, USA. *Carbon Management*, 8: 277-291
- 30- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., and Kerry R. 2016. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 253-254: 67-77.
- 31- Taghizadeh-Mehrjardi R., Nabiollahi K., Minasny B., and Triantafyllis J. 2015. Comparing data mining classifiers to predict spatial distribution of USDA-family soil groups in Baneh region, Iran. *Geoderma*, 253-254: 67-77.
- 32- Vasques G.M., Dematte J.A.M., Viscarra Rossel R.A., Ramirez-Lopez L., and Terra F.S. 2014. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. *Geoderma*, 223-225: 73-78.
- 33- Veronesi F., Corstanje R., and Mayr T. 2014. Landscape scale estimation of soil carbon stock using 3D modeling. *Science Total Environment*, 487: 578-586.
- 34- Were K, Bui DT, Dick QB, and Singh BR. 2015. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an Afrotropical landscape. *Ecological Indicators*, 52, 394-403.
- 35- Wang B., Waters C., Orgill S., Gray J., Cowie A., Clark A., and Liu D.L., 2018. High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. *Science Total Environment*, 630: 367-378.
- 36- Wang S., Zhuang Q., Wang Q., Jin X., and Han C. 2017. Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China. *Geoderma*, 305: 250-263.
- 37- Zhao Z., Chow T.L.W., Rees H., Yang O., Xing Z., and Meng F.R. 2009. Predict soil texture distributions using an artificial neural network model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65: 36-48.





## Digital Mapping of Soil Organic Carbon (Case Study: Marivan, Kurdistan Province)

Sh. Eskandari<sup>1</sup> - K. Nabiollahi<sup>2\*</sup> - R. Taghizadeh-Mehrjardi<sup>3</sup>

Received: 08-11-2017

Accepted: 02-07-2018

**Introduction:** Soil organic carbon is one of the most important soil properties which its spatial variability is essential to crop management, land degradation and environmental studies. Investigation of variability of soil organic carbon using traditional methods is expensive and time consuming. Therefore, one of the ways to overcome this challenge is using digital soil mapping which can predict soil characteristics using auxiliary data and data mining methods. Previous studies have shown that digital elevation model (DEM) and remotely sensed data are the most commonly useful ancillary data for soil organic carbon prediction. Artificial neural network (ANN) is a common technique of digital mapping. The region of Marivan in Kurdistan province is one of the forested areas in Iran. In recent decades, due to population growth and the increased need for food, this forested area has been threatened and some parts are now cultivated. Therefore, accurate mapping of soil organic carbon so as to improve land management and prevent land degradation is necessary. The purpose of this research was using ANN model and auxiliary data to map soil organic carbon.

**Materials and Methods:** The study area is located in Kurdistan Province, Marivan (cover 20000 ha). Soil moisture and temperature regimes are Xeric and Mesic, respectively. Elevation also varies between 1280 and 1980 m. The main land use types are cropland, forestland and wetland. The major physiographic units are piedmont plain, mountain and hills with flat to steep slopes. Using stratified random soil sampling method, 137 soil samples (for the depth of 0-30 cm) were collected and soil organic carbon were measured. In the current study, auxiliary data were terrain attributes and ETM<sup>+</sup> data of Landsat 7. Terrain parameters (including 15 factors), bands 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, brightness index (BI) and normalized difference vegetative index (NDVI) were computed and extracted using SAGA and ArcGIS software, respectively. ANN model was applied to establish a relationship between soil organic carbon and auxiliary data. Finally, soil organic carbon were mapped using ANN and validated based on cross validation method. Three different statistics were used for evaluating the performance of model in predicting soil organic carbon, namely the coefficient of determination ( $R^2$ ), mean error (ME) and root mean square error (RMSE).

**Results and Discussion:** Based on sensitive analysis of ANN model, auxiliary variables including wetness index, index of valley bottom flatness (MrVBF), LS factor, NDVI index, and B3 were the most important factors for prediction of soil organic carbon. The quantities of  $R^2$ , ME and RMSE calculated for ANN model were 0.80, 0.01 and 0.67, respectively. Soil organic carbon content ranged from 0.26 to 8.45 % and the highest content was observed in forestland with hill and mountain physiography and wetland around the lake. It is noteworthy that the differences for different land uses were not statistically significant. Auxiliary data including wetness index, index of valley bottom flatness, LS factor, and B3 in different land uses had statistically significant difference ( $p < 0.05$ ) indicating a closer relationship between auxiliary data and soil organic carbon. MrVBF and wetness index were lower and higher in forestland and wetland, respectively. Conversely, LS factor was higher and lower in forestland and wetland, respectively. Band 3 was lower in cropland and wetland compared to in forestland. NDVI index was also insignificantly higher in forestland compared to in cropland and wetland.

**Conclusion:** In this research, ANN model was used to investigate the spatial variability of soil organic carbon in Marivan, Kurdistan province. The highest content of Soil organic carbon was found in forestland and wetland. NDVI index was the most important auxiliary data to predict soil organic carbon within our study area. According to the values of statistics, ANN accurately estimated the soil organic carbon. Therefore,

1 and 2- M.Sc. Student and Assistant Professor of Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Kurdistan, Sanandaj

(\* - Corresponding Author Email: k.nabiollahi@uok.ac.ir)

3- Assistant Professor of Department of Arid and Desert Regions Management, University of Ardakan

employing pedometric techniques such as ANN model, auxiliary data of terrain attributes and satellite images to digitally map soil properties and update old maps is recommendable. Further studies are needed to compare these results with direct measurements of soil organic carbon.

**Keywords:** Digital elevation model, Land use, Satellite image

## تغییرات خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تحت تأثیر شدت چرای دام در مراتع مغان

سیما جعفری<sup>۱</sup> - اردوان قربانی<sup>۲\*</sup> - کاظم هاشمی مجد<sup>۳</sup> - سحر غفاری<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

### چکیده

خاک از مهمترین اجزای تشکیل دهنده اکوسیستم‌های مرتعی و تخریب آن، کاهش توان تولید مرتع را در پی خواهد داشت. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر شدت چرا بر خصوصیات خاک در مراتع مغان با استفاده از چارچوب گرادیان چرای انجام شد. سه روستای تولکلو، کلش و پنجالو بعنوان نماینده مراتع علف - بوته‌زار مغان انتخاب شد. نمونه‌برداری، از سه شدت چرا و در سه فاصله از هر سه روستا انجام شد. در هر فاصله از روستا، سه نمونه خاک، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری (۲۷ نمونه) برداشت شد. پارامترهای خاک شامل اسیدیته، هدایت الکتریکی، رطوبت وزنی اشباع، سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم محلول، پتاسیم تبادلی، فسفر قابل جذب، درصد مواد خنثی‌شونده، کربن آلی، کربن آلی ذره‌ای، رس قابل انتشار، نیتروژن کل، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و بافت خاک اندازه‌گیری شد. برای مشخص کردن روند تغییر پارامترها در شدت چراهای مختلف، از شدت چراهای سنگین، متوسط و سبک هر سه روستا میانگین گرفته شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با روش تجزیه واریانس دو طرفه و با استفاده از آزمون دانکن انجام شد. نتایج نشان داد، میزان پتاسیم محلول و آهک خاک با افزایش شدت چرا، افزایش ( $P < 0.05$ ) ولی میزان سدیم محلول و درصد سیلت خاک به صورت معنی‌داری کاهش ( $P < 0.05$ ) می‌یابند ولی در پارامترهای دیگر اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. نتایج همچنین نشان داد که شدت چرا اثر منفی بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله آهک، سدیم محلول و درصد سیلت خاک دارد. بنابراین، در مدیریت مراتع و انجام برنامه‌های اصلاحی و احیایی، باید به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک توجه شود.

واژه‌های کلیدی: استان اردبیل، اکوسیستم مرتع، کانون بحران، گرادیان چرای

### مقدمه

اکوسیستم‌های مرتعی، موهون تعادل نسبی بین تعداد دام و ظرفیت مراتع می‌باشد. با افزایش روزافزون جمعیت و نیز دخالت‌های نامعقول، تعادل بین دام و مرتع به هم خورده، که نتیجه آن، تخریب خاک، افزایش جریانات سطحی، هرزآب و تشدید فرسایش (۲۳) که در نهایت باعث کاهش کارایی اکوسیستم‌های مرتعی شده است (۳۶). بنابراین ضروری است که از چارچوب‌ها و شاخص‌های مناسب در ارزیابی تخریب این اکوسیستم‌ها استفاده شود. چرای غیریکنواخت دام در مرتع، یکی از علل تخریب مراتع می‌باشد (۴، ۵، ۱۹، ۳۳ و ۴۲). حفظ عناصر غذایی موجود در خاک مرتع که تحت تنش چرای بی‌رویه و غیریکنواخت هستند، بدون کاربرد کودهای معدنی به منظور افزایش تولید علوفه و داشتن تولیدات دامی پایدار اهمیت زیادی دارد (۸). چارچوب گرادیان چرای بر پایه کانون‌های بحران شامل آبشخور، روستا، سایه و غیره می‌باشند که شدت چرا در اطراف آن‌ها نسبت به سایر مناطق مرتعی زیاد بوده و با دور شدن از آن‌ها شدت چرا کاهش می‌یابد (۴، ۵، ۱۹، ۳۳، ۴۲ و ۴۶). بیشترین فشار چرا و به تبع آن بیشترین تخریب مرتع در نقاط نزدیک به نقطه کانونی رخ داده و نقاط دورتر به دلیل چرای سبک‌تر، تخریب کمتری دارند (۴، ۵، ۱۹، ۴۲ و ۴۶). به تغییراتی که در پارامترهای پوشش گیاهی، خاک و غیره با

اکوسیستم‌های مرتعی بخش وسیعی از خشکی‌های کره زمین (حدود ۴۶ درصد) را اشغال کرده‌اند (۴۳). بنا بر گزارش حاج عباسی و همکاران (۲۰)، مدیریت پایدار اکوسیستم، مستلزم شناخت و ارزیابی تغییرات در خصوصیات آن به منظور بهره‌برداری بهینه و پایدار از منابع می‌باشد. آنها همچنین گزارش کردند که از مهمترین عوامل مؤثر در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های خشکی، حفظ کمیت و کیفیت خاک آن می‌باشد. خاک از مهمترین اجزای تشکیل دهنده اکوسیستم‌های مرتعی است و تخریب آن باعث کاهش حاصلخیزی مرتع شده و احیای مجدد آن زمان‌بر، هزینه‌بر و در برخی موارد غیرممکن می‌باشد (۲۰). ایمانی و همکاران (۲۳) بیان کردند که بخشی از تعادل و ثبات

۱ و ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی  
۲ و ۴- دانشیار گروه منابع طبیعی و دانشجوی دکتری علوم مرتعداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی  
(Email: a\_ghorbani@uma.ac.ir)  
(\*) نویسنده مسئول  
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.69025

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

مراغه قشلاقی شهرستان پارس‌آباد مغان، بخش اصلادوز در سطح سه روستای (تولکلو، کلش و پنجالو) نزدیک هم (کمتر از ۵ کیلومتر) در سطحی حدود ۱۰۰۰ هکتار و در سطح یک واحد فیزیوگرافی، ژئومورفولوژیکی و تیپ گیاهی در استان اردبیل بعنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد (شکل ۱). شیب این مراغه کمتر از سه درصد (به صورت دشتی) می‌باشد. تغییرات ناچیز ارتفاع از سطح دریا و کمتر از ۲۰۰ متر و بارندگی براساس آمار ۲۵ ساله ایستگاه‌های اطراف، ۲۶۵ میلی‌متر و اقلیم منطقه براساس روش کوپن، نیمه‌خشک است (۴۷). خاک منطقه عمیق، با بافت لومی-رسی و حاصلخیز می‌باشد (۲۵). سیمای پوشش گیاهی علف-بوته‌زار می‌باشد و شیوه بهره‌برداری از مراغه به صورت چرای فصلی (اواخر پاییز تا اوایل بهار توسط دامداران روستایی - عشایری با ترکیب دام چراکننده عمدتاً گوسفند (بیش از ۹۵ درصد) و بز کمتر از ۵ درصد) است (۷).

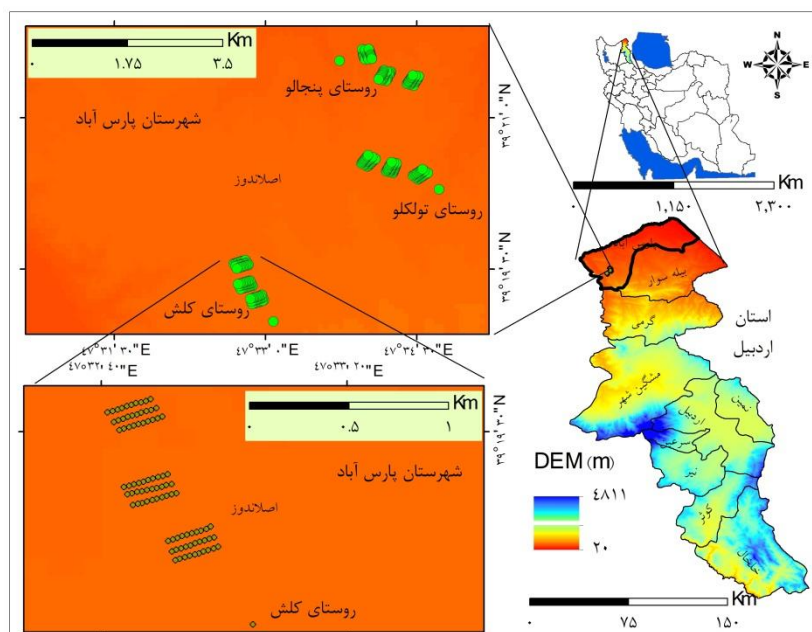
### انتخاب مکان، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری پارامترهای خاک

سه روستای تولکلو، کلش و پنجالو با شرایط اکولوژیکی (توپوگرافی، اقلیم، خاک و ...) تقریباً یکسان بعنوان نماینده مراغه علف-بوته‌زار مغان در شهرستان پارس‌آباد انتخاب شدند (شکل ۱). نمونه‌برداری در هر سه روستا در طول یک خط نمونه‌برداری اصلی (شروع از انتهای محدوده روستا و انتهای خط نمونه‌برداری اصلی در بزرگترین طول در سطح سامان تا مرز سامان روستای مجاور) در فواصل ۳۵۰ تا ۴۵۰ متری (سه نمونه به فواصل ۵۰ متر) با چرای سنگین، از ۷۲۵ تا ۸۲۵ متری (سه نمونه به فواصل ۵۰ متر) با چرای متوسط و از ۱۱۰۰ تا ۱۲۰۰ متری (سه نمونه به فواصل ۵۰ متر) با چرای سبک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری (بر اساس متوسط عمق افق بالایی خاک مورد مطالعه، و عمق ریشه‌دوانی اکثریت گونه‌های منطقه) و همچنین با بررسی منابع (۲۲) انجام شد. فاصله نقاط نمونه‌برداری به طور منظم و در سطح عرصه‌های طبیعی مراغه تعیین شد. نمونه خاک‌ها هواخشک شده و از الک ۲ میلی‌متری گذرانده شد و به آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه محقق اردبیلی منتقل شد. ابتدا با بررسی منابع مرتبط (۸، ۱۶، ۲۱، ۲۲ و ۳۲) که چه پارامترهای فیزیوشیمیایی باید در راستای هدف تحقیق و همچنین عملیات اصلاح و احیا مراغه و در کل مدیریت مراغه اندازه‌گیری شوند، مشخص و در نهایت پارامترهای خاک از جمله اسیدیته خاک (pH) با دستگاه pH متر در گل اشباع (۲۴)، هدایت الکتریکی (EC) با دستگاه EC سنج در عصاره گل اشباع (۲۴)، رطوبت وزنی اشباع با اندازه‌گیری اختلاف وزن بین خاک تر و خاک خشک شده در آون (۴۰)، سدیم و پتاسیم محلول با دستگاه فلیم فتومتر (۲۸)، پتاسیم تبدیلی به روش

افزایش فاصله از کانون بحران رخ می‌دهد، گرادیان چرا گفته می‌شود (۹، ۱۹، ۳۳ و ۴۲). تحقیقات نسبتاً زیادی در خصوص تأثیر گرادیان چرا بر خصوصیات خاک در دنیا انجام شده است. بطور مثال، شهریاری و همکاران (۴۵) در بررسی اثر گرادیان چرا بر خاک بیان کردند که با افزایش فاصله از آبشخور اسیدیته، نیتروژن، ماده آلی و هدایت الکتریکی افزایش یافته است. قربانی و همکاران (۱۹) گزارش کردند که فاصله از کانون بحرانی بر خاک لخت، ماده آلی، فسفر و پتاسیم و آهک اثر معنی‌دار، اما بر سنگ و سنگریزه، اسیدیته و هدایت الکتریکی اثر معنی‌داری نداشته است. آنتونی و همکاران (۶) اثر گرادیان چرا را در مراغه نیمه‌خشک بررسی و گزارش کرده‌اند که در فواصل نزدیک به آبشخور اسیدیته خاک افزایش، در حالی که مقدار نیتروژن و فسفر کاهش داشته است. همچنین، ساندهانگ هافمن و همکاران (۴۴) در بررسی اثر چرا بر پارامترهای خاک در بیوم ساوان آفریقای جنوبی اشاره کردند که در فواصل نزدیک آبشخور مقادیر اسیدیته، کلسیم، منیزیم، پتاسیم و روی افزایش یافته است. مراغه قشلاقی دشت مغان یکی از مراغه مهم و از قطب‌های دامداری سنتی عشایری (شاهسون) ایران است (۲۵). تحقیقات نسبتاً محدودی در ارتباط با تأثیر شدت چرا بر خصوصیات خاک، بخصوص در چارچوب گرادیان چرای در این منطقه انجام گرفته است. شناخت خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک و تأثیر چرا می‌تواند به مدیریت بهتر مراغه از جمله مراغه قشلاقی مغان که دارای چرای مفرط دام می‌باشد، کمک نماید. بدین مفهوم که آیا پارامترهای فیزیوشیمیایی خاک، شاخص مناسب برای استفاده در قالب گرادیان چرای برای ارزیابی تخریب مراغه مغان می‌باشند؟ تا در بخش اجرا علاوه بر شناخت حاصله از این تحقیق که فقط در سطح سه سامان روستایی انجام شده است، بتواند در قالب طرح‌های مرتعداری در طراحی مطالعات در قالب گرادیان چرای مد نظر قرار گرفته و شناختی از وضعیت تخریبی مراغه برای اعمال مدیریت صحیح را تولید نماید. از طرف دیگر، آیا چارچوب گرادیان چرای که به منظور ارزیابی تخریب مراغه در استرالیا توسعه و در اقصاء نقاط دنیا مورد استفاده قرار گرفته است، تنها با استفاده از پارامترهای خاک از کارایی لازم به منظور ارزیابی تخریب مراغه مغان برخوردار است. هر چند که روش گرادیان چرای در مناطق مختلف دنیا آزمون شده و در بسیاری از مناطق کارایی آن به اثبات رسیده است، ولی در بخش‌هایی نیز از کارایی لازم برخوردار نبوده است (۱۹). لذا، ضرورت دارد آزمون روش‌های مناسب ارزیابی تخریب در مراغه مغان نیز انجام گیرد تا بتوان از آن‌ها در ارزیابی تخریب این مراغه استفاده نمود. بنابراین، هدف این تحقیق، بررسی تأثیر شدت چرا بر برخی خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک در قالب چارچوب گرادیان چرای (فاصله از کانون‌های بحران) در مراغه دشت مغان بوده است.

به روش سوزاندن تر والکلی و بلک (۱۲)، رس قابل انتشار با روش هیدرومتر دوگانه (۳۱)، نیتروژن کل به روش اندازه‌گیری توسط دستگاه کج‌دال (۱۰)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با دستگاه الک تر (۴۹) و بافت خاک به روش هیدرومتری دو قرائته (۱۱) اندازه‌گیری شدند.

عصاره‌گیری با استات آمونیوم با دستگاه فلیم فتومتر (۲۸)، فسفر قابل جذب به روش اولسن با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل CECIL CE3041 (۳۸)، درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (۴۱)، کلسیم و منیزیم محلول به روش تیتراسیون (۱۷)، کربن آلی به روش سوزاندن تر والکلی و بلک (۳۹)، کربن آلی ذره‌ای



شکل ۱- مکان‌های نمونه‌برداری در شهرستان پارس آباد، استان اردبیل و کشور  
Figure 1- Sampling locations in Pars Abad county, Ardebil province and Iran

می‌باشد (جدول ۱).

نتایج تجزیه واریانس برای خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک در گرادیان چرای مراتع مغان نشان داد که اثر شدت چرا بر بیشتر خصوصیات خاک از جمله اسیدیته، هدایت الکتریکی، پتاسیم تبادل، فسفر قابل جذب، کلسیم و منیزیم محلول، ماده آلی، ماده آلی ذره‌ای، ازت، درصد رطوبت وزنی، میزان رس قابل انتشار، میانگین وزنی قطر خاکدانه، درصد شن و درصد رس خاک معنی‌دار نبوده ولی بر سدیم و پتاسیم محلول، آهک و درصد سیلت خاک معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) بود (جدول ۲).

#### مقایسه میانگین برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

همان‌گونه که از جدول ۲ پیداست، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های خاک نشان داد که بین شدت‌های مختلف چرا در مراتع مغان در مقادیر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده به غیر از سدیم و پتاسیم محلول، آهک و درصد سیلت خاک، در بقیه ویژگی‌های خاک تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد.

#### تجزیه و تحلیل داده‌ها

روش‌های مختلف آماری تک و چندمتغیره در ارزیابی تغییر پارامترهای گیاهی و خاک تحت تأثیر چرا مورد استفاده قرار گرفته است (۱۸، ۱۹، ۳۰، ۳۴، ۳۵ و ۴۸). در این تحقیق ابتدا نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگراف اسمیرنوف انجام شد. سپس به منظور تعیین تأثیر شدت چرا بر خصوصیات خاک از تجزیه واریانس دو طرفه و برای مقایسه میانگین داده‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن استفاده شد. تجزیه‌های آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS<sub>۱۹</sub> انجام شد.

#### نتایج و بحث

خاک مراتع مغان دارای pH قلیایی و از لحاظ هدایت الکتریکی، دارای شوری کم می‌باشد. از لحاظ میزان سدیم و پتاسیم محلول، پتاسیم تبادلی و فسفر قابل جذب، کربن آلی، کربن آلی ذره‌ای و نیتروژن کل خاک در حد مطلوب ولی از نظر آهک، می‌توان گفت که خاک مراتع مغان دارای آهک بالایی می‌باشد. خاک منطقه دارای رطوبت وزنی نسبتاً بالایی بوده و دارای کلاس بافتی لوم رس سیلتی

جدول ۱- میانگین و اشتباه معیار خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک مراتع مغان

Table 1- Average and standard error of soil physicochemical properties of Moghan rangelands

| متغیرهای خاک<br>Soil variables                                  | شدت چرا<br>Grazing Intensity | روستای تولکلو<br>Tolklo Village | روستای کلش<br>Kolash Village | روستای پنجالو<br>Panjalo Village | میانگین ± اشتباه معیار<br>Average ± Stdev |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| اسیدیته گل اشباع<br>pH                                          | سنگین Heavy                  | 7.60 <sup>a</sup>               | 7.64 <sup>a</sup>            | 7.70 <sup>a</sup>                | 7.66±0.15                                 |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 7.78 <sup>a</sup>               | 7.88 <sup>a</sup>            | 7.82 <sup>a</sup>                | 7.86±0.08                                 |
|                                                                 | سبک Light                    | 7.84 <sup>a</sup>               | 7.71 <sup>a</sup>            | 7.63 <sup>a</sup>                | 7.7±0.07                                  |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 7.74±0.13                                 |
| هدایت الکتریکی<br>Electrical Conductivity (dS m <sup>-1</sup> ) | سنگین Heavy                  | 0.42 <sup>a</sup>               | 0.40 <sup>a</sup>            | 0.34 <sup>a</sup>                | 0.39±0.03                                 |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 0.38 <sup>a</sup>               | 0.42 <sup>a</sup>            | 0.33 <sup>a</sup>                | 0.39±0.03                                 |
|                                                                 | سبک Light                    | 0.40 <sup>a</sup>               | 0.41 <sup>a</sup>            | 0.43 <sup>a</sup>                | 0.4±0.02                                  |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 0.39±0.03                                 |
| رطوبت وزنی<br>θm (%)                                            | سنگین Heavy                  | 51.19 <sup>a</sup>              | 56.95 <sup>a</sup>           | 53.38 <sup>a</sup>               | 54.65±3.91                                |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 50.68 <sup>a</sup>              | 43.08 <sup>a</sup>           | 52.00 <sup>a</sup>               | 48.28±5.99                                |
|                                                                 | سبک Light                    | 50.96 <sup>a</sup>              | 51.80 <sup>a</sup>           | 50.88 <sup>a</sup>               | 50.71±2.18                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 51.21±4.66                                |
| سدیم محلول<br>Soluble Sodium (meq l <sup>-1</sup> )             | سنگین Heavy                  | 1.74 <sup>a</sup>               | 2.14 <sup>a</sup>            | 1.14 <sup>c</sup>                | 1.68±0.26                                 |
|                                                                 | متوسط (Moderate)             | 1.97 <sup>a</sup>               | 2.35 <sup>a</sup>            | 1.83 <sup>b</sup>                | 2.02±0.21                                 |
|                                                                 | سبک Light                    | 1.46 <sup>a</sup>               | 2.21 <sup>a</sup>            | 2.44 <sup>a</sup>                | 2.06±0.24                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 1.92±0.27                                 |
| پتاسیم محلول<br>Soluble Potassium (meq l <sup>-1</sup> )        | سنگین Heavy                  | 0.06 <sup>a</sup>               | 0.06 <sup>a</sup>            | 0.04 <sup>a</sup>                | 0.05±0.01                                 |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 0.05 <sup>ab</sup>              | 0.04 <sup>b</sup>            | 0.03 <sup>a</sup>                | 0.04±0.002                                |
|                                                                 | سبک Light                    | 0.04 <sup>b</sup>               | 0.05 <sup>ab</sup>           | 0.05 <sup>a</sup>                | 0.05±0.01                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 0.04±0.01                                 |
| پتاسیم تبادل<br>Exchangeable Potassium (ppm)                    | سنگین Heavy                  | 317.03 <sup>a</sup>             | 474.11 <sup>a</sup>          | 350.26 <sup>a</sup>              | 386.54±14.31                              |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 371.06 <sup>a</sup>             | 426.98 <sup>b</sup>          | 388.07 <sup>a</sup>              | 392.92±53.47                              |
|                                                                 | سبک Light                    | 347.33 <sup>a</sup>             | 430.42 <sup>b</sup>          | 410.10 <sup>a</sup>              | 392.32±21.42                              |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 390.60±29.83                              |
| فسفر قابل استفاده<br>Available Phosphorus (ppm)                 | سنگین Heavy                  | 19.91 <sup>a</sup>              | 20.67 <sup>a</sup>           | 20.49 <sup>a</sup>               | 21.02±2.88                                |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 18.88 <sup>a</sup>              | 18.36 <sup>a</sup>           | 16.51 <sup>a</sup>               | 17.49±2.51                                |
|                                                                 | سبک Light                    | 17.28 <sup>a</sup>              | 15.49 <sup>a</sup>           | 16.62 <sup>a</sup>               | 16.23±2.55                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 18.24±3.15                                |
| آهک<br>Calcium Carbonate Equivalent (%)                         | سنگین Heavy                  | 14.00 <sup>a</sup>              | 11.90 <sup>a</sup>           | 16.17 <sup>a</sup>               | 15.86±0.57                                |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 16.98 <sup>ab</sup>             | 10.46 <sup>a</sup>           | 13.79 <sup>ab</sup>              | 13.02±1.18                                |
|                                                                 | سبک Light                    | 14.92 <sup>b</sup>              | 9.97 <sup>a</sup>            | 10.67 <sup>b</sup>               | 10.74±1.31                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 13.21±2.40                                |
| کلسیم<br>Soluble Calcium (meq l <sup>-1</sup> )                 | سنگین Heavy                  | 3.25 <sup>a</sup>               | 3.50 <sup>a</sup>            | 3.67 <sup>a</sup>                | 3.53±0.17                                 |
|                                                                 | متوسط Moderate               | 3.75 <sup>a</sup>               | 3.25 <sup>a</sup>            | 3.92 <sup>a</sup>                | 3.58±0.30                                 |
|                                                                 | سبک Light                    | 3.42 <sup>a</sup>               | 3.42 <sup>a</sup>            | 3.50 <sup>a</sup>                | 3.44±0.21                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages                     |                              |                                 |                              |                                  | 3.52±0.21                                 |
| منیزیم                                                          | سنگین Heavy                  | 0.83 <sup>a</sup>               | 1.58 <sup>a</sup>            | 0.58 <sup>ab</sup>               | 1.11±0.10                                 |

| متغیرهای خاک<br>Soil variables                        | شدت چرا<br>Grazing Intensity | روستای تولکلو<br>Tolklo Village | روستای کلش<br>Kolash Village | روستای پنجالو<br>Panjalo Village | میانگین ± اشتباه معیار<br>Average ± Stdev |
|-------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------|
| Soluble Magnesium<br>(meq l <sup>-1</sup> )           | Moderate متوسط               | 1.08 <sup>a</sup>               | 1.42 <sup>a</sup>            | 0.42 <sup>b</sup>                | 0.94±0.21                                 |
|                                                       | Light سبک                    | 1.00 <sup>a</sup>               | 1.92 <sup>a</sup>            | 1.00 <sup>a</sup>                | 1.22±0.17                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 1.09±0.19                                 |
| کربن آلی<br>Organic Carbon (%)                        | Heavy سنگین                  | 1.27 <sup>a</sup>               | 1.58 <sup>a</sup>            | 1.47 <sup>a</sup>                | 1.42±0.09                                 |
|                                                       | Moderate متوسط               | 1.21 <sup>a</sup>               | 1.57 <sup>a</sup>            | 1.34 <sup>a</sup>                | 1.35±0.02                                 |
|                                                       | Light سبک                    | 1.31 <sup>a</sup>               | 1.43 <sup>a</sup>            | 1.44 <sup>a</sup>                | 1.44±0.02                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 1.40±0.06                                 |
| کربن آلی ذره‌ای<br>Particular Organic Carbon (%)      | Heavy سنگین                  | 0.83 <sup>a</sup>               | 1.30 <sup>a</sup>            | 1.05 <sup>a</sup>                | 1.08±0.03                                 |
|                                                       | Moderate متوسط               | 0.83 <sup>a</sup>               | 1.12 <sup>b</sup>            | 1.19 <sup>a</sup>                | 0.99±0.08                                 |
|                                                       | Light سبک                    | 1.06 <sup>a</sup>               | 1.03 <sup>b</sup>            | 1.28 <sup>a</sup>                | 1.16±0.08                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 1.08±0.10                                 |
| نیتروژن<br>Nitrogen (%)                               | Heavy سنگین                  | 0.08 <sup>a</sup>               | 0.09 <sup>a</sup>            | 0.09 <sup>a</sup>                | 0.09±0.01                                 |
|                                                       | Moderate متوسط               | 0.09 <sup>a</sup>               | 0.08 <sup>b</sup>            | 0.08 <sup>a</sup>                | 0.08±0.002                                |
|                                                       | Light سبک                    | 0.09 <sup>a</sup>               | 0.09 <sup>a</sup>            | 0.09 <sup>a</sup>                | 0.09±0.01                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 0.09±0.01                                 |
| رس قابل انتشار<br>Dispersible clay (%)                | Heavy سنگین                  | 9.22 <sup>a</sup>               | 9.70 <sup>a</sup>            | 7.49 <sup>a</sup>                | 8.73±0.69                                 |
|                                                       | Moderate متوسط               | 8.91 <sup>a</sup>               | 6.86 <sup>a</sup>            | 9.74 <sup>a</sup>                | 8.28±0.72                                 |
|                                                       | Light سبک                    | 7.76 <sup>a</sup>               | 7.97 <sup>a</sup>            | 10.65 <sup>a</sup>               | 9.09±0.98                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 8.70±0.78                                 |
| میانگین وزنی قطر خاکدانه<br>Mean Weight Diameter (mm) | Heavy سنگین                  | 0.67 <sup>a</sup>               | 0.82 <sup>a</sup>            | 0.75 <sup>a</sup>                | 0.78±0.06                                 |
|                                                       | Moderate متوسط               | 0.69 <sup>a</sup>               | 0.76 <sup>a</sup>            | 0.71 <sup>a</sup>                | 0.70±0.12                                 |
|                                                       | Light سبک                    | 0.67 <sup>a</sup>               | 0.79 <sup>a</sup>            | 0.63 <sup>a</sup>                | 0.68±0.03                                 |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 0.72±0.08                                 |
| رس<br>Clay (%)                                        | Heavy سنگین                  | 28.57 <sup>a</sup>              | 23.51 <sup>a</sup>           | 32.77 <sup>a</sup>               | 30.44±4.12                                |
|                                                       | Moderate متوسط               | 35.24 <sup>a</sup>              | 30.84 <sup>a</sup>           | 34.44 <sup>a</sup>               | 31.57±2.08                                |
|                                                       | Light سبک                    | 34.44 <sup>a</sup>              | 29.51 <sup>a</sup>           | 30.11 <sup>a</sup>               | 31.13±2.55                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 31.05±2.68                                |
| سیلت<br>Silt (%)                                      | Heavy سنگین                  | 51.53 <sup>a</sup>              | 54.47 <sup>a</sup>           | 45.40 <sup>b</sup>               | 48.11±1.43                                |
|                                                       | Moderate متوسط               | 46.40 <sup>b</sup>              | 53.80 <sup>a</sup>           | 50.40 <sup>ab</sup>              | 51.20±1.45                                |
|                                                       | Light سبک                    | 45.67 <sup>b</sup>              | 53.13 <sup>a</sup>           | 52.07 <sup>a</sup>               | 51.64±2.67                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 50.31±2.37                                |
| شن<br>Sand (%)                                        | Heavy سنگین                  | 19.82 <sup>a</sup>              | 22.03 <sup>a</sup>           | 21.83 <sup>a</sup>               | 21.45±3.71                                |
|                                                       | Moderate متوسط               | 19.09 <sup>a</sup>              | 15.36 <sup>b</sup>           | 15.16 <sup>a</sup>               | 17.23±0.67                                |
|                                                       | Light سبک                    | 19.16 <sup>a</sup>              | 17.36 <sup>ab</sup>          | 17.83 <sup>a</sup>               | 17.23±2.00                                |
| متوسط سه روستا<br>Average of three villages           |                              |                                 |                              |                                  | 18.63±3.00                                |

در هر ستون اعداد دارای حروف مشابه دارای اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد برای آزمون دانکن نمی‌باشد.

In each column, the numbers with the same letters do not have a significant difference at the 5% level for the Duncan test

جدول ۲- تجزیه واریانس خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک تحت تأثیر سه شدت چرای سنگین، متوسط و سبک در مراتع مغان  
Table 2- Analysis of variance of soil physicochemical characteristics under three heavy, medium and light grazing intensities in Moghan rangelands

| Source of variation | منابع تغییرات | Grazing intensity    | شدت چرا               | Repeat  | تکرار | Error | خطا | CV (%) | ضریب تغییرات |
|---------------------|---------------|----------------------|-----------------------|---------|-------|-------|-----|--------|--------------|
| df                  | درجه آزادی    | 2                    | 2                     | 2       | 4     | 4     | 4   |        |              |
|                     | pH            | 0.03 <sup>ns</sup>   | 0.01 <sup>ns</sup>    | 0.02    | 1.58  |       |     |        |              |
|                     | EC            | 0.001 <sup>ns</sup>  | 0.001 <sup>ns</sup>   | 0.001   | 6.36  |       |     |        |              |
|                     | $\theta_m$    | 31.04 <sup>ns</sup>  | 28.64 <sup>ns</sup>   | 13.63   | 7.21  |       |     |        |              |
|                     | Na            | 0.13*                | 0.13*                 | 0.02    | 7.24  |       |     |        |              |
|                     | K soluble     | 0.0002*              | 0.0001 <sup>ns</sup>  | 0.00003 | 11.81 |       |     |        |              |
|                     | K available   | 37.24 <sup>ns</sup>  | 1798.53 <sup>ns</sup> | 861.72  | 7.52  |       |     |        |              |
|                     | P             | 18.47 <sup>ns</sup>  | 6.1 <sup>ns</sup>     | 7.51    | 15.02 |       |     |        |              |
|                     | TNV           | 19.705*              | 0.1 <sup>ns</sup>     | 1.66    | 9.77  |       |     |        |              |
|                     | Ca            | 0.02 <sup>ns</sup>   | 0.01 <sup>ns</sup>    | 0.08    | 8.01  |       |     |        |              |
| M.S                 | Mg            | 0.06 <sup>ns</sup>   | 0.02 <sup>ns</sup>    | 0.03    | 15.8  |       |     |        |              |
|                     | OC            | 0.01 <sup>ns</sup>   | 0.003 <sup>ns</sup>   | 0.003   | 4.14  |       |     |        |              |
|                     | POC           | 0.02 <sup>ns</sup>   | 0.001 <sup>ns</sup>   | 0.01    | 7.69  |       |     |        |              |
|                     | DC            | 0.49 <sup>ns</sup>   | 0.61 <sup>ns</sup>    | 0.67    | 9.43  |       |     |        |              |
|                     | N             | 0.0001 <sup>ns</sup> | 0.00001 <sup>ns</sup> | 0.0001  | 8.32  |       |     |        |              |
|                     | MWD           | 0.01 <sup>ns</sup>   | 0.01 <sup>ns</sup>    | 0.01    | 11.44 |       |     |        |              |
|                     | Sand          | 17.82 <sup>ns</sup>  | 0.85 <sup>ns</sup>    | 8.67    | 15.8  |       |     |        |              |
|                     | Silt          | 11.11*               | 9.65*                 | 0.82    | 1.8   |       |     |        |              |
|                     | Clay          | 0.98 <sup>ns</sup>   | 14.38 <sup>ns</sup>   | 6.71    | 8.34  |       |     |        |              |

\*\* معنی داری در سطح ۱ درصد، \* معنی داری در سطح ۵ درصد، <sup>ns</sup>: غیر معنی دار

\*\* Significant at 1% level, \* significant at 5% level, <sup>ns</sup>: no significant

فضولات دامی در اثر تردد دام می باشد که اگر افزایش پتاسیم در منطقه با شدت چرای زیاد در اثر تعداد زیاد دام در نظر گرفته نشود، نتیجه گیری می شود که میزان پتاسیم محلول خاک با افزایش شدت چرا کاهش می یابد. در منطقه با شدت چرای سبک میزان پتاسیم محلول خاک به دلیل وجود پوشش گیاهی، به دلیل کمتر قرار گرفتن در معرض چرای دام بیشتر است. زیرا، وجود پوشش گیاهی از یک سو، از فرسایش خاک جلوگیری می کند و به تبع آن مانع از بین رفتن پتاسیم محلول خاک می شود و از سوی دیگر، بعد از تخریب پوشش گیاهی، پتاسیم موجود در آن، به خاک برگردانده می شود. در منطقه با شدت چرای سنگین نیز میزان پتاسیم محلول خاک بیشتر است که علت آن را از طرفی، می توان به تردد و فضولات دامی ربط داد و از طرف دیگر، به کمتر مصرف شدن پتاسیم محلول خاک توسط گیاه به دلیل پایین بودن درصد پوشش گیاهی در این منطقه نسبت داد. ولی در منطقه با شدت چرای متوسط، میزان پتاسیم محلول خاک کمتر می باشد. زیرا از یک سو، پتاسیم محلول خاک در اثر فرسایش خاک به دلیل کمتر بودن پوشش گیاهی در اثر چرای دام از بین می رود و از سوی دیگر، تعداد دام به اندازه ای نیست که پتاسیم خاک در اثر فضولات دام افزایش یابد که این نتایج با نتایج جواد و همکاران (۲۷)، جلیوند و همکاران (۲۶) و کاویان پور و همکاران (۲۹) همخوانی دارد. در مجموع تأثیر شدت چرا بر تغییرات سدیم و پتاسیم توام با

به این ترتیب، نتایج حاصل از مقایسه میانگین برای پارامترهای سدیم و پتاسیم محلول، آهک و درصد سیلت خاک نشان داد (جدول ۳) که با نزدیکی به کانون بحران و افزایش شدت چرا، از میزان سدیم محلول خاک کاسته شده است؛ به طوری که بیشترین میزان آن مربوط به شدت چرای سبک و کمترین میزان آن مربوط به شدت چرای سنگین می باشد. ولی بین دو منطقه با شدت چرای متوسط و سبک از لحاظ آماری، اختلاف معنی داری مشاهده نشد ولی از لحاظ مقداری، میزان سدیم محلول در شدت چرای سبک بیشتر از شدت چرای متوسط می باشد. احتمالاً با افزایش شدت چرای دام و از بین رفتن پوشش گیاهی از یک سو و افزایش تردد توسط دام در منطقه با شدت چرای سنگین، خاک دچار فرسایش شده و این باعث از بین رفتن اغلب عناصر از جمله سدیم از خاک به همراه ذرات ریز خاک شده است که باعث کاسته شدن میزان سدیم محلول در این منطقه شده است. از طرفی، هر چقدر به منطقه بحرانی روستا نزدیک و شدت چرا افزایش می یابد، میزان پتاسیم محلول بیشتر می شود؛ به طوری که بیشترین میزان پتاسیم محلول در شدت چرای سنگین مشاهده شد که از لحاظ آماری، اختلاف معنی داری با شدت چرای سبک نداشت و کمترین میزان آن در منطقه با شدت چرای متوسط مشاهده شد. ولی از لحاظ مقداری بین دو منطقه با شدت چرای سنگین و سبک، بیشترین میزان مربوط به شدت چرای سنگین بود که ناشی از وجود



سنگین کلاس بافتی به تدریج از لومی رسی سیلتی به کلاس لومی تغییر یافته است. به عبارتی خاک به سمت شنی شدن پیش رفته است که این نتیجه شنی شدن بیشتر در ذرات سیلتی خود را نشان داده است. درصد شن و درصد رس نیز متغیر بود ولی اختلاف معنی داری بین مناطق با شدت های مختلف چرا بین آنها نبود. به طوری که بیشترین میزان درصد رس از لحاظ مقداری در شدت چرای سبک و کمترین میزان آن در شدت چرای سنگین مشاهده شد. بیشترین میزان شن مربوط به شدت چرای سنگین و کمترین میزان آن مربوط به شدت چرای سبک بوده است. درصد سیلت خاک به عنوان جزئی از بافت خاک، جزء پارامترهایی بود که تحت تأثیر چرای دام قرار گرفته و اختلاف معنی دار بین شدت های مختلف چرا دیده شد. به طوری که با نزدیکی به کانون بحران و افزایش شدت چرای دام، میزان سیلت خاک کاهش یافته است، و بیشترین میزان آن در منطقه با شدت چرای سبک و متوسط و کمترین میزان آن در منطقه با شدت چرای سنگین مشاهده شد. بین دو فاصله با شدت چرای سبک و متوسط از لحاظ آماری، اختلاف معنی داری مشاهده نشد ولی از لحاظ عددی مقدار آن در فاصله با شدت چرای سبک بیشتر از فاصله با شدت چرای متوسط بوده است. درصد سیلت خاک به عنوان جزئی از بافت خاک، جزء پارامترهایی بود که تحت تأثیر چرای دام قرار گرفته است. با تردد دام در سطح خاک، ساختار و ساختمان خاک به هم ریخته و در کنار آن با توجه به بارندگی های رخ داده، خاکی که ساختمان آن از هم پاشیده، مواد دانه ریز از جمله سیلت شسته شده و ذرات درشت باقی مانده است و خاک در این شرایط به سمت شنی شدن پیش رفته است. آقاجان تبار و همکاران (۱) در مطالعه خود در حوزه آبخیز واز استان مازندران نیز به این نتیجه رسیدند که با افزایش شدت چرا، خاک به سمت شنی شدن پیش می رود که نتایج ما را تأیید می کند. همچنین در مناطق با شدت بهره برداری مختلف توسط دام، درصد خاکدانه ها تا حدودی متغیر است که این امر ناشی از وجود ماده آلی و

ابهام می باشد و ضرورت دارد در مقیاس مناسب و با استفاده از چارچوب مناسب مورد توجه قرار گیرد. از نظر آهک خاک، بیشترین میزان آن در شدت چرای سنگین و کمترین میزان آن در شدت چرای سبک مشاهده شد که می توان اظهار داشت که با نزدیکی به کانون بحران و افزایش شدت چرای دام، میزان این پارامتر افزایش یافته است. دومار (۱۵) گزارش کرده است که با افزایش شدت چرا، عمق خاک کاهش و این امر باعث نزدیک شدن کربنات به خاک رویی و در نتیجه باعث افزایش آهک خاک می شود. همچنین، کلاری (۱۳) گزارش کرده است که ماده آلی در مناطق کمتر چرا شده بیشتر است. لذا، وقتی ماده آلی در خاک تجزیه شود، اسید آلی و اسید معدنی تولید می شود که رایج ترین این اسیدها، اسید کربنیک است. اگر چه اسید کربنیک، اسید ضعیفی است ولی تولید دائم آن در خاک که تراکم ریشه زیاد است، باعث حل شدن آهک و شستشوی آن از خاک و در نتیجه کاهش آهک در خاک سطحی را در پی خواهد داشت. احمدی و همکاران (۳) در بررسی تأثیر قرق بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در کهنه لاشک کجور مازندران به این نتیجه رسیدند که قرق باعث کاهش آهک خاک شده است که در تأیید نتایج ما می باشد. آنها همچنین گزارش کرده اند که با افزایش نفوذپذیری خاک، بی کربنات از محیط خارج می شود. از آنجا که نفوذپذیری خاک مرتعی با شدت چرای بالا، کمتر بوده؛ از این رو، آب نفوذ یافته به داخل خاک کمتر شده و خروج آهک از خاک کم می شود. در مقابل، در مرتع قرق شده که شدت چرا وجود ندارد نفوذپذیری خاک به علت پوشش گیاهی بیشتر، بهتر بوده و لذا افزایش نفوذپذیری و آبشویی، مقدار آهک در منطقه قرق شده کاهش یافته است. آقاسی و همکاران (۲) نیز در تحقیق خود نتایج مشابهی را گزارش کرده اند که تأیید کننده نتایج تحقیق ما می باشد. نتایج حاصل از آنالیز داده ها برای بافت خاک در تحقیق ما نشان داد که بافت خاک تغییر محسوسی نداشته است. بطوری که در هر دو فاصله با شدت چرای سبک و متوسط کلاس بافتی خاک، لومی رسی سیلتی بود، ولی در منطقه با شدت چرای

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین بین شدت های مختلف چرا با آزمون دانکن

Table 3- Results of mean comparison between different grazing intensities of Duncan test

| شدت چرا<br>Grazing intensity    | سدیم محلول<br>Soluble Sodium<br>( $\text{meq l}^{-1}$ ) | پتاسیم محلول<br>Soluble Potassium<br>( $\text{meq l}^{-1}$ ) | آهک<br>Calcium Carbonate Equivalent<br>(%) | سیلت<br>Silt<br>(%) |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| Heavy grazing شدت چرای سنگین    | 1.68 <sup>b</sup>                                       | 0.05 <sup>a</sup>                                            | 15.86 <sup>a</sup>                         | 48.11 <sup>b</sup>  |
| Moderate grazing شدت چرای متوسط | 2.02 <sup>a</sup>                                       | 0.04 <sup>b</sup>                                            | 13.02 <sup>ab</sup>                        | 51.2 <sup>a</sup>   |
| Light grazing شدت چرای سبک      | 2.06 <sup>a</sup>                                       | 0.05 <sup>a</sup>                                            | 10.74 <sup>b</sup>                         | 51.64 <sup>a</sup>  |

در هر ستون اعداد دارای حروف مشابه دارای اختلاف معنی داری در سطح ۵ درصد برای آزمون دانکن نمی باشد.

In each column, the numbers with the same letters do not have a significant difference at the 5% level for the Duncan test

خاکدانه ها در منطقه با شدت چرای کم و یا متوسط بیشتر است. این نتایج با نتایج موداهیر و تاسکین (۳۷) همخوانی دارد که اظهار داشتند

سطح پوشش متفاوت بوده که موارد یاد شده از برخورد مستقیم قطرات باران به خاکدانه ها جلوگیری می نماید. در نتیجه ثبات

در چرای سبک، ثبات خاکدانه‌ای بیشتری نسبت به چرای سنگین دارد.

## نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که با افزایش شدت چرای دام از میزان سدیم محلول و درصد سیلت خاک کاسته شده و بر میزان پتاسیم محلول و آهک خاک افزوده شده است. تغییرات پارامترهای خاک بر اثر شدت چرا و با توجه به گرادیان چرای، اثر منفی بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک از جمله سدیم محلول، آهک و درصد سیلت خاک دارد. بنابراین، در مدیریت اکوسیستم‌های مرتعی و انجام برنامه‌های اصلاحی و احیایی، باید به خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک توجه شود.

در کل، بررسی نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل تغییرات پارامترهای خاک بر اثر شدت چرا با در نظر گرفتن روستا به عنوان کانون بحران (گرادیان چرای) نشان داد که چرای بی‌رویه در مقایسه

با چرای متعادل، سبب پیامدهای نگران‌کننده در خاک می‌شود. چرای بیش از حد، با ایجاد تغییرات منفی در عناصر غذایی خاک و پوشش گیاهی، پایداری اکوسیستم‌های مرتعی را به خطر می‌اندازد. لذا، اعمال مدیریت چرا می‌تواند سبب بهبود کیفیت و کمیت پوشش گیاهی و در نهایت بهبود ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شود. بنابراین، شدت چرای کم باعث بهبود کیفیت خاک، شدت چرای متوسط باعث حفظ و بهره‌برداری بهینه از منابع خاک و شدت چرای زیاد باعث تغییرات شدید در خصوصیات خاک مرتع می‌شود. از این رو، شدت چرای متوسط که از چرای متعادل برخوردار است، برای بهره‌برداری از مراتع منطقه که سبب استفاده بهینه و پایدار از منابع خاک آن می‌شود، توصیه می‌شود. اگر شدت چرا در حد متوسط باشد، خاک مرتع کمتر دچار تنزل کیفیت شده و می‌تواند تولید پایدار داشته باشد. در کل با توجه به نتایج حاصله چارچوب گرادیان چرای با استفاده از پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک از کارایی لازم برای ارزیابی تخریب مراتع مغان برخوردار نمی‌باشد.

## منابع

- 1- Aghajantabar Ali H., Mohseni Saravi M., Chaichi M.R., and Heidari G. 2015. Grazing pressure effect on soil physical and chemical characteristics and vegetation cover in Vaz Watershed, Mazandaran Province, Journal of Watershed Management Research, 11:111-123. (In Persian with English abstract)
- 2- Aghasi M.J., Bahmaniar M.A., and Akbarzadeh M. 2006. Comparison of the effects of exclusion and water spreading on vegetation and soil parameters in Kyasar rangelands, Mazandaran province, Journal of Agriculture Science Natural Resource, 13(4):73-84. (In Persian with English abstract)
- 3- Ahmadi T., Malek Poor B., and Kazemi Mazandarani S.S. 2011. Investigation of exclosure effect upon physical and chemical properties of soil at Kohne Lashak Mazandaran, Plant Ecophysiology, 8(3):89-100. (In Persian with English abstract)
- 4- Ajorlo M. 2007. Effects of distance from critical points on the soil and vegetation characteristics of rangelands, Journal of Watershed Management Research, 74:170-174. (In Persian with English abstract)
- 5- Andrew M.H. 1988. Grazing impacts in relation to livestock watering points, Trends in Research Ecology Evolution, 3:336-339.
- 6- Anthony E., Bernard B., Henry M.M., and Paul N. 2015. Piosphere syndrome and rangeland degradation in Karamoja sub-region, Uganda, Resources and Environment, 5(3):73-89.
- 7- Arjmand K. 2016. The effect of different grazing gradient on density and production of Sagebrush in different distances from critical center in Moghan plain. MSc Thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 106pp. (In Persian with English abstract)
- 8- Bagheri R., Mohseni Saravi M., and Chaichi M.R. 2009. Study the effect of grazing intensity on some soil chemical properties in a semi-arid region of Khogir national park and rangelands around it, Iranian Journal of Rangeland, 3(3):398-412. (In Persian with English abstract)
- 9- Bastin G.N., Pickup G., Chewing V.H., and Pearce G. 1993. Land degradation assessment in arid area by using of grazing gradient and remotely sensed data, Rangeland Journal, 15(2):90-126.
- 10- Black C.A., Evans D.D., Ensminger L.E., White G., and Clark F.E. 1965. Methods of soil analysis, Part 1, Physical analysis, American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 11- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils, Agronomy Journal, 54(5):464-465.
- 12- Cambardella C.A., and Elliott E.T. 1992. Particulate soil organic- matter changes across a grassland cultivation sequence, Soil Science Society of America Journal, 56:777-783.
- 13- Clary W.P. 1995. Vegetation and soil responses to grazing simulation on riparian meadows, Journal of Range Management, 48:18-25.
- 14- Drewry J.J., Lowe J.A., and Paton R.J. 2004. Effect of sheep stocking intensity on soil physical properties and dry

- matter production on a Southland, New Zealand Journal of Agricultural Research, 42:493-499.
- 15- Dormaar J.F., and Walter D.W. 1998. Effect of forty-four years of grazing on fescue grassland soils, Journal of Range Management, 51:122-126.
- 16- Du Toit G., Van N., Snyman H.A., and Malan P.J. 2009. Physical impact of grazing by sheep on soil parameters in the Nama Karoo subshrub/grass rangeland of South Africa, Journal of Arid Environments, 73:804-810.
- 17- Emami A. 1996. Plant analysis methods. Soil and Water Research Institute, Tehran University Press, 1(982): 248pp. (In Persian)
- 18- Gao Y., Schumann M., Chen H., Wu N., and Luo P. 2009. Impacts of grazing intensity on soil carbon and nitrogen in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau, Journal of Food, Agriculture and Environment, 7(2): 749-754.
- 19- Ghorbani A., Ahmadalei V., and Asghari A. 2014. Study the effect of distance from village on plant diversity and composition in rangeland of southeastern Sabalan, Iranian Journal of Rangeland, 8(2): 178-191. (In Persian with English abstract)
- 20- Hajabbasi M.A., Besalatpour A., and Melali A.R. 2008. Impacts of converting rangelands to cultivated land on physical and chemical properties of soils in west and southwest of Isfahan, Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, 11(42): 525-534. (In Persian with English abstract)
- 21- Heidarian Aghakhani M., Naghipour Borj A.A., and Tavakoli H. 2010. The effects of grazing intensity on vegetation and soil in Sisab rangelands, Bojnord, Iran, Iranian Journal of Range and Desert Research, 17(2): 243-255. (In Persian with English abstract)
- 22- Hossein Jafari S., Tatian M., Tamartash R., and Karimian A. 2014. Investigating the effect of grazing animal type on vegetation and soil using multivariate analysis method, Iranian Journal of Rangeland, 8(2): 192-200. (In Persian with English abstract)
- 23- Imani J., Tavili A., Bandak I., and Gholinezhad B. 2010. Assessment of vegetation changes in rangeland and under different grazing intensities. Case study: Charandow of Kurdistan province, Iranian Journal of Range and Desert Research, 17(3): 508-524. (In Persian with English abstract)
- 24- Jackson M.A. 1962. Soil chemical analysis, Constable and Co Ltd, London.
- 25- Jafari S. 2017. Comparison of physical and chemical properties of soil in Mughan and Sabalan rangelands. MSc Thesis, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, 148pp. (In Persian with English abstract)
- 26- Jalilvand H., Tamartash R., and Heydarpour H. 2007. Grazing impact on vegetation and some soil chemical properties in Kojour Rangelands, Noushahr, Iran, Iranian Journal of Rangeland, 1(1): 53-66. (In Persian with English abstract)
- 27- Javadi S.A., Jafari M., Azarnivand H., and Zahedi G.H. 2005. Investigation on grazing effects upon soil parameters at Lar summer rangeland, Journal of Agricultural Sciences, 11(4): 71-77. (In Persian with English abstract)
- 28- Jones J.B. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis. Boca Raton, London, New York and Washington, D.C.CRC Press, p. 152-153.
- 29- Kavianpoor A.H., Heshmati Gh.A., and Hosini S.H. 2015. Investigation of changes in rangeland soil characteristics and its functional attributes affected by different grazing intensities (Case study: mountainous rangelands of Nesho, Mazandaran province), Water and Soil Science, 25(4):157-168. (In Persian with English abstract)
- 30- Khademolhosseini Z., and Yazdani Jahromi N. 2014. The effect of grazing intensity on the elements of N, P and K in Gardaneh Zانبوري Rangeland of Arsanjan, Iran, International Journal of Agriculture Innovations and Research, 3(1): 2319-1473.
- 31- Klute A. 1996. Methods of Soil Analysis, Part I: Physical and Mineralogical Methods. SSSA Book Series, No. 5. Soil Science Society of America Madison, WI, 1188pp.
- 32- Kohandel A., Arzani H., and Hosseini Tavassol M. 2011. Effect of grazing intensity on soil and vegetation characteristics using principal components analysis, Iranian Journal of Range and Desert Research, 17(4): 518-526. (In Persian with English abstract)
- 33- Lange R.T. 1969. The piosphere: sheep track and dung patterns, Journal of Range Management, 22: 396-400.
- 34- Li W., Huang H. Zh., Zhang Zh. N., and Wu G.L. 2011. Effects of grazing on the soil properties and C and N storage in relation to biomass allocation in an alpine meadow, Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 11(4): 27-39.
- 35- MacLachlan K. 2013. The Effects of Grazing on Soil Physical and Chemical Properties and Plant Diversity in North-Central Alberta, 39pp.
- 36- Mesdaghi M. 2003. Range Management in Iran. Emam Reza University, 326pp. (In Persian)
- 37- Mudahir O., and Taskin O. 2003. Overgrazing effect on rangeland soil properties. International conference on sustainable land use and management, Canakkle, Turkey.
- 38- Murphy J., and Riley P. 1988. A modified single solution method for determination of phosphate in natural water. In: Methods of Soil Analysis. Part. 2. Chemical and microbiological properties. Page, E. L., R. H. Miller and R. D. Keeney (eds.), American Society of Agronomy. Inc. Soil Science Society of America Publisher, WI.

- 39- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods. Sparks, DL. (ed.), SSSA Book Series Number 5, Soil Science Society of America, Madison, WI, p.153-188.
- 40- Page A.L. 1992. Methods of Soil Analysis. ASA and SSSA Publishers: Madison, WI.
- 41- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Madison, WI.
- 42- Pickup G., and Chewing V.H. 1994. A grazing gradient approach to land degradation assessment in Arid areas from remotely sensed data, International Journal of Remote Sensing, 15(3): 597-617.
- 43- Sanadgol A. 2002. Short-term effects of systems and grazing intensities on soil, vegetation and livestock production in *Bromus tomentellus* Boiss pasture. PhD thesis, Tehran University, 147pp. (In Persian with English abstract)
- 44- Sandhage- Hofmann A., Kotze E., Van Delden L., Dominiak M., Fouche H.J., van der Westhuizen H.C., Oomen R., du Preez Ch., and Amelung W. 2015. Rangeland management effects on soil properties in the savanna biome, South Africa: A case study along grazing gradients in communal and commercial farms, Journal of Arid Environments, 120:14-25.
- 45- Shahriary E., Palmer M.W., Tongway D.J., Azarnivand H., Jafari M., and Mohseni Saravi M. 2012. Plant species composition and soil characteristics around Iranian piospheres, Journal of Arid Environments, 82:106-114.
- 46- Tarhouni M., Ben Salem F., Ouled Belgacem A., and Neffati M. 2010. Acceptability of plant species along grazing gradients around watering points in Tunisian arid zone, Flora, 205(7):454-461.
- 47- Tavosi T., and Delara Gh. 2011. Climatic Zoning the Ardabil Provinces, Journal of Nivar, 70-71:47-52. (In Persian with English abstract)
- 48- Wang Z., Johnson D.A., Rong Y., and Wang K. 2016. Grazing effects on soil characteristics and vegetation of grassland in northern China, Solid Earth, 7: 55-65.
- 49- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and study of the physical nature of erosion losses, Journal of American Society of Agronomy, 28(5): 337-351.



## The Effects of Livestock Grazing Intensity on Soil Physicochemical Properties in Moghan Rangelands

S. Jafari<sup>1</sup> - A. Ghorbani<sup>2\*</sup> - K. Hashemimajd<sup>3</sup> - S. Ghafari<sup>4</sup>

Received: 04-12-2017

Accepted: 02-07-2018

**Introduction:** Soil is one of the important components of rangeland ecosystems. Soil is the natural and dynamic layer of the earth that act as an important component of rangeland ecosystems for the human food security and plants mechanical support which is the background for growth of them. Soil degradation decreases the potential of rangeland production; because soil is the primary factor for forage production in any rangelands with any kind of weather. Different grazing intensities change the chemical and physical properties of soil and plant composition of rangelands. It is important to know soil properties for the proper management of rangeland ecosystems. Therefore, this study was carried out with the objective of investigating the effects of grazing intensity on soil physical and chemical properties in Moghan rangelands using grazing gradient framework.

**Materials and Methods:** Three villages of Tolklo, Kolash and Panjalo were selected as the representatives of grass-shrubland in Moghan rangelands, in Parsabad county, Ardabil province, northwest of Iran. Samples were collected from three grazing intensities and three distances from the center of villages, as the critical center. Three soil samples were taken at each distance of village (three replications) from 0 to 30 cm (main root activity areas) depth (27 samples). Soil parameters including pH, electrical conductivity, saturated water content, dissolved sodium, potassium, calcium, magnesium, exchangeable potassium, available phosphorus, calcium carbonate equivalent, organic carbon, particulate organic carbon, dispersible clay, total nitrogen, aggregate mean weight diameter and soil texture were measured. To identify the trend of changing soil parameters in different grazing intensities including light, moderate and heavy, weighted average was taken for each three samples, which were collected from the three-grazing intensity at each village. Data statistically analyzed by using the Two-way analysis of variance and using Duncan's multiple range test.

**Results and Discussion:** The results of the soil data analysis showed that except dissolved sodium and potassium, lime and soil silt percentage, there was no significant statistical difference between measured values of soil properties in different grazing intensities in Moghan rangelands. The result of the mean comparison for soluble sodium and potassium, lime and soil silt percentage showed that with increase of grazing intensity, the values of soluble sodium decreased. In addition, at the nearby of critical center and with the increase of grazing intensity, the values of soluble potassium increased. However, its highest and lowest amount was observed at the heavy grazing intensity and moderate grazing intensity, respectively. The highest and lowest amount of lime were also observed at the heavy and light grazing intensity, respectively. In other words, in nearby to critical center and with the increase of grazing intensity the value of these parameters increased. The results of the data analysis for soil texture showed that in both areas with the light and moderate grazing intensity, soil texture class was silty clay loam, but in the areas with heavy grazing intensity, soil texture class had gradually changed from silty clay loam to loamy texture. In other words, the soils had progressed to sandy soils, which is due to the change in their silty particles. With approaching to the critical center and with increase of grazing intensity the value of silt percentage decreased. The highest amounts of silt percentage were related to the light and moderate grazing intensities and its lowest amount was recorded in heavy grazing intensity. Results showed that the effects of heavy grazing on soil properties in the grazing gradient framework is detectable, and this framework can be sued for rangeland monitoring to detect the rangeland condition.

1, 2, 3 and 4 - Graduated MSc in Soil Science and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Respectively

(\* - Corresponding Author Email: a\_ghorbani@uma.ac.ir)

2 and 4- Associate Professor and PhD Student of Rangeland Science, Department of Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

**Conclusion:** Heavy grazing and overall utilization of rangelands have caused soil degradation in most rangelands of Iran. This study revealed that heavy grazing jeopardized the sustainability of the rangeland ecosystem by creating unfavorable changes in soil and available minerals. Therefore, it recommended that soil parameters must be included in rangeland inventory and monitoring to use soil information for sustainable range management and, particularly in rangeland restoration and to select sustainable strategies for better and suitable management of these rangelands.

**Keywords:** Critical center, Grazing gradient, Rangeland ecosystem



## تأثیر زئولیت، ورمی کمپوست و کود حیوانی بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در ذرت

سیده زهره تقدیسی حیدریان<sup>۱</sup> - رضا خراسانی<sup>۲\*</sup> - حجت امامی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶

### چکیده

زئولیت عموماً به عنوان یک ماده اصلاحی برای خاک استفاده می‌شود. اضافه کردن برخی از مواد معدنی نظیر زئولیت علی‌رغم تأثیر مثبت بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌تواند در سطوح زیاد تأثیر منفی بر جذب عناصر غذایی و رشد گیاه داشته باشد. به همین منظور آزمایش گلدانی با هدف بررسی تأثیر زئولیت، کود حیوانی و ورمی کمپوست بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی تحت شرایط کنترل شده انجام شد. فاکتورهای آزمایشی شامل زئولیت در سه سطح (صفر، ۶ و ۱۲ درصد وزنی)، نوع ماده آلی شامل ورمی کمپوست در سه سطح (صفر، ۰/۱۲۵ و ۰/۲۵ درصد وزنی) و کود گاوی پوسیده در سه سطح (صفر، ۰/۵ و ۱ درصد وزنی) بودند. نتایج آزمایش نشان داد در بین سطح ۶ و ۱۲ درصد زئولیت، سطح ۶ درصد آن نسبت به ۱۲ درصد کارایی بهتری داشته است و سطح ۱۲ درصد زئولیت نسبت به شاهد باعث کاهش ۱۹ درصدی وزن خشک گیاه و کاهش وزن تر، که کاهش وزن تر نسبت به شاهد معنی‌دار نبود. همچنین این سطح زئولیت جذب عنصر روی، آهن و منگنز در گیاه کاهش داد و به ترتیب سبب افزایش ۸/۹۳ و ۴۰ درصدی pH و غلظت منگنز خاک شد. در بین تیمارهای آزمایشی، سطح ۱ درصد کود گاوی در عدم حضور زئولیت بیشترین مقدار وزن تر و خشک گیاه، ارتفاع گیاه، جذب عناصر روی، آهن و منگنز در اندام هوایی گیاه را دارا بود. همچنین کمترین مقدار pH خاک مربوط به این سطح بوده که اختلاف معنی‌داری نسبت به بقیه تیمارها و همچنین تیمار شاهد داشت. در نهایت در بین تیمارهای آزمایشی، کارایی ورمی کمپوست نسبت به کود گاوی کمتر بوده و بیشترین تأثیر بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت مربوط به تیمارهای کود گاوی و کمترین مربوط به تیمار زئولیت بود.

**واژه‌های کلیدی:** تغذیه گیاه، زئولیت، کود گاوی، مواد آلی

### مقدمه

نفوذپذیری مناسب و دارای pH ۵/۵ تا ۶/۵ باشند مناسب‌تر بوده و رشد بهتری دارد. از آنجا که کمبود مواد آلی، زیاد بودن pH، دسترسی کم گیاه به بعضی از عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی شایع است لذا باید سعی شود سطح مواد آلی در این خاک‌ها بالا نگه داشته شود (۱۳). استفاده از مواد آلی به دلیل اثرات مفیدی که بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند ضروری است. مصرف کودهای آلی به خصوص ورمی کمپوست علاوه بر تأمین بخشی از نیاز غذایی گیاه، مواد آلی خاک را افزایش می‌دهد و باعث حاصلخیزی خاک می‌شود (۴۵). ورمی کمپوست فرآورده حاصل از کرم‌های خاکی است که دارای عناصر پر مصرف و کم مصرف مورد نیاز گیاه می‌باشد. ساها و همکاران (۴۳) در آزمایشی با بررسی اثر کود آلی بر عملکرد ذرت، افزایش غلظت عناصر کم مصرف در دانه ذرت مشاهده کردند. الله دادی و همکاران (۲) گزارش کردند مقادیر مختلف ورمی کمپوست میزان عملکرد ماده خشک و ارتفاع گیاه ذرت را افزایش می‌دهد. هاوولین و همکاران (۱۹) بیان کردند که مواد آلی موجود در خاک به وسیله میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و با تولید اسیدهای آلی و آزاد کردن CO<sub>2</sub>، pH خاک را کاهش می‌دهند. یکی دیگر از منابع آلی

امروزه افزایش عملکرد بسیاری از محصولات از جمله غلات از اهمیت زیادی برخوردار است. به منظور پایداری در افزایش عملکرد و جلوگیری از کاهش رشد آنها، توجه به مدیریت تغذیه و حاصلخیزی خاک بسیار الزامی است. قابلیت دسترسی عناصر غذایی از عوامل مؤثر بر رشد گیاه است توجه به ارزش عناصر کم مصرف از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. هر چند که عناصر کم مصرف در مقادیر بسیار کمی توسط گیاه جذب می‌شوند ولی به همان اندازه در رشد گیاه مؤثر هستند به خصوص که نقش فعال کننده‌ی در بسیاری از فرآیندها و واکنش‌های گیاهی دارند (۲۰). سه عنصر آهن، روی و منگنز بیش از سایر عناصر در امر تغذیه گیاه به خصوص ذرت نقش دارند (۲۳). کاشت ذرت اغلب در خاک‌هایی که دارای مواد آلی زیاد، عمق کافی،

۱ و ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
(\*) نویسنده مسئول

(Email: khorasani@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.68534

کودهای دامی هستند که در کشاورزی در جهت اصلاح ساختمان خاک و همچنین تغذیه گیاهان به کار می‌روند. افزودن کودهای دامی و تجزیه آن در خاک، باعث می‌شود عناصر کم مصرف موجود در این کودها به تدریج آزاد شده و در دسترس گیاهان قرار بگیرد و از هدر رفت آنها در اثر شستشو جلوگیری می‌کند (۴۹). پارسونز و همکاران (۴۰) و آپینگ و همکاران (۱) گزارش کردند که با مصرف کود دامی عملکرد ذرت علوفه‌ای افزایش یافت. علاوه بر کودهای آلی یکی از رایج‌ترین مواد معدنی که می‌توان در بر طرف نمودن مشکلات کمبود آب، بهبود خصوصیات فیزیکی، کاهش آبسویی عناصر و افزایش تولید محصولات کشاورزی استفاده نمود زئولیت است (۱۷).

زئولیت‌ها کانی‌های آلومینوسیلیکاته از فلزات قلیایی و قلیایی خاکی می‌باشند که از یک شبکه سه بعدی بی‌نهایت وسیع از چهار ضلعی‌های  $\text{SiO}_4$  و  $\text{AlO}_4$  که به وسیله اشتراک اتم‌های اکسیژن به هم متصل هستند، ساخته شده اند و به دو صورت طبیعی و مصنوعی (سنتری) هستند. حاوی کانال‌ها و حفره‌های به هم متصل هستند که این فضاها توسط کاتیون‌ها و ملکول‌های آب اشغال شده‌اند که هرکدام قابلیت تحرک و در نتیجه قابلیت تبادل یونی و آب‌زدایی برگشت‌پذیر را دارا می‌باشند. جایگزینی  $\text{Si}^{4+}$  توسط  $\text{Al}^{3+}$  در ورقه تتراهدرال باعث ایجاد بار منفی و افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شده است که این بار منفی توسط کاتیون‌های قابل تبادل به تعادل می‌رسند (۳۱). زئولیت‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد مانند ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، ساختار بسیار متخلخل، جذب سطحی زیاد، میزان آبیگری زیاد، جلوگیری از آبسویی عناصر به ویژه در خاک‌های شنی، جذب انتخابی، قابلیت دسترسی و ارزش اقتصادی مطلوب برای استفاده در زمینه‌های مختلف علمی از قبیل کشاورزی و دامپروری به حساب می‌آیند (۳۴). فراوان‌ترین نوع زئولیت طبیعی در ایران که بیشترین کاربرد در کشاورزی دارد و به عنوان اصلاح کننده خاک‌های شنی (به دلیل آبسویی عناصر غذایی) محسوب می‌شود کلینوپتیلولایت می‌باشد. زئولیت‌ها با ساختاری بسیار متخلخل و با سطح داخلی بسیار گسترده موجب تثبیت عناصر غذایی در بین ساختار خود شده و از طریق رهاسازی تدریجی آنها فراهمی دراز مدت این عناصر را برای گیاه ایجاد نموده است (۴۲). کوللا و همکاران (۱۱) بیان کردند عملکرد گیاه و قابلیت دسترسی عناصر برای آن، به ویژه در خاک‌های با بافت شنی در حضور زئولیت افزایش می‌یابد. در بررسی اثر زئولیت بر عملکرد و اجزا عملکرد کلزا متقی و همکاران (۳۳) گزارش کردند که کاربرد زئولیت به مقدار ۱۰ تن در هکتار سبب بهبود شرایط رشد گیاه و افزایش عملکرد دانه شد. با وجود مزایای بسیار زئولیت‌ها در مصارف کشاورزی، به اعتقاد کیمبرلی و نلسون (۲۴) استفاده از زئولیت طبیعی، بدون افزودن عناصر غذایی به آن، منجر به رقابت بین ریشه گیاه و زئولیت در جذب عناصر غذایی

می‌گردد و اثر معکوسی در رشد گیاه دارد. زئولیت‌ها به عنوان کود کندرها، با جذب و به دام انداختن عناصر غذایی مشکلات تلفات و آبسویی عناصر و در نتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی را کاهش می‌دهد و از طرف دیگر، می‌توانند مقادیر زیادی از سدیم را به داخل بستر رها کنند و یا با جذب عناصر غذایی در کانال‌های خود، با ریشه گیاه رقابت می‌کنند (۳۶). در تحقیقی دیگر اکاترینا و همکاران (۱۲) نشان دادند که زئولیت کلینوپتیلولایت و کمپوست روی خصوصیات خاک مؤثر است آنها این آزمایش را با سه تیمار خاک (شاهد)، خاک با زئولیت و خاک با کمپوست انجام دادند نتایج نشان داد که زئولیت باعث افزایش pH می‌شود که می‌تواند تأثیر منفی بر جذب عناصر غذایی داشته باشد. کولار و همکاران (۲۵) بیان کردند با افزایش مقادیر زئولیت در بستر کشت شمعدانی میزان pH افزایش یافت و گیاهان رشد یافته در سطوح پایین‌تر زئولیت نسبت به سطوح بالاتر دارای وزن تر و خشک ساقه بیشتر بودند. بنابراین انتخاب نوع زئولیت و نسبت آن در بسترهای کاشت می‌تواند نقش مهمی در افزایش عملکرد گیاهان داشته باشد و آثار منفی آن را کاهش دهد. تحقیقاتی که در مورد زئولیت بر رشد و کیفیت محصولات انجام شده عمدتاً نظرات مثبتی بوده است ولی در مورد تأثیر زئولیت بر جذب عناصر کم مصرف تحقیقات زیادی وجود ندارد. بنابراین در این مطالعه آزمایشی با هدف تأثیر کاربرد زئولیت، نوع و سطح مواد آلی بر رشد و جذب عناصر کم مصرف و تعیین ترکیب مناسب در گیاه ذرت انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر زئولیت، کود حیوانی و ورمی‌کمپوست بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار در گلخانه پژوهشی تحت شرایط کنترل شده انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل زئولیت طبیعی در سه سطح (Z1: عدم استفاده از زئولیت، Z2: ۶ درصد وزنی، Z3: ۱۲ درصد وزنی)، نوع ماده آلی شامل ورمی-کمپوست در سه سطح (V1: عدم استفاده از ورمی‌کمپوست، V2: ۱۰/۲۵ درصد وزنی یا ۵ تن در هکتار، V3: ۰/۲۵ درصد وزنی یا ۱۰ تن در هکتار) و کود گاوی پوسیده در سه سطح (M1: عدم استفاده از کود گاوی، M2: ۰/۵ درصد وزنی یا ۲۰ تن در هکتار، M3: ۱ درصد وزنی یا ۴۰ تن در هکتار) بودند.

## ۱) انتخاب و تعیین خصوصیات خاک

خاک مورد بررسی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری از مزرعه مرکز تحقیقات آب و خاک مشهد نمونه‌برداری شد و پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۲ میلی‌متری جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک به آزمایشگاه منتقل گردید. خصوصیات خاک (جدول



۱:۵ کود به آب، میزان کربن آلی به روش والکلی و بلک (۴۸)، فسفر و پتاسیم قابل استفاده به روش هضم خشک (۲۱)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (۷) و عناصر غذایی کم مصرف (آهن، روی، منگنز) به روش هضم خشک (۲۱) توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (جدول ۲).

### ۳) تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زئولیت

زئولیت طبیعی کلینوپتیلولایت مورد استفاده در این کار تحقیقاتی از شرکت افرند توسکا با اندازه ۱-۰/۵ میلی‌متر که مربوط به معادن سمنان بود تهیه شد. پس از انتقال به آزمایشگاه علاوه بر خصوصیات اولیه که توسط شرکت ارائه شده بود (جدول ۳) مقادیر pH و EC در نسبت ۱:۲ زئولیت به آب و عناصر غذایی کم مصرف (آهن، روی، منگنز) با عصاره‌گیر DTPA-TEA (۲۷) توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند (جدول ۴).

۱) شامل بافت خاک (شن لومی) به روش هیدرومتری (۱۴)، رطوبت خاک به روش وزنی، تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات سدیم (۶، ۱۱)، pH خاک در گل اشباع به وسیله دستگاه pH متر (۳۹)، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه EC متر (۳۹)، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (۷)، فسفر و پتاسیم قابل استفاده به ترتیب به روش استخراج با بی‌کربنات سدیم (۳۷، ۲۶) و استات آمونیوم (۳۹) توسط دستگاه اسپکتروفتومتر و فلیم-فتومتر اندازه‌گیری شدند. میزان کربن آلی به روش والکلی و بلک (۴۸)، درصد آهک به روش تیتراسیون (۳۹) و عناصر غذایی کم مصرف (آهن، روی، منگنز) با عصاره‌گیر DTPA-TEA توسط دستگاه جذب اتمی قرائت گردید (۲۷).

### ۲) تعیین خصوصیات شیمیایی ورمی کمپوست و کود گاوی

ورمی کمپوست و کود گاوی پوسیده شده پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۰/۵ میلی‌متری جهت تعیین خصوصیات شیمیایی به آزمایشگاه منتقل گردید و پارامترهایی از قبیل pH و EC در نسبت

جدول ۱- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1. Some physical and chemical properties of the soil

| مقدار  | واحد                                  | خصوصیات                    |
|--------|---------------------------------------|----------------------------|
| Amount | Measure                               | Properties                 |
| 7.67   | -                                     | pH                         |
| 0.59   | (dS m <sup>-1</sup> )                 | EC                         |
| 8.15   | (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | CEC ظرفیت تبادل کاتیونی    |
| 0.16   |                                       | OC کربن آلی                |
| 15.68  |                                       | CaCO <sub>3</sub> درصد آهک |
| 69.28  | (%)                                   | Sand شن                    |
| 20.00  |                                       | Silt سیلت                  |
| 10.72  |                                       | Clay رس                    |
| 210    |                                       | N (Total) نیتروژن کل       |
| 8.50   |                                       | P فسفر                     |
| 95.85  | (mg kg <sup>-1</sup> )                | K پتاسیم                   |
| 1.98   |                                       | Fe آهن                     |
| 0.35   |                                       | Zn روی                     |
| 2.09   |                                       | Mn منگنز                   |

جدول ۲- برخی از خصوصیات شیمیایی ورمی کمپوست و کود گاوی

Table 2. Some chemical properties of vermicompost and cow manure

| خصوصیات                     | *pH  | *EC                   | OC    | N (Total) | P                      | K        | Fe   | Zn                     | Mn    |
|-----------------------------|------|-----------------------|-------|-----------|------------------------|----------|------|------------------------|-------|
| Properties                  | -    | (dS m <sup>-1</sup> ) | (%)   |           | (mg kg <sup>-1</sup> ) |          |      | (mg kg <sup>-1</sup> ) |       |
| ورمی کمپوست<br>Vermicompost | 7.90 | 2.31                  | 17.16 | 10266.6   | 5873.76                | 7834.101 | 7916 | 450                    | 185.2 |
| کود گاوی<br>Cow manure      | 8.47 | 13.26                 | 45.24 | 15750     | 6391.65                | 32718.89 | 1964 | 362                    | 119   |

\*ratio of 1:5 fertilizer to water

\*نسبت ۱:۵ کود به آب

جدول ۳- تجزیه شیمیایی زئولیت

Table 3. Chemical analysis of zeolite

| ترکیب شیمیایی<br>Chemical composition | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | MnO  | TiO | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | L.O.I* |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------------|-----|------------------|-------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-------------------------------|--------|
| درصد (%)<br>Percent                   | 66.5             | 11.8                           | 3.1 | 2.1              | 2                 | 1.3                            | 0.8 | 0.04 | 0.3 | 0.01                          | 12     |
| *Loss on Ignition                     |                  |                                |     |                  |                   |                                |     |      |     |                               |        |
| *افت حرارتی یا تقلیل وزنی حرارتی      |                  |                                |     |                  |                   |                                |     |      |     |                               |        |

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زئولیت طبیعی

Table 4. physical and chemical properties of natural zeolite

| پارامتر         | *pH  | *EC                   | CEC                                   | Mn                     | Zn   | Fe    | درجه خلوص<br>Degree of purity | وزن مخصوص<br>Bulk density |
|-----------------|------|-----------------------|---------------------------------------|------------------------|------|-------|-------------------------------|---------------------------|
| Parameter       | -    | (dS m <sup>-1</sup> ) | (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) | (mg kg <sup>-1</sup> ) |      |       | (%)                           | (g cm <sup>-3</sup> )     |
| مقدار<br>Amount | 9.41 | 0.753                 | 160-180                               | 1.276                  | 0.31 | 7.078 | 85-95                         | 1.8                       |

\* ratio of 1: 2 zeolite to water

\* نسبت ۱:۲ زئولیت به آب

## ۴) آماده سازی تیمارهای آزمایشی و کشت گیاه

ابتدا در هر گلدان، ۵ کیلوگرم خاک مورد آزمایش با تیمارهای آزمایشی زئولیت، ورمی کمپوست و کود گاوی پوسیده شده با نسبت-های معین مخلوط شد. علاوه بر آن مقادیر توصیه کودی نیتروژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب به مقدار ۲۰، ۸ و ۲۵ میلی گرم بر کیلوگرم خاک از منابع سولفات آمونیوم، فسفات کلسیم و سولفات پتاسیم به خاک گلدانها اضافه شد. در هر گلدان ۸ بذرت (سینگل کراس ۷۰۴) کاشته شد و در مرحله دو برگی به دو بوته کاهش یافت. آبیاری کلیه گلدانها با آب مقطر در حد ظرفیت زراعی براساس روش وزنی تا قبل از گلدهی گیاه ذرت به مدت ۷۵ روز انجام گرفت.

## ۵) برداشت گیاه و آنالیز خاک و گیاه

در پایان دوره رشد، ارتفاع و فاصله میان گره گیاه اندازه گیری شد پس از آن اندام هوایی گیاه ذرت از محل طوقه جدا و به آزمایشگاه منتقل و وزن تر گیاه تعیین گردید. نمونه های گیاهی چندین بار با آب مقطر شستشو شد و در دمای ۶۵-۷۰ درجه سانتی گراد و به مدت ۴۸ ساعت در داخل آون خشک، و وزن خشک نمونه ها تعیین شد. برای تعیین غلظت عناصر کم مصرف در نمونه های گیاهی، نمونه ها را توسط آسیاب برقی پودر و از الک ۰/۵ میلی متری عبور داده شد. پس از آن غلظت عناصر کم مصرف به روش هضم خشک و دستگاه جذب اتمی اندازه گیری شد (۲۱). جهت تعیین خصوصیات شیمیایی خاک بعد از برداشت گیاه، نمونه های خاک هر گلدان پس از مخلوط کردن، هوا خشک گردید و از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. پارامتر pH در نسبت ۱:۲/۵ خاک به آب و عناصر غذایی کم مصرف (آهن، روی، منگنز) با عصاره گیر DTPA-TEA توسط دستگاه جذب اتمی قرائت

## گردید (۲۷).

آنالیز آماری داده های آزمایش با استفاده از نرم افزار JMP و مقایسه میانگینها براساس آزمون حداقل تفاوت معنی داری (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد (در این آزمون توصیه بر این است که از گذاشتن حروف معنی داری خودداری شود) انجام گردید.

## نتایج و بحث

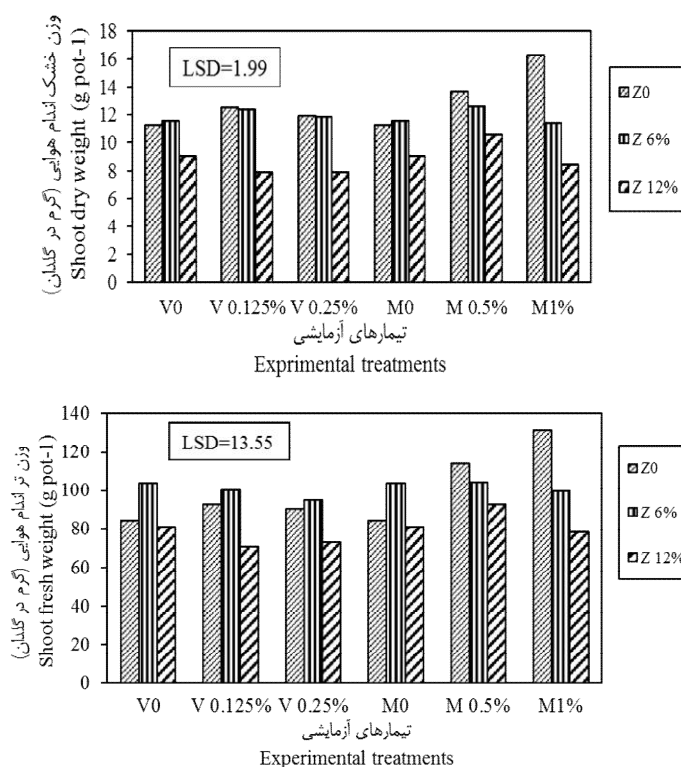
## وزن تر و خشک اندام هوایی: براساس نتایج به دست آمده

از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی و برهم کنش زئولیت و ماده آلی بر وزن تر و خشک اندام هوایی در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر وزن تر و خشک اندام هوایی نشان داد که بیشترین مقدار وزن تر و خشک اندام هوایی مربوط به تیمار Z1M3 بود که اختلاف معنی داری با بقیه تیمارها داشت. افزایش ماده خشک تولیدی گیاه رابطه مستقیمی با بهبود وضعیت عناصر غذایی خاک و همچنین بهبود ساختمان خاک دارد. همچنین با افزایش سطح زئولیت وزن تر و خشک اندام هوایی کاهش یافت و سطح ۱۲ درصد زئولیت (در نبود کود گاوی و ورمی کمپوست) نسبت به شاهد باعث کاهش ۱۹ درصدی وزن خشک گیاه شد (شکل ۱). کاهش وزن تر و خشک اندام هوایی در اثر کاربرد زئولیت می تواند به علت رهاسازی یون سدیم در خاک توسط زئولیت باشد. سدیم با ایجاد شرایط فیزیکی نامساعد در خاک و عدم تعادل تغذیه ای در خاک مانع رشد گیاه می شود. در وزن تر و خشک اندام هوایی در صورت عدم استفاده از زئولیت (Z1)، سطوح ورمی کمپوست اختلاف معنی داری نداشتند اما با افزایش سطح کود گاوی وزن تر و خشک اندام هوایی به طور معنی داری افزایش

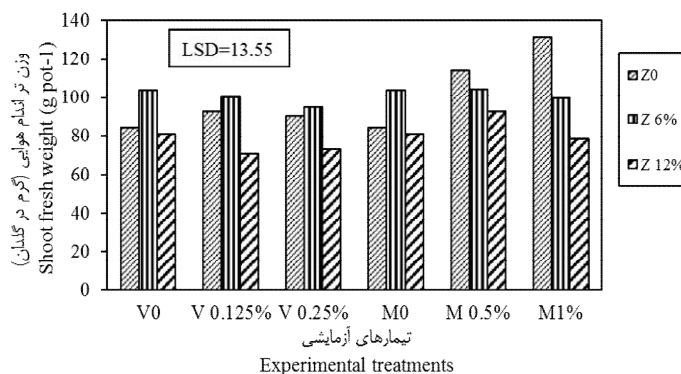
معنی داری بر وزن تر و خشک نداشتند. در حضور Z3، بین سطوح ورمی کمپوست نیز اختلاف معنی داری وجود نداشت. سطوح کود گاوی هم نسبت به سطح M1 اختلاف معنی داری نداشتند. پیرلا و همکاران (۴۱) گزارش کردند کاربرد ۸ تن زئولیت در هکتار موجب کاهش عملکرد ذرت گردید. هر چند گزارشاتی در مورد افزایش وزن تر و خشک گیاه در نتیجه کاربرد زئولیت وجود دارد. تسادیللاس و همکاران (۴۷) گزارش کردند که استفاده از زئولیت وزن تر و خشک گندم را افزایش داد. عملکرد بیشتر در تیمار کود گاوی به دلیل وجود مقادیر زیاد عناصر غذایی و معدنی شدن تدریجی این عناصر از شکل آلی و فراهمی آنها به مقدار کافی در هنگام نیاز گیاه به آنها می باشد.

یافت و بیشترین وزن تر و خشک مربوط به تیمار Z1M3 بود که در وزن خشک در صورت عدم استفاده از زئولیت این سطح (M3) نسبت به سطح M2 و M1 به ترتیب افزایش ۱۹ و ۴۴ درصدی و در وزن تر نسبت به سطح M2 و M3 به ترتیب افزایش ۱۴ و ۵۶ درصدی داشت. مباتا (۲۹) نیز بیان کرد مقادیر زیاد مواد آلی سبب بهبود ویژگی های شیمیایی و فیزیکی خاک گسترش رشد ریشه و جذب بیشتر عناصر غذایی و در نهایت افزایش عملکرد گیاه می شود. از مهمترین دلایل تأثیر مثبت مواد آلی بر تولید ماده خشک می توان به بهبود ساختمان خاک، افزایش خلل و فرج و بهبود وضع تغذیه و تهویه خاک اشاره کرد. شیرانی و همکاران (۴۶) گزارش کردند که کاربرد کود گاوی عملکرد ماده خشک ذرت به طور معنی داری افزایش داد. در حضور Z2، سطوح ورمی کمپوست و کود گاوی اختلاف

### (الف)



### (ب)



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات متقابل زئولیت، ورمی کمپوست و کود گاوی بر وزن تر و خشک اندام هوایی گیاه

Figure 1- Mean Comparison of the interaction effects zeolite, vermicompost and Cow manure on shoot fresh and dry weight of plant

زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)

تفاوت معنی داری بر اساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

واریانس، از بین تیمارهای آزمایشی تنها اثر ساده زئولیت بر ارتفاع گیاه و فاصله میان گره در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار

ارتفاع و فاصله میان گره گیاه: ارتفاع گیاه یکی از اجزای مورفولوژیکی مهم گیاه است براساس نتایج به دست آمده از تجزیه

دیگر که حمیدپور و همکاران (۱۸) از زئولیت برای پرورش گل آهار استفاده کردند گزارش کردند که زئولیت باعث کاهش عملکرد گل آهار نسبت به تیمار شاهد شده است.

**جذب آهن گیاه:** گیاهان در بین همه عناصر کم مصرف بیشترین نیاز را به آهن دارند. آهن به عنوان یکی از عناصر فراوان خاک شناخته شده است ولی به دلیل ویژگی‌های شیمیایی این عنصر و همچنین شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک‌های خشک و نیمه خشک حلالیت آن عموماً ناچیز و کمتر از حد مورد نیاز گیاهان می‌باشد.

بود. ماده آلی و برهم‌کنش زئولیت و ماده آلی اثر معنی‌داری بر ارتفاع گیاه و فاصله میان‌گره نداشت (جدول ۵). مقایسه میانگین اثرات ساده زئولیت بر ارتفاع گیاه نشان داد که افزایش سطح زئولیت باعث کاهش معنی‌دار ارتفاع گیاه و فاصله میان‌گره شد و بیشترین ارتفاع گیاه و فاصله میان‌گره مربوط به سطح Z1 بود. سطوح Z2 و Z3 به ترتیب باعث کاهش ۹ و ۱۹ درصدی ارتفاع گیاه و کاهش ۱۳ و ۲۶ درصدی فاصله میان‌گره نسبت به سطح Z1 شد (جدول ۶). در برخی مطالعات اثر مثبت زئولیت بر افزایش رشد ذرت (۲۲) و، کاهو (۱۵) گزارش شده است. اما در مطالعه سم‌ترتیدیس و همکاران (۴۴) نشان داد که زئولیت تأثیری بر رشد و عملکرد گل سرخ نداشته است. در تحقیقی

جدول ۵- تجزیه واریانس تیمارهای آزمایشی بر صفات رشدی گیاه ذرت

Table 5- Analysis of variance experimental treatments on growth traits of corn

| میانگین مربعات<br>Mean Square            |                                  |                                            |                                          |                             |                                              |
|------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|
| منابع تغییر<br>Source of Variance        | درجه آزادی<br>Degrees of freedom | وزن خشک اندام<br>هوابی<br>Shoot dry weight | وزن تر اندام هوابی<br>Shoot fresh weight | ارتفاع گیاه<br>Plant height | فاصله میان‌گره<br>The distance between nodes |
| زئولیت<br>Zeolite                        | 2                                | 78.337**                                   | 2623.45**                                | 2023.365**                  | 10.50**                                      |
| ماده آلی<br>Organic matter               | 5                                | 5.392**                                    | 556.28**                                 | 16.505 <sup>ns</sup>        | 0.18 <sup>ns</sup>                           |
| زئولیت × ماده آلی<br>Z × OM              | 10                               | 4.727**                                    | 379.23**                                 | 26.241 <sup>ns</sup>        | 0.16 <sup>ns</sup>                           |
| خطا<br>Error                             | 36                               | 1.450                                      | 66.97                                    | 14.5                        | 0.15                                         |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of variation | -                                | 10.774                                     | 8.757                                    | 3.921                       | 7.995                                        |

ns: غیر معنی‌دار بودن    \*\*: معنی‌دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد  
ns: Non-significant    \*\*: Significance at 1% probability level

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات ساده زئولیت بر ارتفاع گیاه و فاصله میان‌گره در زمان برداشت

Table 6- Means Comparison of the Simple effects zeolite on plant height and distance between nodes at harvest time

| تیمار آزمایشی<br>Experimental treatment | فاصله میان‌گره<br>The distance between nodes | ارتفاع گیاه<br>Plant height |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| زئولیت<br>Zeolite                       | (cm)                                         |                             |
| Z1                                      | 5.69                                         | 107.5                       |
| Z2                                      | 4.92                                         | 97.47                       |
| Z3                                      | 4.17                                         | 86.30                       |
| LSD (0.05)                              | 0.27                                         | 2.57                        |

تفاوت معنی‌داری براساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

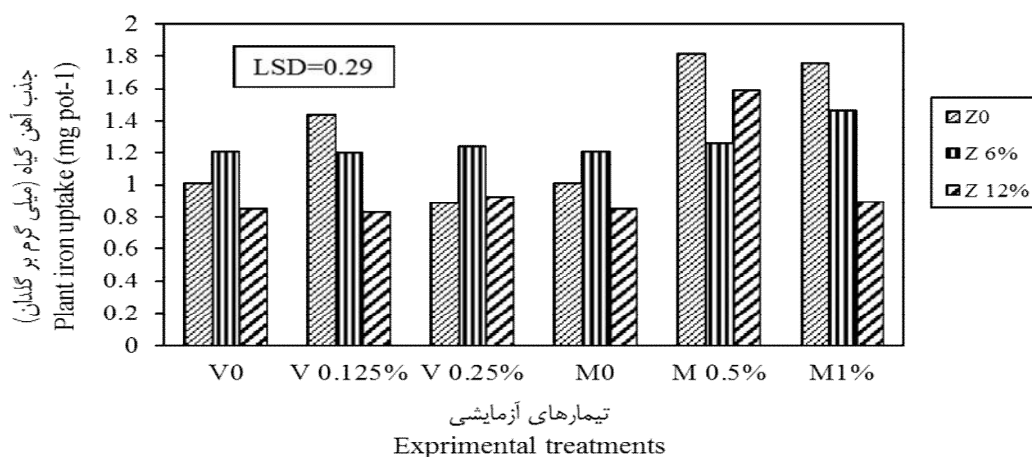
The significance difference is comparable with the LSD value

Z1: عدم استفاده از زئولیت، Z2: ۶ درصد وزنی زئولیت، Z3: ۱۲ درصد وزنی زئولیت

Z1: No use of zeolite, Z2: 6% zeolite, Z3: 12% zeolite,

آهن گیاه را افزایش داد اما بین سطح M3 و M1 اختلاف معنی داری وجود نداشت و سطح M2 افزایش ۸۷ درصدی نسبت به سطح M1 داشت. استفاده از کود گاوی اثر مثبتی بر جذب آهن در گیاه ذرت داشت که نشان دهنده آن است که مواد آلی طبیعی به عنوان یک عامل مهم برای فراهمی آهن و ایجاد تعادل بین عناصر محسوب می شوند. اثر کودهای آلی به ویژه کود گاوی روی جذب آهن ناشی از حضور عناصر کم مصرفی مانند آهن می باشد. همچنین در طی فرآیند معدنی شدن با آزاد سازی اسیدهای آلی سبب کاهش موضعی pH خاک شده و باعث افزایش جذب آهن به وسیله گیاه می شود (۳۶). ترکیب های آلی نقش مهمی در فراهمی آهن گیاه دارند و مواد هومیکی با تشکیل کمپلکس های آلی محلول از رسوب اکسیدهای آهن جلوگیری کرده و موجب افزایش پخشیدگی آهن به سمت ریشه گیاه می شوند.

براساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی و بر همکنش زئولیت و ماده آلی بر جذب آهن گیاه در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر جذب آهن گیاه نشان داد که بیشترین میزان جذب آهن گیاه مربوط به تیمار Z1M2 بود (شکل ۲). در صورت عدم استفاده زئولیت (Z1)، سطح V2 جذب آهن را نسبت به سطح V1 به طور معنی داری افزایش داد و سطح V3 نسبت به V1 اختلاف معنی داری وجود نداشت. هر ۲ سطح کود گاوی نسبت به سطح M1 باعث افزایش معنی دار جذب آهن شدند اما بین سطح M2 و M3 اختلاف معنی داری وجود نداشت. در حضور Z2، سطوح ورمی کمپوست و کود گاوی اختلاف معنی داری بر جذب آهن گیاه نداشتند. در حضور Z3، سطوح ورمی کمپوست اختلاف معنی داری بر جذب آهن گیاه نداشت. همچنین هر دو سطح کود گاوی میزان جذب

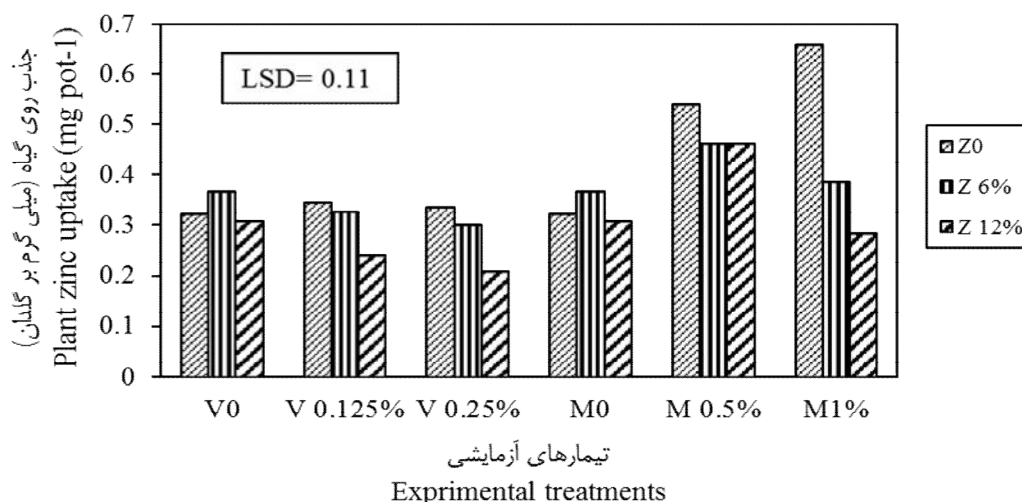


شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر جذب آهن در اندام هوایی ذرت

Figure 2- Mean Comparison of the interaction effects of experimental treatments on the uptake of iron in corn shoots  
زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)  
تفاوت معنی داری براساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

افزایش ۲۲ و ۱۰۶ درصد داشت. کاربرد کودهای آلی سبب افزایش روی قابل جذب در خاک و گیاه می شود که علت آن، تجمع زیاد روی در حضور کودهای آلی در شکل های محلول و تبادل می باشد. در حضور Z2، سطوح ورمی کمپوست و کود گاوی اختلاف معنی داری بر جذب روی گیاه نداشتند. در حضور Z3، سطوح ورمی کمپوست اختلاف معنی داری بر جذب روی گیاه نداشت. بیشترین جذب روی مربوط به سطح M2 بود و بین سطح M3 و M1 اختلاف معنی داری وجود نداشت. تأثیر مواد آلی بر فراهمی فلزات بستگی به ذات مواد آلی، تجزیه میکروبی، تأثیر آنها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، نوع خاک و عنصر مورد نظر دارد.

**جذب روی گیاه:** براساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی و بر همکنش زئولیت و ماده آلی بر جذب روی گیاه در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر جذب روی گیاه نشان داد بیشترین میزان جذب روی گیاه مربوط به تیمار Z1M3 بود که اختلاف معنی داری با بقیه تیمارها داشت (شکل ۳). در صورت عدم استفاده زئولیت (Z1)، سطوح ورمی کمپوست اختلاف معنی داری بر جذب روی گیاه نداشت در حالی که هر ۲ سطح کود گاوی باعث افزایش معنی داری جذب روی گیاه شدند و بیشترین جذب روی گیاه مربوط به M3 بود که نسبت به سطح M2 و M1

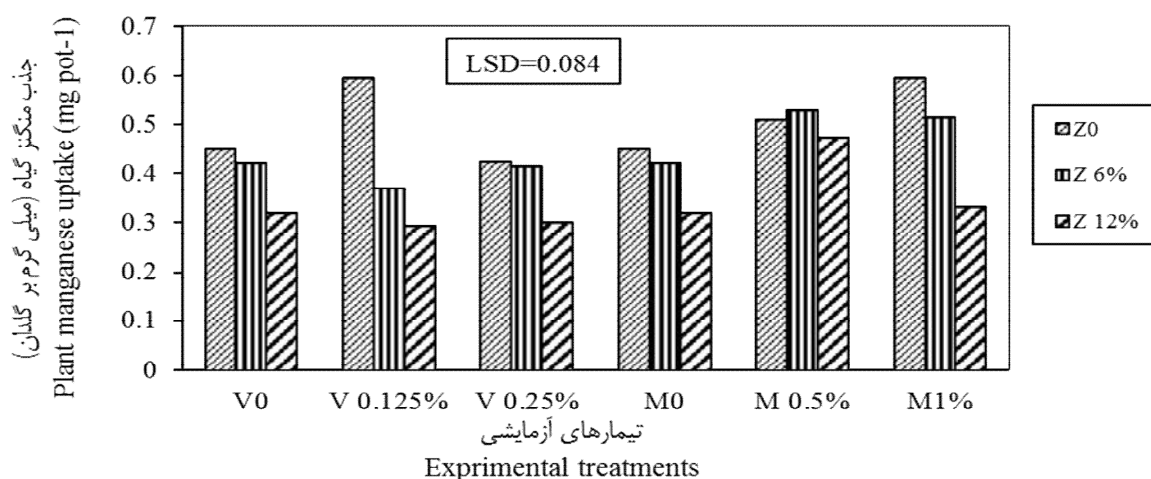


شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر جذب روی در اندام هوایی ذرت  
Figure 3- Mean Comparison of the interaction effects of experimental treatments on the uptake of zinc in corn shoots  
زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)  
تفاوت معنی داری بر اساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

M2 و M1 افزایش ۱۵ و ۳۱ درصدی داشت. در حضور Z2 و Z3، سطوح ورمی کمپوست بر جذب منگنز گیاه اختلاف معنی داری نداشتند در حالی که هر ۲ سطح کود گاوی باعث افزایش جذب منگنز گیاه نسبت به سطح M1 شد. اما بین سطح M2 و M3 در حضور Z2، و بین سطح M3 و M1 در حضور Z3 اختلاف معنی داری وجود نداشت. در حضور Z3 بیشترین میزان جذب منگنز گیاه مربوط به سطح M2 بود که افزایش ۴۸ درصدی را نسبت به سطح M1 داشت. کاربرد کود گاوی مقدار منگنز خاک را افزایش داد و افزایش مقدار عناصر کم مصرف بر اثر کاربرد کودهای دامی می تواند به علت محتوای بالای عناصر غذایی در این مواد باشد. زئولیت ها با توجه به ساختار شیمیایی خود که در حین تشکیل به دست آورده اند و براساس مقادیر مختلف کاتیون های قابل تعویض در ساختار شیمیایی خود ظرفیت متفاوتی برای جذب انواع فلزات نشان می دهند. انواع زئولیت ها پس از بارگذاری یون های مورد نیاز گیاهان نظیر پتاسیم، آمونیوم و فسفر می توانند به عنوان تأمین کننده عناصر مورد نیاز گیاه به خاک اضافه شوند. جذب فلز بر روی زئولیت یا به دلیل تبادل یون بین فلز سنگین و کاتیون های زئولیت مانند سدیم و پتاسیم یا به دلیل رسوب هیدرواکسیدهای فلزی روی سطح خارجی زئولیت است. بنابراین تبادل یون در سطح زئولیت بستگی به غلظت و ماهیت آنیون ها و کاتیون ها، pH و ساختمان کریستالی زئولیت دارد (۹).

کنتل و همکاران (۱۰) گزارش کردند که افزودن ماده آلی به خاک، pH خاک را کاهش و حلالیت روی و همچنین روی موجود در بخش های قابل تبادل، آلی و محلول خاک را افزایش می دهد. ملکول ها و کاتیون ها درون حفره های زئولیت جذب می شوند و وجود این کاتیون ها زئولیت را قادر می سازد با برخی از ملکول های قطبی بر همکنش داده و آنها را در سطح خارجی خود جذب کنند. به دلیل ظرفیت جذب سطحی بسیار بالایی که کلینوپتیلولایت دارد می توان این طور نتیجه گرفت که در شروع تحقیقات زئولیت به طور غیر مستقیم باعث کمبود عناصر و ممانعت از رشد گیاهان می شود (۵).

**جذب منگنز گیاه:** براساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی و برهم کنش زئولیت و ماده آلی بر جذب منگنز گیاه در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی دار بود (جدول ۷). مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آزمایشی جذب منگنز گیاه نشان داد که بیشترین میزان جذب منگنز گیاه مربوط به تیمار Z1M3 بود (شکل ۴). برای جذب منگنز گیاه در صورت عدم استفاده زئولیت Z1، سطح V3 باعث افزایش معنی دار جذب منگنز نسبت به سطح V1 شد اما سطح V3 نسبت به سطح V1 اختلاف معنی داری نداشت. با افزایش سطح کود گاوی میزان جذب منگنز گیاه افزایش یافت اما بین سطح M2 و M1 اختلاف معنی داری وجود نداشت و بیشترین میزان جذب مربوط به سطح M3 بود که نسبت به سطح



شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر جذب منگنز در اندام هوایی ذرت

Figure 4- Mean Comparison of the interaction effects of experimental treatments on the uptake of manganese in corn shoots  
زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)  
تفاوت معنی داری براساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

جدول ۷- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر جذب و غلظت آهن، روی و منگنز در اندام هوایی ذرت

Table 7- Analysis of variance of the effect of experimental treatments on the uptake and concentration of iron, zinc and manganese in corn shoots

| میانگین مربعات<br>Mean Square            |                                  |                                   |                                   |                                          |
|------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| منابع تغییر<br>Source of Variance        | درجه آزادی<br>Degrees of freedom | جذب آهن گیاه<br>Plant iron uptake | جذب روی گیاه<br>Plant zinc uptake | جذب منگنز گیاه<br>Plant uptake manganese |
| زئولیت<br>Zeolite                        | 2                                | 0.56**                            | 0.06**                            | 0.12**                                   |
| ماده آلی<br>Organic matter               | 5                                | 0.45**                            | 0.06**                            | 0.02**                                   |
| زئولیت × ماده آلی<br>Z × OM              | 10                               | 0.17**                            | 0.02**                            | 0.009**                                  |
| خطا<br>Error                             | 36                               | 0.03                              | 0.004                             | 0.003                                    |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of variation | -                                | 14.68                             | 17.82                             | 11.88                                    |

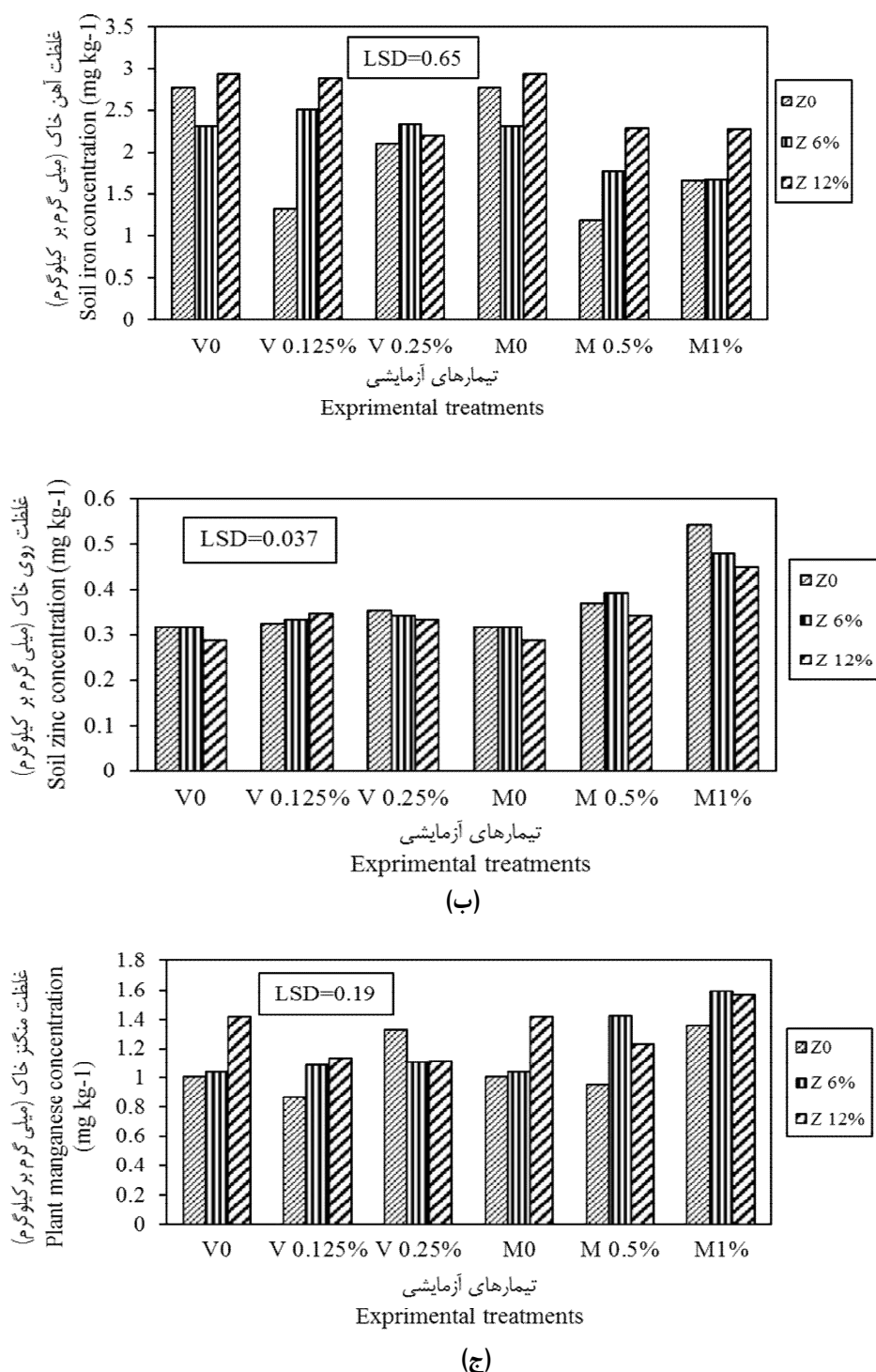
ns: غیر معنی دار بودن \*\* : معنی دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد

ns: Non-significant \*\*:Significance at 1% probability level

نشان داد که بیشترین میزان غلظت آهن، روی و منگنز خاک به ترتیب مربوط به تیمار Z3V1، Z1M3 و Z2M3 بود (شکل ۵). برای آهن خاک در حضور V1 و V2، افزایش سطح زئولیت بر غلظت آهن خاک معنی دار نبود اما در حضور V3، افزایش سطح زئولیت باعث افزایش غلظت آهن خاک شد ولی بین سطح Z2 و Z3 اختلاف معنی داری وجود نداشت.

### غلظت آهن، روی و منگنز در خاک پس از برداشت

**ذرت:** براساس نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن، روی و منگنز خاک در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) و برهم کنش زئولیت و ماده آلی آهن و روی خاک در سطح آماری ۵ درصد ( $p < 0.05$ ) معنی دار بود (جدول ۹). مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن، روی و منگنز خاک



شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن، روی و منگنز خاک پس از برداشت ذرت  
 Figure 5- Average Comparison of the interaction effects of experimental treatments on the concentration of iron, zinc and manganese in the soil after harvesting of corn  
 زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)  
 تفاوت معنی داری براساس مقدار LSD قابل مقایسه است.



میزان pH خاک نسبت به سطح Z1 افزایش یافت. به گونه‌ای که در عدم حضور ورمی کمپوست و کود گاوی سطح Z3 نسبت به Z1 سبب افزایش ۸/۹۳ درصدی pH خاک شد. در حضور M3، بین سطح Z2 و Z3 اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. بنابراین بخشی از کاهش جذب عناصر غذایی می‌تواند به دلیل افزایش pH خاک ناشی از افزودن زئولیت باشد. میرلوحی و همکاران (۳۲) گزارش کردند که کاربرد تیمار کود گاوی سبب کاهش pH خاک گردید. مواد آلی متفاوت تأثیر متفاوتی بر pH خاک داشتند این تفاوت‌ها ممکن است به دلیل ساختارهای متفاوت مواد آلی باشد که دارای گروه‌های عاملی و اسیدهای آلی متفاوتی هستند. استفاده از ورمی کمپوست و کود گاوی تا حدودی باعث تنظیم pH خاک و کاهش آن شد که این کاهش pH در کود گاوی نسبت به ورمی کمپوست بهتر بود که نشان دهنده تأثیر میزان ماده آلی در تنظیم pH خاک می‌باشد. بصری و همکاران (۴) گزارش کردند که کاربرد زئولیت سبب افزایش pH و هدایت الکتریکی خاک شده است. که بخشی از این افزایش می‌تواند به دلیل آزادسازی یون سدیم توسط زئولیت باشد. آندری و همکاران (۳) نیز افزایش pH خاک در اثر اضافه نمودن زئولیت گزارش نمودند. در - pHهای اسیدی مقدار یون هیدروژن افزایش یافته و با کاتیون‌های محلول به رقابت می‌پردازد و مانع اتصال کاتیون‌های فلزی به زئولیت می‌شود و هیدروژن به دلیل کوچک بودن و تحرک بالای آنها به آسانی وارد حفره‌های زئولیت شده و به جای یون‌های فلزی جذب زئولیت می‌گردد در نتیجه مقدار جذب کاهش پیدا می‌کند. در حالی که در pHهای بالاتر به علت کاهش غلظت یون هیدروژن، مقدار جذب یون‌های فلزی افزایش یافته و باعث افزایش مقدار جذب می‌گردد (۳۰).

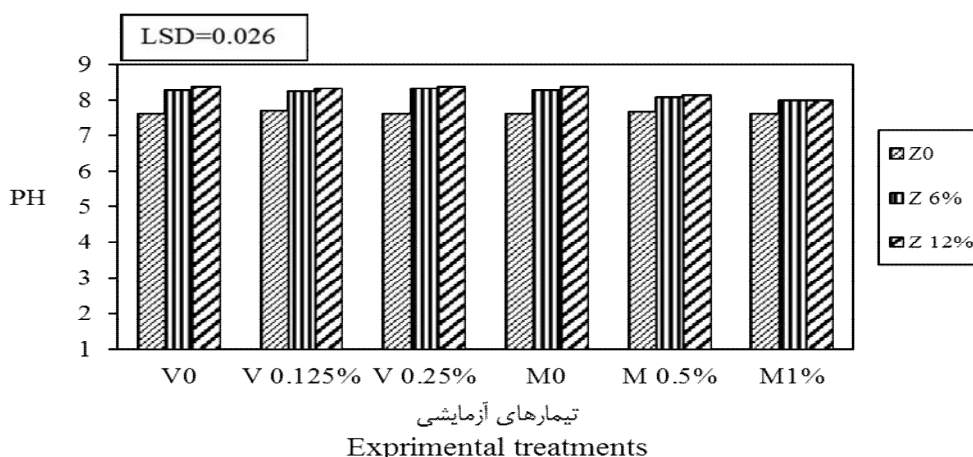
### نتیجه‌گیری

زئولیت وقتی به خاک اضافه می‌شود ممکن است اثرات منفی نیز در خاک و گیاه ایجاد کند. با توجه به نتایج به‌دست آمده کاربرد زئولیت به تنهایی تأثیری بر رشد و جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت نداشت و حتی باعث کاهش رشد و کاهش جذب عناصر کم مصرف در گیاه ذرت و افزایش pH در خاک شد. استفاده از مواد آلی این اثر منفی تا حدودی تعدیل کرد به طوری که سطوح کود گاوی با کارایی بیشتر نسبت به ورمی کمپوست در تعدیل این کاهش مؤثرتر بود. بنابراین استفاده مناسب از نسبت زئولیت به همراه ماده آلی می‌تواند در افزایش جذب عناصر کم مصرف و رشد گیاه مؤثر باشد.

در صورت M1 و M3، افزایش سطح زئولیت بر غلظت آهن خاک معنی‌دار نبود اما در حضور M2، افزایش سطح زئولیت باعث افزایش غلظت آهن خاک شد ولی بین سطح Z2 با Z1 و Z3 اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. برای روی خاک در هر ۳ سطح ورمی کمپوست و عدم استفاده کود گاوی افزایش سطح زئولیت اثر معنی‌داری بر غلظت روی خاک نداشت. در حضور M2، با افزایش سطح زئولیت کاهش غلظت روی خاک را نسبت به سطح Z1 داشتیم که اختلاف معنی‌داری بین دو سطح Z2 و Z3 با Z1 وجود نداشت. همچنین در حضور M1، با افزایش سطح زئولیت میزان غلظت روی خاک کاهش یافت اما بین سطح Z2 و Z3 اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. برای منگنز خاک در صورت عدم استفاده ورمی کمپوست و کود گاوی، افزایش سطح زئولیت باعث افزایش غلظت منگنز خاک شد. اما بین سطح Z2 و Z1 اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. در حضور V2، افزایش سطح زئولیت باعث افزایش معنی‌دار غلظت منگنز خاک شد. در حضور V3، افزایش سطح زئولیت اثر معنی‌داری بر غلظت منگنز خاک نداشت. در حضور M2، با افزایش سطح زئولیت غلظت منگنز به طور معنی‌داری افزایش یافت اما بیشترین غلظت منگنز مربوط به سطح Z2 بود. در حضور M3، نیز با افزایش سطح زئولیت غلظت منگنز خاک افزایش یافت اما بین سطح Z2 و Z3 اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. افزایش سطح زئولیت باعث افزایش غلظت عناصر کم مصرف در خاک شده و از طرفی جذب این عناصر توسط گیاه را کاهش داده و مانع جذب آن توسط گیاه شده است. ارتیز و آلکانیز (۳۸) گزارش کردند که کاربرد کودهای آلی میزان فلزات قابل جذب خاک از قبیل آهن، روی و منگنز را افزایش می‌دهد که علت آن به دلیل حضور این فلزات در کودهای آلی به شکل محلول و تبدیلی می‌باشد.

### pH خاک پس از برداشت ذرت: pH خاک یکی از

پارامترهای مهم و تأثیرگذار در قابل دسترس بودن عناصر غذایی، شکل یونی بعضی از مواد، حلالیت بعضی از عناصر سمی (فلزات سنگین)، فعالیت میکروبی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی و قابلیت حل شدن نمک‌ها می‌باشد و با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در ارتباط است و یک راهنما جهت پیش‌بینی کمبودهای احتمالی عناصر یا سمیت آنها می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس، تأثیر تیمارهای آزمایشی و برهم‌کنش زئولیت و ماده آلی بر pH خاک در سطح آماری ۱ درصد ( $p < 0.01$ ) معنی‌دار بود (جدول ۹). مقایسه میانگین اثر متقابل تیمارهای آزمایشی بر pH خاک نشان داد که بیشترین میزان pH خاک مربوط به تیمار Z3V3 بود (شکل ۱۱). در هر ۳ سطح ورمی کمپوست و کود گاوی با افزایش سطح زئولیت



شکل ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر pH خاک پس از برداشت ذرت

Figure 6- Mean Comparison of the interaction effects of experimental treatments on the pH soil after harvesting of corn

زئولیت (Z)، ورمی کمپوست (V)، کود گاوی (M)  
تفاوت معنی داری براساس مقدار LSD قابل مقایسه است.

جدول ۸- تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن، روی، منگنز و pH در خاک پس از برداشت ذرت

Table 8- Analysis of variance of the effect of experimental treatments on concentration of iron, zinc and manganese in the soil after harvesting of corn

| منابع تغییر<br>Source of Variance        | درجه آزادی<br>Degrees of freedom | غلظت آهن خاک<br>Soil iron concentration | غلظت روی خاک<br>Soil zinc concentration | غلظت منگنز خاک<br>Soil manganese concentration | pH خاک   |
|------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------|----------|
|                                          |                                  |                                         |                                         |                                                |          |
| زئولیت<br>Zeolite                        | 2                                | 1.79 **                                 | 0.004 **                                | 0.401 **                                       | 2.104 ** |
| ماده آلی<br>Organic matter               | 5                                | 1.33 **                                 | 0.042 **                                | 0.203 **                                       | 0.089 ** |
| زئولیت × ماده آلی<br>Z × OM              | 10                               | 0.43 *                                  | 0.001 *                                 | 0.064 **                                       | 0.022 ** |
| خطا<br>Error                             | 36                               | 0.153                                   | 0.0005                                  | 0.0129                                         | 0.0002   |
| ضریب تغییرات<br>Coefficient of variation | -                                | 17.509                                  | 6.236                                   | 9.439                                          | 0.196    |

\*\*\*: معنی دار بودن در سطح احتمال ۱ درصد      \*\*: معنی دار بودن در سطح احتمال ۵ درصد  
\*: Significance at 5% probability level      \*\*: Significance at 1% probability level

## منابع

- 1- Achieng J.O., Ouma G., Odhiambo G., and Muyekho F. 2010. Effect of farmyard manure and inorganic fertilizers on maize production on Alfisols and Ultisols in Kakamega, Western Kenya. Agriculture and Biology Journal of North America, 1:430-439.
- 2- Allah Dadi A., Akbari G.h., Ghahremani V.Z. 2007. Vermicompost production and lateral products. First Edition. Tehran University Press.
- 3- Andry H., Yamamoto T., and Inoue M. 2009. Influence of artificial zeolite and hydrated lime amendments on the erodibility of an acidic soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 40(7-8): 1053-1072.
- 4- Basari M.H.A., Abdu A., Jusop S., Ahmed O.H., Abdul-Hamid H., Kusno M.A., Zainal B., Sen in A.L., Junejo N.

2013. Effect of mixed organic and inorganic Fertilizers Application on Soil properties and the growth of Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) Cultiva on brise Soils. American Journal of Applied Sciences, 10 (12): 1586-1597.
- 5- Böhme M., and Lua H. 1997. Influence of mineral and organic treatments in the rhizosphere on the growth of tomato palnts. Acta Horticulture Abstract. I.S. Growing Media and Plant Nutrition in Horticulture.
- 6- Bower C.A., Reitmeir R. F., and Fireman M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science, 73(4): 251-261.
- 7- Bremner J.M., and Mulvaney C.S. 1982. Nitrogen-total. Pp: 595-624. In A.L. page , Miller ,RH, Keeney, RR, (Eds), Methods of soil analysis, and Part 2. Second ed . American society of agronomy, Madison, WI..
- 8- Castaldi P., Santona L., Enzo S., Melis P. 2008. Sorption processes and XRD analysis of a natural zeolite exchanged with  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  and  $Zn^{2+}$  cations. Journal of Hazardous Materials, 156(1-3): 428-434.
- 9- Cattlet K.M., Heil D.M., Lindsay W.L., and Ebinger M.H. 2002. Chemical properties controlling  $Zn^{+2}$  activities in 18 Colorado soils. Soil Science Society of American Journal, 66: 1182-1189.
- 10- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. PP. 891-901. In: Black, C. A., (Ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Madison (WI): Am. Society of Agronomy.
- 11- Colella C., de'Gennaro M., and Aiello R. 2001. Use of zeolitic tuff in the building industry. In D.L. Bish and D.W. Ming (eds) Natural Zeolites: Occurrence, Properties, Applications. Rev in Mineral. and Geochem. Vol. 45, Washington, D.C., 551-587.
- 12- Ekaterina G. F., and Christos D.T. 2002. Influence of clinoptilolite and compost on soil properties. Taylor and Francis Publishing, 33(3): 595-607.
- 13- Fageria N.K., Baligar V.C., and Jones C.A. 2010. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Fl. USA.
- 14- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of America. Madison, WI. Particle-size analysis In A. Klute (ed.). 383-410.
- 15- Gul A., Erogöl D., and Ongun A.R. 2005. Comparison of the use of zeolite and perlite as substrate for crisp-head lettuce. Sci. Hort, 106: 464-471.
- 16- Gutierrez-Miceli F.A., Moguel-Zamudio M., Archila A. and Dendooven L. 2008. Sheep manure vermin compost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhiza for maize cultivation. Bioresource Technology, 99: 7020-7026.
- 17- Guttery G., and Galle E. 1985. "Natural Zeolite" Springer. Berlin.
- 18- Hamidpour M., Shariatmadari H., and Soleimani M. 2012. Zeoponic systems. PP. 588-600. In: Inglezakis, V. J. and A. A. Zorpas (Eds.), Handbook of Natural Zeolites, Bentham Science Publ., Sharjah, UAE.
- 19- Havlin J.L., Beaton J.D., Tisdale S.L., and Nelson W.L. 2005. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management, 7<sup>th</sup> edn. Prentice Hall, NewYork.
- 20- Jami Allahmadi M., Kamkar B., Mahdavi Damghani A. 2006. Agriculture, Fertilizer and Environment (translation). First edition of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad.
- 21- Jones JB. 2001. Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 27-160.
- 22- Khashei siouki A. M., Kochak zadeh v., Shahabi far M. 2008. The Effect of Application of Clinoptilolite Natural Zeolite and Soil Moisture on Corn Yield Components. Soil Research (Soil and Water Science), 22(2): 235-241. (In Persian)
- 23- Khodabande N. 2013. Agriculture Cereals. 11th edition of Tehran University Press, Tehran. pp.416-470 (In Persian)
- 24- Kimberly A.W., and Nelson P.V. 1997. Using precharged zeolite as a source of potassium and phosphate in soilless container medium during potted chrysanthemum production. Journal of the American Society for Horticultural Science, 122:703-708.
- 25- Kolar M., Dubsky M., Sramek F., and Pintar M. 2010. The effect of natural zeolite in peat base growing media on pelargonium zonale plants. Europ. Horticultural Science, 75(5): 226-230.
- 26- Kuo S. 1996. Phosphorus. pp. 869-920. In: Sparks D. L. (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical methods, SSSA and ASA, Madison.
- 27- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. Soil Science Society of America Journal, 42: 421-448.
- 28- Maloupa M., Samartzidis C., Couloubis P., and Komninou A. 1999. Yield quality and photosynthetic activity of greenhouse grown 'Madelon' rose on perlite-zeolite substrate mixtures. Acta Horticulture, 481:97-99.
- 29- Mbatha A.N. 2008. Influence of organic fertilisers on the yield and quality of cabbage and carrots. PhD Thesis, University of the Free State Bloemfontein, Germany.
- 30- Moreno N., Querol X., and Ayora C. 2001. "Utilization of zeolite synthesized from coal fly ash for the purification of acid mine waters." Environ. Science Technology, 35: 3526-3534.
- 31- Mishra M., Jain S. 2011. Properties and applications of zeolites: A Review. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section, 81:111.
- 32- Mirlohi A., Noorbakhsh F., and Razavi J. 2003. Effect of addition of farmyard manure in rice-barley, maize barley

- on some chemical and physical properties. Proceedings of the 8<sup>th</sup> Soil Science Congress. September, Rasht, Iran, 9-12. (In Persian)
- 33- Mottaghi L., Allahdadi I., Sirani Rad A.H., Akbari G.H.A., and Hasanloo T. 2014. The effect of zeolite on yield and yield components of rapeseed under drought conditions. Quarterly journal of crops improvement, 16 (2): 381-397.
- 34- Mumpton F. 1999. La roca magica: Uses of natural zeolites in agriculture and industry. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA, 96:3463-3470.
- 35- Munir J.M., Nabila S.K., Nabil K.A. 2004. Response of croton grown in a zeolite-containing substrate to different concentrations of fertilizer solution. Journal Communications in Soil Science and Plant Analysis, 35(15-16): 2283-2297.
- 36- Ouda B.A., and Mahadeen A.Y. 2008. Effect of fertilizers on growth, yield, yield components, quality and certain nutrient contents in broccoli (*Brassica oleracea*). International Journal of Agriculture and Biology, 10: 627-32.
- 37- Olsen S.R., Cole C.V., Watenabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate, U.S. Department of Agriculture Cris, 939. USA.
- 38- Ortiz O., and Alkaniz J.M. 2006. Bioaccumulation of heavy metals in *Dactylis glomerata* L. growing in a calcareous soil amended with sewage sludge. Journal of Bioresource Technology, 97: 545-552.
- 39- Page A.L. 1982. Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Series No 9. 2nded. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI.
- 40- Parsons D., Ramirez-Aviles L., Cherney J.H., Ketterings Q.M., Blake R.W., and Nicholson C.F. 2009. Managing maize production in shifting cultivation milpa systems in Yucatan, through Weed control and manure application. Agriculture, Ecosystems and Environment, 133: 123-134.
- 41- Pirela J.J., Westfall D.G., and Barbarick K.A. 1982. Use of clinoptilolite in combination with nitrogen fertilization to increase plant growth. Zeo Agriculture. Science Paper Number, 2768: 115-124.
- 42- Rehakova M., Cuvanova S., Dzivak M., Rimar J., Gavalova Z. 2004. Agricultural and agrochemical uses of natural zeolite of the clinoptilolite type. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8:397- 404.
- 43- Saha S., Appireddy G.K., Kundu S., and Gupta H.S. 2007. Comparative efficiency of three organic manures at varying rates of its application to baby corn. Agronomy and Soil science, 53:507-517.
- 44- Samartzidis C., Awada T., Maloupa E., Radoglou K., and Constantinidou H. I. A. 2005. Rose productivity and physiological responses to different substrates for soil-less culture. Horticultural Science. 106: 203-212.
- 45- Samawat S., Pazaki A., Ladan Moghaddam M., Samawat S. 2008. Applied principles of Organic Materials in Agriculture. Islamic Azad University of Garmsar Branch.
- 46- Shirani H., Hajabasi M.A., Afyuni M., and Hemmat A. 2002. Effect of farmyard manure and tillage systems on soil physical properties and corn yield in central Iran. Soil & Tillage Res, 68:101-108. (in Persian with English abstract)
- 47- Tsadilas C.D., Voulgarakis N., and Theophilous M. 1993. Natural Agriculture research foundation. Institute of soil classification and maooin 41335 Larissa Greece.
- 48- Walkley A., and Black I. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science Society of American Journal, 37: 29-38.
- 49- Zamil S.S., Quadir F.Q., Chowdhury M.A.H., Al Wahid A. 2004. Effects of different animal manure on yield quality and nutrient uptake by Mustard (CV. Agrani). BRAC University Journal, 1(2):59-66.



## The Effect of Zeolite, Manure and Vermicompost on Growth and Micronutrients Uptake by Corn.

S.Z. Taghdisi Heydarian<sup>1</sup> – R. Khorassani<sup>2\*</sup> - H. Emami<sup>3</sup>

Received: 04-12-2017

Accepted: 07-07-2018

**Introduction:** The amount of soil nutrients and their availability for plants are the important aspects of soil fertility. Although micronutrients are used by plants in very small amounts, they play an active role in many plant-based processes and reactions influencing the plant growth and yield. The efficiency of absorption of micronutrient can be increased by adding some organic and mineral materials to soil. Saha et al. (41) observed an increase in micronutrient concentration of corn grain by adding organic materials to soil. Zeolite is one of the most commonly minerals used to increase agricultural production (17). The zeolites, due to their structure and porosity, are well-suited for retaining the nutrients and gradually releasing them into the root zone (40). Despite the positive effects of zeolite on some physical and chemical properties of soil, its application at high levels may adversely affect the absorption of nutrients and plant growth. Hamidpour et al. (18) who used zeolite for Zinnia flower, reported that zeolite reduced the yield of Zinnia flower. Basari et al. (4) reported that zeolite application increased soil pH and electrical conductivity (EC). Therefore, this research was carried out with the aim of assessing the influence of zeolite application, type (i.e. vermicompost and cow manure) and organic matter levels on the growth and the micronutrients uptake and determining the appropriate composition for corn.

**Materials and Methods:** A factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications in greenhouse under controlled condition. The treatments consisted of raw zeolite (natural) in three levels (0, 6, 12% by weight), organic matter including vermicompost in three levels (0, 0.125, 0.25% or 0, 5, 10 t ha<sup>-1</sup>) and cow manure at three levels (0, 0.5, 1% by weight or 0, 20, 40 t ha<sup>-1</sup>). The soil was collected at a depth of 0-30 cm from the Mashhad Soil and Water Research Center. General soil characteristics and micronutrients concentration (iron, zinc and manganese) were determined according to standard methods (14, 27). For vermicompost and cow manure, some parameters such as pH and EC, organic carbon (46), available phosphorus and potassium (21), total nitrogen (7) and micronutrient (iron, zinc and manganese) were also measured (21). Further, pH, EC and micronutrient (iron, zinc, and manganese) were measured for natural zeolite (27). The pots were prepared by mixing 5 kg soil and experimental materials. N, P, and K were added according to soil testing. Irrigation with distilled water at field capacity level was done during the growth period. The plants were harvested 75 days after sowing and after separating shoot and root, the plant materials were transferred to laboratory. Root and shoot dry weight were determined and after dry digesting of plant materials, the concentration of micronutrient were quantified by Atomic Absorption (21). The soil samples were also analyzed in order to determine the chemical properties of the soil after harvesting. Statistical analysis of the data was performed using JMP software and the mean comparison was carried out based on LSD test at 5% probability level.

**Results and Discussion:** The results of the experiment showed that increasing zeolite levels reduced dry weight, decreased height and uptake of zinc, iron and manganese and increased soil pH and iron and manganese concentrations. In addition, it was observed that the zeolite application had a negative effect on the plant growth and micronutrients uptake. Burriesci et al. (8) concluded that the zeolite application without fertilizing seems not to considerably increase plant growth. According to Kimberly and Nelson (24), the use of natural zeolite, without adding nutrients, leads to a competition between plant roots and zeolite for the nutrients absorption. Sarmetidis et al. (42) showed that zeolite had no effect on the growth and yield of roses. Kolar et al. (25) reported that increasing the amount of zeolite in the geranium cultivar increased pH and the plants growth. At lower levels of zeolite, shoot fresh and dry weight was larger than that in higher levels of zeolite. Our results also denoted that the maximum amount of plant dry weight, plant height, the micronutrient (zinc, iron and manganese) uptake and the lowest soil pH were observed for the treatment of cow manure (1 %) in the absence of zeolite which had a significant difference relative to other treatments and also control. Shirani et al. (44)

1, 2 and 3- MSc Student, Associate Professors of Soil Science Department, Agricultural College, Ferdowsi University of Mashhad

(\*-Corresponding Author Email: khorassani@um.ac.ir)

reported that the application of cow manure significantly increased corn dry matter. Ortiz and Alkaniz (36) showed that using organic fertilizers enhances the amount of absorbent metals such as iron, zinc and manganese as these metals are in a soluble and exchangeable form in these fertilizers. By releasing organic acids, the organic fertilizers, especially cow manure, reduce the localized pH of soil and increase the iron uptake by plants during the mineralization process.

**Conclusion:** According to the results, the use of zeolite increased soil pH, decreased corn growth and micronutrient uptake. Applying organic materials with zeolite can reduce the mentioned negative effect of zeolite. Cow manure at lowest level was more efficient than vermicompost at all levels. Overall, adding cow manure can improve the plant growth and micronutrient uptake by plant when the zeolite is intended to be used to modify soil physical characteristic.

**Keywords:** Cow manure, Organic matter, Plant nutrition, Zeolite



## اثر زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف بر قابلیت استفاده روی و پاسخ‌های ذرت در یک خاک آلوده به روی

پروین کبیری<sup>۱</sup> - حمیدرضا متقیان<sup>۲\*</sup> - علیرضا حسین پور<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۷

### چکیده

فعالیت‌های انسانی، نقش مهمی بر توزیع ژئوشیمیایی فلزات سنگین داشته‌است و باعث ورود بیش از حد مجاز آنها به محیط زیست شده‌است. وجود فلزات سنگین در محیط زیست، اثرات سوئی بر خاک، آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی دارد و حیات موجودات زنده را با خطرات جدی مواجه می‌کند. اخیراً زغال زیستی به صورت گسترده‌ای جهت کاهش سمیت فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود. هدف این مطالعه بررسی تأثیر دمای گرماکافت زغال زیستی برگ گردو بر قابلیت استفاده و پاسخ‌های رشد ذرت در یک خاک شن‌لومی آلوده به فلزات سنگین بوده است. بدین منظور، در آزمایشی گلدانی مقادیر ۰، ۵/۰، ۱ و ۲ درصد (وزنی) زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با ۳ کیلوگرم خاک در ۳ تکرار مخلوط و به مدت ۴۵ روز در شرایط گلخانه خوابانده شد. پس از خواباندن، در هر گلدان ذرت علوفه‌ای (رقم سینگل کراس ۷۰۴) کشت و پس از دو ماه، پاسخ‌های رشد ذرت (وزن خشک اندام هوایی، وزن خشک ریشه، غلظت روی در اندام هوایی، غلظت روی در ریشه، ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال) و غلظت روی قابل استفاده (DTPA-TEA (محلول و خاک تعیین شد. نتایج نشان داد که با افزایش دمای گرماکافت زغال زیستی، رشد ذرت و ضریب انتقال روی افزایش می‌یابد. همچنین تیمار خاک‌ها با ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی در اندام هوایی و ریشه را به ترتیب ۲۱/۶ و ۳۳/۰ درصد کاهش و وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به ترتیب ۱۳۱/۴ و ۱۱۶/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. ضریب انتقال روی در سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0.05$ ). نتایج نشان داد که با افزایش مقدار و دمای تهیه زغال‌های زیستی، غلظت روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA کاهش معنی‌داری یافت ( $P < 0.05$ ). کاربرد ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، مقدار روی محلول و روی قابل استفاده را نسبت به شاهد به ترتیب ۶۳/۱ و ۳۴/۹ درصد کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: برگ گردو، تثبیت گیاهی، گرماکافت

### مقدمه

روی (Zn)، یکی از عناصر کم‌نیاز برای رشد گیاهان و جانوران است و به عنوان کوفاکتور تنظیم‌کننده، نقش مهمی در فعالیت آنزیم‌های سلول ایفا می‌کند (۱۵). وقتی مقدار این عنصر بیش از حد طبیعی باشد، جزء فلزات سمی و خطرناک به حساب می‌آید و می‌تواند بقای بسیاری از موجودات زنده از جمله گیاهان را تهدید کند (۲۸). سازمان بهداشت جهانی بر اساس غلظت کل فلز در خاک، محدوده هشدار برای روی را ۹۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش کرده است (۳۸). در خاک‌های دارای آلودگی بالا می‌توان با کاربرد ترکیباتی، قابلیت استفاده عنصر دارای پتانسیل سمیت را کاهش داد تا گیاه رشد بیشتری داشته باشد. اخیراً، زغال زیستی به صورت گسترده‌ای جهت کاهش سمیت فلزات سنگین استفاده می‌شود (۱۰، ۱۹ و ۴۴).

زغال زیستی محصول فرآیند تجزیه‌گرمایی مواد آلی است که تحت شرایطی با اکسیژن محدود تهیه می‌شود. این ماده غنی از کربن، دارای تخلخل، سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و

امروزه آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی دنیا به شمار می‌رود، زیرا فلزات سنگین فراوانی بالا، تجمع زیستی سریع و نیمه‌عمر بیولوژیکی طولانی دارند که می‌توانند باعث تهدید جنبه‌های کمی و کیفی امنیت غذایی شده و سلامتی موجودات زنده را به خطر بیندازند (۴۴). بیشتر فلزات سنگین بر خلاف آلاینده‌های آلی تجزیه شیمیایی و بیولوژیکی نمی‌شوند. بنابراین مدت‌زمان طولانی در خاک باقی می‌مانند و خطر قابل توجهی برای سلامتی انسان و محیط زیست ایجاد می‌کنند (۸).

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم خاک، دانشگاه شهرکرد

(Email: motaghian.h@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.72071

(\*) نویسنده مسئول:

شد. مقدار روی کل با استفاده از اسید نیتریک ۴ مولار (۳۶) و مقدار روی قابل استفاده با روش DTPA-TEA (۲۳) عصاره‌گیری شد. ویژگی‌های خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، آلودگی خاک مورد مطالعه، به روی بسیار زیاد بود. مقدار کل روی در خاک ۳۵۷۵۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم به دست آمد. در مطالعه روی و همکاران (۳۵) نیز مقادیر زیاد روی در خاک آلوده اطراف معدنی در اسپانیا گزارش شده است.

### کشت ذرت در گلخانه

سه کیلوگرم خاک آلوده (عبور کرده از الک ۲ میلی‌متری) با مقادیر ۱/۵ و ۲ درصد وزنی- وزنی زغال زیستی تولیدشده در دماهای مختلف (۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) در آزمایشی فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در گلخانه در گلدان (در سه تکرار) مخلوط شد. به این صورت که ابتدا مقدار کمی از خاک هر گلدان با بیوپچار مخلوط شد. سپس به این خاک تیمار شده مقدار باقی‌مانده خاک گلدان به تدریج اضافه و مخلوط شد. به گونه‌ای که خاک و بیوپچار به طور کامل مخلوط شد. همچنین، تیمار بدون زغال زیستی (شاهد) در سه تکرار در کنار تیمارهای آزمایش فاکتوریل قرار داده شد. قبل از کشت، خاک‌ها به مدت ۴۵ روز در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (با اضافه کردن آب به گلدان‌ها و وزن کردن برخی از آن‌ها به صورت هفتگی) در گلخانه خوابانده شدند. رطوبت ظرفیت زراعی خاک مورد مطالعه ۲۰ درصد (حجمی) و درصد رطوبت اشباع آن ۴۰ درصد (حجمی) بود. پس از دوره خواباندن، طبق آزمون خاک، ۱۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیتروژن (اوره)، ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم فسفر (سوپرفسفات تریپل)، ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم پتاسیم (سولفات پتاسیم) و عناصر کم‌نیاز شامل ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم آهن (سکوسترین ۱۳۸) و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم منگنز (سولفات منگنز) به همه گلدان‌ها افزوده شد. سپس، در هر گلدان، ۵ عدد بذر ذرت علوفه‌ای (رقم سینگل کراس ۷۰۴) کشت و پس از جوانه‌زدن به ۳ عدد تنک شد. در طول دوره رشد، مراقبت‌های لازم از قبیل آبیاری در رطوبت ۷۰ درصد ظرفیت مزرعه (با قرار دادن گلدان‌هایی اضافه بر گلدان‌های آزمایشی و وزن نمودن آن‌ها هر دو روز، مقدار کاهش وزن گلدان‌ها اندازه‌گیری و به گلدان‌ها آب اضافه می‌شد) و حذف علف‌های هرز انجام شد. دو ماه پس از کشت، اندام هوایی گیاهان از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت شد. همچنین، ریشه گیاه هم از خاک هر گلدان جدا شد. بخش هوایی و ریشه‌ها به صورت جداگانه با آب مقطر شسته و درون پاکت کاغذی در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت در آون قرار داده شد. سپس، وزن خشک این بخش‌ها تعیین و غلظت روی با خاکسترسازی خشک و عصاره‌گیری با اسید کلریدریک ۲ نرمال تعیین شد (۱۶). غلظت روی در گیاه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج جذب اتمی

همچنین گروه‌های عامل سطحی می‌باشد و به دلیل بهبود حاصلخیزی خاک، غیرمتحرک کردن آلودگی‌ها و ترسیب کربن مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (۲۱). از طرفی جهان امروز، با اثرات فاجعه‌بار تغییرات آب و هوایی روبه‌رو است و افزودن زغال زیستی به خاک به عنوان یک عامل تأثیرگذار برای مقابله با این تغییرات و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه زیادی قرار گرفته است. استفاده از زغال زیستی می‌تواند کربن را برای صدها و یا هزاران سال حفظ کرده و به کاهش غلظت گازکربنیک موجود در جو کمک کند (۲۶). مطالعات و بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که زغال زیستی قادر است به عنوان جاذب، آلودگی فلزات سنگین را در خاک کاهش دهد (۲۲، ۳۱ و ۴۱).

با توجه به توسعه صنایع و معادن در ایران و آلودگی خاک‌های این مناطق به فلزات دارای پتانسیل سمیت، نیاز به برطرف کردن این آلاینده‌ها وجود دارد. در مکان‌های استخراج معدن معمولاً مقدار این فلزات بسیار زیاد است و می‌تواند بر رشد گیاه در فرآیند گیاه‌پالایی مؤثر باشد. بنابراین ممکن است بتوان با استفاده از زغال زیستی، سمیت فلزات در خاک آلوده را کاهش و رشد گیاه را افزایش داد. در این تحقیق به بررسی اثر زغال زیستی برگ‌گردو (به علت وجود سطح زیر کشت زیاد باغ‌های گردو در استان چهارمحال و بختیاری) تولیدشده در دماهای مختلف بر پاسخ‌های رشد گیاه ذرت، قابلیت استفاده روی و ارتباط بین روی قابل استفاده با پاسخ‌های رشد ذرت و ویژگی‌های زغال‌های زیستی تولیدشده پرداخته شده است.

## مواد و روش‌ها

### نمونه‌برداری

خاک مورد استفاده از منطقه سپاهان شهر واقع در جنوب اصفهان و در شمال جاده اصفهان- شیراز برداشته شد. در قسمت‌های جنوبی اراضی منطقه مسکونی سپاهان شهر، معدن دولتی سرب و روی باما و چند معدن خصوصی دیگر وجود دارد که از سال‌های قبل، فرآیند استخراج از آنها شروع شده و تاکنون ادامه دارد. در این منطقه سطحی با ابعاد ۲ در ۲ متر در نزدیکی معدن انتخاب شد. از این سطح ۵ نمونه به صورت تصادفی از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر برداشت شد. این نمونه‌ها با هم مخلوط و به عنوان نمونه نهایی خاک در نظر گرفته شد. نمونه خاک هوا خشک و با چکش چوبی کوبیده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های خاک از قبیل بافت به روش هیدرومتر (۱۴)، pH (سوسپانسیون ۱:۲ خاک به آب مقطر) (۳۹)، قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره ۱:۲ خاک به آب مقطر) (۳۴)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون اسید باقیمانده (۲۰) اندازه‌گیری شد، همچنین گنجایش تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم با pH=۷ (۳۷) و ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (۳۰) تعیین



(Costech 4010, Italy) (۴۰) تعیین شد (جدول ۱).

#### اندازه‌گیری روی قابل استفاده در خاک

پس از کشت و برداشت ریشه‌ها، خاک هر گلدان کاملاً مخلوط و نمونه‌ای از آن برداشته شد. در این نمونه‌ها روی محلول (با استفاده از آب مقطر و نسبت ۱:۱۰ خاک: آب، همراه با ۱۲۰ دقیقه تکان دادن) و روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA (با استفاده از ۰/۰۰۵ مولار + DTPA ۰/۰۱ مولار  $\text{CaCl}_2$  ۰/۱ مولار TEA و نسبت ۱:۲ خاک - عصاره‌گیر همراه با ۱۲۰ دقیقه تکان دادن) اندازه‌گیری شد (۱۶).

#### تجزیه و تحلیل آماری

قبل از تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی، فرضیات تجزیه واریانس شامل همگنی واریانس‌ها و توزیع نرمال باقی‌مانده‌ها بررسی شد. برای بررسی اثر مقدار زغال زیستی (۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی-وزنی)، دمای تهیه زغال زیستی (۰، ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس) و اثر متقابل آنها بر پاسخ‌های ذرت و روی قابل استفاده از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. منظور از زغال زیستی تهیه شده در دمای ۰ درجه سلسیوس، برگ گردو است.

(AAS) اندازه‌گیری شد. مقدار ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال روی به‌ترتیب از روابط زیر محاسبه شد (۴۲).

غلظت روی کل در خاک/ غلظت روی در ریشه = ضریب تجمع زیستی  
غلظت روی در ریشه/ غلظت روی در اندام هوایی = ضریب انتقال

#### تهیه زغال زیستی

برای تهیه زغال زیستی از برگ ریخته‌شده پای درخت گردو در پایان فصل تابستان و از باغ‌های شهر سامان استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. زغال زیستی در ۳ سطح دمای ۲۰۰، ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه سلسیوس با قرار دادن در کوره به مدت ۲ ساعت و با آهنگ حرارتی ۱ درجه سلسیوس بر دقیقه و در شرایط کمبود اکسیژن تهیه شد. سپس، ویژگی‌های زغال زیستی از قبیل قابلیت هدایت الکتریکی (عصاره ۱:۱۰ بیوپار به آب مقطر)، pH (۱:۱۰ سوسپانسیون بیوپار به آب مقطر)، روی کل و ظرفیت تبادل کاتیونی، با استفاده از روش‌های بیان شده در بخش قبل، سطح ویژه با روش BET (۷) و کربن آلی با دستگاه آنالیزگر CHNSO (elemental analysis instrument)

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک\* و اصلاح‌کننده‌ها\*\*

Table 1- Some chemical and physical properties of soil and biochars

| Properties<br>ویژگی                            | Soil<br>خاک           | Walnut<br>leaf<br>برگ گردو | Biochar- 200<br>زغال زیستی -<br>۲۰۰ | Biochar- 400<br>زغال زیستی -<br>۴۰۰ | Biochar- 600<br>زغال زیستی -<br>۶۰۰ |
|------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| pH                                             | 7.5                   | 4.8                        | 5.2                                 | 9.3                                 | 10.4                                |
| قابلیت هدایت الکتریکی (دسی‌زیمنس بر متر)       | 0.82                  | 3.11                       | 4.42                                | 5.63                                | 8.06                                |
| EC ( $\text{dS m}^{-1}$ )                      |                       |                            |                                     |                                     |                                     |
| ظرفیت تبادل کاتیونی (سانتی‌مول بار بر کیلوگرم) | 10.7                  | 30.5                       | 28.5                                | 22.9                                | 19.9                                |
| CEC ( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )        |                       |                            |                                     |                                     |                                     |
| سطح ویژه (مترمربع بر گرم)                      | -                     | 2.2                        | 3.3                                 | 4.0                                 | 9.2                                 |
| Surface area ( $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$ )   |                       |                            |                                     |                                     |                                     |
| OC (%) کربن آلی                                | 0.13                  | 43.05                      | 49.15                               | 47.98                               | 54.63                               |
| Sand (%) شن                                    | 78                    | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| Silt (%) سیلت                                  | 15                    | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| Clay (%) رس                                    | 7                     | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| Texture بافت                                   | Loamy sand<br>شن لومی | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| $\text{CaCO}_3$ (%) کربنات کلسیم               | 28.4                  | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| روی قابل استفاده (میلی‌گرم بر کیلوگرم)         | 190.4                 | -                          | -                                   | -                                   | -                                   |
| DTPA-TEA - Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )          |                       |                            |                                     |                                     |                                     |
| روی کل (میلی‌گرم بر کیلوگرم)                   | 35758                 | 14.4                       | 27.6                                | 44.9                                | 46.8                                |
| Total Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )               |                       |                            |                                     |                                     |                                     |

\* خاک (Soil): pH-H<sub>2</sub>O (1:2) و EC (1:2). \*\* اصلاح‌کننده (Amendment): pH-H<sub>2</sub>O (1:10) و EC (1:10)

همچنین، برای مقایسه بین پاسخ‌های ذرت و روی قابل استفاده در خاک بدون زغال زیستی (شاهد) با خاک‌های تیمار شده، تجزیه واریانس در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. مقایسه میانگین‌ها با استفاده از روش Fisher-LSD و در سطح احتمال ۵ درصد انجام گردید. همچنین ضریب همبستگی پیرسون بین پاسخ‌های ذرت با روی قابل استفاده تعیین شد. تجزیه آماری داده‌ها با استفاده از نرم-افزار Statistica 8 انجام شد.

## نتایج و بحث

### پاسخ‌های ذرت در کشت گلخانه‌ای

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه داده‌ها (داده‌ها نشان داده نشده است) نشان داد که اثر دمای تهیه زغال زیستی بر پاسخ‌های رشد ذرت معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) بود. تأثیر مقدار زغال زیستی استفاده شده بر غلظت روی در ریشه، ضریب تجمع زیستی ( $P < 0.05$ )، وزن خشک ریشه و غلظت روی در اندام هوایی معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). همچنین اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی بر وزن خشک ریشه ( $P < 0.01$ ) و غلظت روی در اندام هوایی معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) بود.

### وزن خشک اندام هوایی و ریشه

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۲ نشان داده شده است. تفاوت بین وزن خشک اندام هوایی اندازه‌گیری شده در زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای مختلف معنی‌دار است ( $P < 0.05$ ). تیمار خاک با زغال زیستی تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک اندام هوایی را به ترتیب ۶/۸، ۴۱/۱ و ۶۸/۱ درصد نسبت به خاک‌های تیمار شده با زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. با کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک اندام هوایی به ترتیب ۳۲/۱ و ۵۷/۴ درصد نسبت به خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش یافت. همچنین وزن خشک اندام هوایی با کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ۱۹/۱ درصد نسبت به خاک تیمار شده با برگ گردو افزایش یافت.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت بین وزن خشک ریشه در زغال زیستی تهیه شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). تیمار خاک با زغال زیستی تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، وزن خشک ریشه را به ترتیب ۱۳/۶، ۴۷/۱ و ۵۶/۳ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، وزن خشک ریشه را

به ترتیب ۲۹/۴ و ۳۷/۵ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. وزن خشک ریشه با کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ۶/۳ درصد نسبت به خاک تیمار شده با بقایا افزایش یافت. نتایج نشان داد که کاربرد بیوجار تهیه شده در هر دمای و با هر مقداری در خاک، وزن خشک اندام هوایی و ریشه را افزایش معنی-داری داد ( $P < 0.05$ ).

در پژوهش یاداو اکولاسینگام و همکاران (۴۲) وزن ذرت در خاک تیمار شده با ۵ درصد اصلاح‌کننده ۳/۸ برابر ذرت رشد کرده در خاک شاهد بود. آن‌ها علت افزایش رشد ذرت را به آزاد شدن بیشتر عناصر غذایی در اثر تجزیه ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک آلوده نسبت دادند.

### غلظت روی در اندام هوایی و ریشه

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۳ نشان داده شده است. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) تفاوت بین غلظت روی اندام هوایی در زغال زیستی تهیه شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ )؛ به گونه‌ای که کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک آلوده، غلظت روی اندام هوایی را ۱۰/۴، ۱۶/۶ و ۲۰/۰ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی اندام هوایی را ۶/۸ و ۱۰/۷ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. همچنین غلظت روی اندام هوایی با کاربرد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک ۴/۱ درصد نسبت به برگ گردو کاهش یافت.

بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار، غلظت روی اندام هوایی در خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف زغال زیستی (به جز سطوح ۱ و ۲ درصد زغال زیستی) تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) داشت (جدول ۳). با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی در خاک، مقدار روی اندام هوایی ۵/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت. تیمار خاک با ۱ درصد زغال زیستی، مقدار روی اندام هوایی را ۳/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد.

نتایج نشان داد که تیمار خاک‌ها با زغال زیستی در هر دما و با هر مقداری (به جز کاربرد مقادیر مختلف بقایا و ۰/۵ درصد زغال زیستی تهیه شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) غلظت روی اندام هوایی را نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری داد ( $P < 0.05$ ).

جدول ۲- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه ذرت  
Table 2- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on shoots and roots dry weight of maize

| تیمارها         | دمای گرماکافت         | سطح Level  |              |              |
|-----------------|-----------------------|------------|--------------|--------------|
| Treatments      | Pyrolysis temperature | (%)        |              |              |
|                 | (°C)                  | 0.5        | 1            | 2            |
| بخش هوایی Shoot |                       |            |              |              |
| شاهد            |                       | 3.5±0.29E  | 3.5±0.29E    | 3.5±0.29E    |
| Control         |                       |            |              |              |
| زغال زیستی نشده |                       | 4.7±0.09D  | 4.7±0.19D    | 4.6±0.1D     |
| Biomass         |                       |            |              |              |
| زغال زیستی      | 200                   | 5.5±0.39C  | 5.6±0.1C     | 5.5±0.17C    |
| Biochar         |                       |            |              |              |
|                 | 400                   | 6.8±0.36B  | 7.5±0.32AB   | 7.8±0.64A    |
|                 | 600                   | 7.8±0.07A  | 7.9±0.02A    | 8.1±0.13A    |
|                 |                       | 6.2        | 6.4          | 6.5          |
| ریشه Root       |                       |            |              |              |
| شاهد            |                       | 2.4±0.07F  | 2.4±0.07F    | 2.4±0.07F    |
| Control         |                       |            |              |              |
| زغال زیستی نشده |                       | 3.1±0.13eE | 3.2±0.08deDE | 3.2±0.01deDE |
| Biomass         |                       |            |              |              |
| زغال زیستی      | 200                   | 3.4±0.04dD | 3.3±0.07deDE | 3.4±0.12deDE |
| Biochar         |                       |            |              |              |
|                 | 400                   | 3.9±0.07cC | 4.6±0.04bB   | 4.7±0.02bB   |
|                 | 600                   | 4.7±0.14bB | 5.1±0.07aA   | 5.2±0.09aA   |
|                 |                       | 3.8b       | 4.0a         | 4.1a         |

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ . Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ .

مقداری در خاک (به‌جز مقادیر مختلف بقایا و سطوح ۰/۵ و ۱ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس)، غلظت روی را در ریشه به‌صورت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) کاهش داد. دامنه طبیعی و آستانه تحمل روی در بافت گیاه به‌ترتیب بین ۲۷ تا ۱۵۰ و بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در گیاهان آلوده بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۱۸). در مطالعه حاضر، با توجه به نتایج جدول ۳ غلظت روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کشت‌شده در خاک شاهد به‌ترتیب ۶۸۷/۱ و ۶۷۶۰/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم محاسبه شد. بنابراین ذرت در همه خاک‌ها تحت تأثیر سمیت روی قرار گرفت. آرناس-لاگو و همکاران (۵) گزارش کردند که رنگدانه‌های کاروتنوئید و آنتوسیانین در گیاهان رشد‌کرده در خاک آلوده به معدن روی افزایش یافت. با کاربرد زغال زیستی در خاک آلوده، جذب روی توسط گیاه کاهش یافت و با افزایش مقدار کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی، از مقدار روی در اندام هوایی و ریشه گیاه کاسته شد (جدول ۳). بنابراین، زغال زیستی به عنوان یک اصلاح‌کننده می‌تواند در بهبود رشد گیاه در خاکی بشدت آلوده مؤثر

تفاوت بین غلظت روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف نیز معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، غلظت روی را در ریشه به‌ترتیب ۱۹/۲، ۲۸/۴ و ۳۰/۸ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش داد. غلظت روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۱۱/۳ و ۱۴/۴ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش یافت. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی را در ریشه ۳/۴ درصد نسبت به خاک تیمارشده با بقایا کاهش داد. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت غلظت روی در ریشه با کاربرد ۲ و ۰/۵ درصد زغال زیستی در خاک معنی‌دار شد ( $P < 0.05$ ). کاربرد ۲ درصد بیوپچار در خاک غلظت روی را در ریشه ۳ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد. نتایج نشان داد که کاربرد بیوپچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر

رشد ریشه با کاربرد این مقدار زغال زیستی در خاک آلوده ناشی از دودکش کارخانه‌های مجاور و در خاک آلوده مجاور معدن به‌ترتیب ۱۳۱/۰ و ۳۹/۰ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. تیمارهای زغال زیستی در بالا بردن تحمل برگ و خنثی‌سازی تنش‌های اکسیداسیونی ایجادشده توسط روی بسیار موثر بودند (۱۲). بر اساس نتایج یوچیمیا و همکاران (۴۰)، گروه‌های عاملی اکسیژنی سطح زغال زیستی، فلزات سنگین را جذب کردند. بنابراین غلظت فلزات سنگین در گیاه کاهش یافت. همچنین به دلیل تأثیر اثر رقت در اثر افزایش زیست‌توده گیاهی، سمیت فلزات در خاک‌های تیمارشده با زغال زیستی، کاهش یافت (۴۵).

باشد. بر اساس نتایج آل وابل و همکاران (۳) زغال زیستی تهیه‌شده از بقایای درخت کنوکارپوس قابلیت تحرک روی را در خاک آلوده کاهش داد و باعث کاهش تجمع آن در اندام هوایی شد. بنابراین رشد اندام هوایی ذرت افزایش یافت. زیرا تجمع روی در بافت‌های گیاهی در غلظت‌های بالا در گیاه سمیت ایجاد کرد و رشد گیاه را کاهش داد (۳۲). سطح ویژه و گروه‌های عاملی اکسیژنی زغال زیستی نیز از عوامل مهمی بودند که جذب فلزات سنگین توسط زغال زیستی را افزایش داده و سمیت آنها در گیاه کاهش یافت (۴ و ۱۹). مطابق با نتایج مطالعه حاضر، آلی و همکاران (۲) گزارش کردند که با کاربرد ۵ درصد زغال زیستی بامبو در خاک آلوده مجاور معدن، غلظت روی ریشه ۱۹ درصد نسبت به شاهد کاهش یافت.

جدول ۳- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت روی در اندام هوایی و ریشه ذرت

Table 3- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Zn concentrations in shoots and roots of maize

| تیمارها<br>Treatments      | دمای گرماکافت<br>Pyrolysis temperature<br>(° C) | سطح Level<br>(%)        |                           |                          |         |
|----------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------|
|                            |                                                 | 0.5                     | 1                         | 2                        |         |
|                            |                                                 | Shoot بخش هوایی         |                           |                          |         |
| شاهد<br>Control            |                                                 | 687.1±3.8A              | 687.1±3.8A                | 687.1±3.8A               |         |
| زغال زیستی نشده<br>Biomass |                                                 | 694.1±6.6aA             | 688.0±9.9aA               | 682.4±20.0abAB           | 688.2a  |
| زغال زیستی<br>Biochar      | 200                                             | 672.3±7.5abcABC         | 654.0±1.9bcC              | 652.8±3.6cC              | 659.7b  |
|                            | 400                                             | 657.8±13.7bcBC          | 608.3±2.5dD               | 577.9±18.8eE             | 614.7c  |
|                            | 600                                             | 558.9±1.3efEF<br>645.8a | 554.0±4.8efEF<br>626.1b   | 538.6±3.7fF<br>612.9b    | 550.5d  |
| Root ریشه                  |                                                 |                         |                           |                          |         |
| شاهد<br>Control            |                                                 | 6760.3±27.6A            | 6760.3±27.6A              | 6760.3±27.6A             |         |
| زغال زیستی نشده<br>Biomass |                                                 | 6746.4±125.0A           | 6845.2±67.2A              | 6841.3±50.1A             | 6811.0a |
| زغال زیستی<br>Biochar      | 200                                             | 6651.8±181.5AB          | 6610.5±28.7AB             | 6467.3±105.0B            | 6577.0b |
|                            | 400                                             | 5948.5±35.9C            | 5858.3±110.8C             | 5686.3±11.8C             | 5831.0c |
|                            | 600                                             | 4918.7±85.2D<br>6066.3a | 4686.7±88.2DE<br>6000.2ab | 4530.9±135.9E<br>5881.4b | 4712.1d |

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ . Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ .

دماهای مختلف (به‌جز برگ گردو و زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). ضریب تجمع زیستی روی در ریشه با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک به‌ترتیب ۱۹/۰، ۲۸/۳ و ۳۰/۵ درصد نسبت به

#### ضریب تجمع زیستی روی در ریشه و ضریب انتقال گیاهی

نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۴ نشان داده شده است. آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار نشان داد که تفاوت بین ضریب تجمع زیستی روی در ریشه در خاک تیمارشده با زغال زیستی تهیه‌شده در

بیوچار در خاک، ضریب تجمع زیستی روی را در ریشه ۳/۵ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد. بنابراین نتایج نشان داد که کاربرد بیوچار تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری در خاک (به‌جز مقادیر مختلف بقایا و مقادیر ۰/۵ و ۱ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس) ضریب تجمع زیستی روی ریشه را کاهش معنی‌داری داد ( $P < 0.05$ ).

زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰، ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش یافت. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، ضریب تجمع زیستی روی را در ریشه به‌ترتیب ۱۱/۴ و ۱۴/۲ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ و ۰ درجه سلسیوس کاهش داد. بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD)، تفاوت ضریب تجمع زیستی روی در ریشه با کاربرد ۲ و ۰/۵ درصد زغال زیستی در خاک معنی‌دار شد ( $P < 0.05$ ). به این صورت که کاربرد ۲ درصد

جدول ۴- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر ضریب تجمع زیستی و ضریب انتقال گیاهی روی  
Table 4- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on Zn bioaccumulation factor and Zn translocation factor

| تیمارها<br>Treatments                                                  | دمای گرماکافت<br>Pyrolysis temperature<br>(°C) | translocation factor |                     |               |        |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|--------|
|                                                                        |                                                | Level سطح<br>(%)     |                     |               |        |
|                                                                        |                                                | 0.5                  | 1                   | 2             |        |
| شاهد<br>Control<br>زغال زیستی نشده<br>Biomass<br>زغال زیستی<br>Biochar |                                                | 0.189±0.0008A        | BF<br>0.189±0.0008A | 0.189±0.0008A |        |
|                                                                        |                                                | 0.189±0.004AB        | 0.191±0.002A        | 0.191±0.001A  | 0.19a  |
|                                                                        | 200                                            | 0.186±0.005AB        | 0.185±0.0008AB      | 0.181±0.003B  | 0.184a |
|                                                                        | 400                                            | 0.166±0.001C         | 0.164±0.0031C       | 0.159±0.0003C | 0.163b |
|                                                                        | 600                                            | 0.138±0.002D         | 0.131±0.003DE       | 0.127±0.004E  | 0.132c |
|                                                                        |                                                | 0.170a               | 0.168ab             | 0.164b        |        |
| شاهد<br>Control<br>زغال زیستی نشده<br>Biomass<br>زغال زیستی<br>Biochar |                                                | 0.102±0.000C         | TF<br>0.102±0.000C  | 0.102±0.000C  |        |
|                                                                        |                                                | 0.103±0.001C         | 0.101±0.002C        | 0.10±0.003C   | 0.101c |
|                                                                        | 200                                            | 0.101±0.002C         | 0.099±0.001C        | 0.101±0.002C  | 0.10c  |
|                                                                        | 400                                            | 0.111±0.002B         | 0.104±0.002C        | 0.102±0.003C  | 0.105b |
|                                                                        | 600                                            | 0.114±0.002AB        | 0.118±0.001A        | 0.119±0.004A  | 0.117a |
|                                                                        |                                                | 0.107                | 0.105               | 0.105         |        |

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ . Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ .

سلسیوس در خاک، ضریب انتقال گیاهی روی را به‌ترتیب ۵/۰ و ۴/۰ درصد نسبت به زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش داد. نتایج نشان داد که با کاربرد ۰/۵ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس و سطوح مختلف زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، ضریب انتقال گیاهی روی نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری یافت ( $P < 0.05$ ).

تفاوت بین ضریب انتقال گیاهی روی در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز بیوچار تهیه‌شده در دمای ۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). ضریب انتقال گیاهی روی در خاک تیمار شده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، به‌ترتیب ۱۱/۴، ۱۷/۰ و ۱۵/۸ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو افزایش یافت. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه

و بیان کردند که به نظر می‌رسد ذرت به دلیل تثبیت بیشتر فلزات سنگین در ریشه نسبت به اندام هوایی، گیاه تثبیت‌کننده‌تر روی نسبت به پالایش‌کننده است.

### روی قابل استفاده

نتایج تجزیه واریانس دو طرفه نشان داد که دما و مقدار زغال زیستی مورد استفاده بر مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA اثر معنی‌داری داشت ( $P < 0.01$ ) (داده‌ها نشان داده نشده است). اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی بر روی محلول معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). نتایج نشان داد که دمای گرم‌ماکت و سطح زغال زیستی به‌ترتیب مهمترین عوامل موثر بر تغییرات مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA بودند. اثر متقابل دما و مقدار زغال زیستی نیز عامل مهم دیگری بر تغییرات مقدار روی محلول بود.

بر اساس نتایج مقایسه میانگین تیمارها در جدول ۵، تفاوت بین مقدار روی محلول در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف (به‌جز زغال زیستی تهیه‌شده در دماهایی ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس) معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ). مقدار روی محلول، در خاک تیمار شده با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به‌ترتیب ۲۰/۷، ۲۱/۷ و ۳۳/۱ درصد نسبت به زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو کاهش یافت. با کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، مقدار روی محلول ۱۵/۶ درصد نسبت به بقایا کاهش یافت. تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، مقدار روی محلول را ۱۴/۵ درصد نسبت به بقایا کاهش داد.

مقدار روی محلول در آب در خاک‌های تیمار شده با سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری ( $P < 0.05$ ) داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی، مقدار روی محلول به‌ترتیب ۱۳/۸ و ۱۹/۰ درصد نسبت به ۱ و ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت. تیمار خاک با ۱ درصد زغال زیستی، مقدار روی محلول را ۶/۱ درصد نسبت به ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش داد. نتایج نشان داد که تیمار خاک با زغال زیستی تهیه‌شده در هر دمایی و با هر مقداری، روی محلول را کاهش معنی‌داری داد.

تفاوت بین روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA در زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای مختلف معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ) و فقط روی قابل استفاده در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی تهیه‌شده در دماهای ۲۰۰ و ۴۰۰ درجه سلسیوس تفاوت معنی‌داری نداشت ( $P > 0.05$ ). کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش روی قابل استفاده به‌ترتیب ۱۱/۱، ۱۲/۵ و ۲۴/۰ درصد نسبت به خاک تیمار شده با زغال‌های زیستی

یک روش ساده جهت تعیین میزان انتقال فلزات سنگین از خاک به ریشه، تعیین ضریب تجمع زیستی (انتقال از خاک به ریشه) است (۶). بر اساس نتایج جدول ۴ با افزایش دمای تهیه و مقدار زغال زیستی، ضریب تجمع زیستی کاهش یافت. یوساف و همکاران (۴۴) بیان کردند که تجمع زیستی فلزات سنگین به مقدار فلزات سنگین خاک بستگی دارد. به گونه‌ای که هر چه قابلیت‌استفاده فلزات سنگین کمتر باشد، تجمع زیستی و سمیت آن برای گیاه کمتر است. نتایج قبلی نیز نشان داد که با کاربرد زغال زیستی، انتقال فلزات سنگین از خاک و تجمع زیستی آنها در گیاه کاهش یافت (۲۷، ۴۳). زیرا تجمع زیستی فلزات سنگین به ویژگی‌های گیاهی شامل نوع گونه گیاهی، مرحله رشد گیاه، ویژگی‌های فیزیولوژیکی و تثبیت فلزات سنگین در سلول، همچنین ویژگی‌های فلزات سنگین همانند چگونگی جذب و قرارگیری فلزات سنگین در سلول (۲۹) و عوامل خاکی شامل مقدار ماده آلی، pH و مقدار فلزات سنگین خاک وابسته بود (۲۴). نتایج این تحقیق نشان داد که کاهش ضریب تجمع زیستی تیمارها به دلیل کاهش قابلیت استفاده روی در نتیجه تأثیر زغال زیستی و کاهش غلظت آن در ریشه ذرت بود (جدول ۳).

انتقال فلزات سنگین از ریشه به اندام هوایی ضریب انتقال گیاهی نامیده می‌شود و جهت اهداف گیاه‌پالایی کاربرد دارد (۱۳). در مطالعه حاضر علت افزایش ضریب انتقال گیاهی در تیمارهای دارای زغال زیستی (بخصوص تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس)، وزن خشک بیشتر اندام هوایی نسبت به وزن خشک ریشه گیاه در این تیمارها بود. زیرا زغال زیستی با ممانعت از انتقال فلزات به گیاه، زیست‌توده ریشه و اندام هوایی گیاه را افزایش داد؛ اما افزایش ماده خشک بخش هوایی در سطوح و دماهای بالاتر زغال زیستی (بخصوص تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس) بیشتر بود (جدول ۲). به گونه‌ای که تیمار خاک‌ها با ۲ درصد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس، غلظت روی اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۲۱/۶ و ۳۳ درصد کاهش و در عین حال، وزن خشک اندام هوایی و ریشه را به‌ترتیب ۱۳۱/۴ و ۱۱۶/۷ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. در این مطالعه ضریب انتقال در همه تیمارها کمتر از یک بود و مطابق با نتایج آید و شلتوت (۱۱) بود که ضریب انتقال روی را در گیاهان مختلف کمتر از یک گزارش کردند. آنان بیان کردند مقادیر کمتر از ۱ برای فاکتور انتقال نشان می‌دهد که گیاه به علت خاصیت سمی فلزات سنگین از انتقال آنها از ریشه به اندام هوایی ممانعت کرده است. این نتایج نشان‌دهنده وجود یک مکانیسم دفاعی در گیاه است که با تجمع فلزات سنگین در ریشه از انتقال آنها به زنجیره غذایی جلوگیری می‌کند. همچنین در مطالعه حاضر، در همه تیمارها، مقدار ضریب تجمع زیستی بیشتر از ضریب انتقال گیاهی بود. یاداوکولاسینگام و همکاران (۴۲) در پژوهش خود، به بالاتر بودن ضریب تجمع زیستی نسبت به ضریب انتقال گیاهی در تیمارها اشاره

تهیه‌شده در دماهای ۴۰۰ و ۲۰۰ درجه سلسیوس و برگ گردو شد. همچنین، کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۴۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش ۱۴/۵ درصد روی قابل استفاده نسبت به برگ گردو شد. کاربرد زغال زیستی تهیه‌شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس در خاک، باعث کاهش ۱۳/۱ درصد روی قابل استفاده نسبت به برگ گردو شد.

بر اساس آزمون مقایسه میانگین‌روی عصاره‌گیری شده با DTPA-TEA در سطوح مختلف زغال زیستی تفاوت معنی‌داری

( $P < 0.05$ ) داشت (جدول ۵). نتایج نشان داد که با کاربرد ۲ درصد زغال زیستی در خاک، روی عصاره‌گیری‌شده به‌ترتیب ۶/۱ و ۱۱/۱ درصد نسبت به خاک‌های تیمار شده با سطوح ۱ و ۰/۵ درصد کاهش یافت. همچنین روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با کاربرد ۱ درصد زغال زیستی ۵/۳ درصد نسبت به خاک تیمار شده با ۰/۵ درصد زغال زیستی کاهش یافت.

جدول ۵- تأثیر دمای تهیه زغال زیستی، مقدار و اثر متقابل آن‌ها بر روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA  
Table 5- Effects of pyrolysis temperatures, biochar rates and their interactions on soluble Zn and DTPA-extractable Zn

| تیمارها<br>Treatments                  | دمای گرم‌کافت<br>Pyrolysis temperature<br>(° C) | سطح Level<br>(%) |                  |              |        |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|------------------|--------------|--------|
|                                        |                                                 | 0.5              | 1                | 2            |        |
| Soluble Zn روی محلول                   |                                                 |                  |                  |              |        |
| شاهد<br>Control                        |                                                 | 0.895±0.003A     | 0.895±0.003A     | 0.895±0.003A |        |
| زغال زیستی نشده<br>Biomass             |                                                 | 0.61±0.04abBC    | 0.63±0.02abBC    | 0.65±0.01aB  | 0.629a |
| زغال زیستی<br>Biochar                  | 200                                             | 0.62±0.01abBC    | 0.595±0.02abcBCD | 0.4±0.006fG  | 0.538b |
|                                        | 400                                             | 0.57±0.02bcdCDE  | 0.532±0.02cdeDEF | 0.49±0.01eF  | 0.531b |
|                                        | 600                                             | 0.52±0.05deEF    | 0.42±0.01fG      | 0.33±0.006gH | 0.421c |
|                                        |                                                 | 0.578a           | 0.543b           | 0.468c       |        |
| DTPA-extractable Zn روی عصاره‌گیری‌شده |                                                 |                  |                  |              |        |
| شاهد<br>Control                        |                                                 | 190.4±0.9A       | 190.4±0.9A       | 190.4±0.9A   |        |
| زغال زیستی نشده<br>Biomass             |                                                 | 187.0±2.0A       | 174.7±3.5B       | 170.0±0.7BC  | 177.2a |
| زغال زیستی<br>Biochar                  | 200                                             | 161.6±3.7D       | 151.6±4.3E       | 148.8±0.9E   | 154.0b |
|                                        | 400                                             | 164.0±2.3CD      | 152.8±2.3E       | 137.6±2.8F   | 151.5b |
|                                        | 600                                             | 140.8±1.8F       | 139.2±0.9F       | 124.0±3.2G   | 134.7c |
|                                        |                                                 | 163.3a           | 154.6b           | 145.1c       |        |

هر داده مقدار میانگین ۳ تکرار هر تیمار ± خطای استاندارد است. حروف کوچک متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است. حروف بزرگ متفاوت نشان دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین تیمارها نسبت به شاهد، با روش fisher-LSD در سطح احتمال ۵ درصد است.

Each data is mean value of three replications with standard errors. Different lowercase letter(s) represent significant differences between treatments by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ . Different uppercase letter(s) for each application rate represent significant differences between unamended and amended soils by fisher-LSD 's test at  $p < 0.05$ .

زیستی ۶۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۲۶/۱ و ۲۶/۹ و ۳۴/۹ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش داد. در مطالعه حاضر، با افزایش سطح کاربرد و دمای تهیه زغال زیستی، مقدار روی محلول در تیمارها کاهش معنی‌داری داشت ( $P < 0.05$ ). بر طبق نتایج لیو و همکاران (۲۵) نیز مقدار روی محلول با کاربرد زغال زیستی در خاک کاهش یافت. همچنین بر اساس نتایج جدول ۵، با افزایش مقدار و دمای تهیه زغال زیستی، مقدار روی قابل استفاده در تیمارها کاهش یافت. در مطالعات قبلی نیز، زغال زیستی

کاربرد زغال زیستی (در همه مقادیر و دماهای مختلف) مقدار روی قابل استفاده را در مقایسه با خاک شاهد کاهش معنی‌دار ( $P < 0.05$ ) داد. تیمار خاک‌ها با ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد بقایا، روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱/۸، ۸/۲ و ۱۰/۷ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد زغال زیستی ۲۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱۵/۱، ۲۰/۴ و ۲۱/۸ درصد، تیمار خاک‌ها با ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد زغال زیستی ۴۰۰ درجه سلسیوس روی قابل استفاده را به‌ترتیب ۱۳/۹، ۱۹/۷ و ۲۷/۷ درصد و تیمار خاک‌ها با ۰/۵ و ۱ و ۲ درصد زغال

کردن فلزات سنگین داشتند (۳۱).

### همبستگی بین روی محلول، روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA و پاسخ‌های گیاه

بر اساس نتایج، ضرایب پیرسون (جدول ۶) بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با غلظت روی در اندام هوایی، غلظت روی در ریشه و ضریب تجمع زیستی روی در ریشه مثبت و معنی‌دار بود ( $P < 0.01$ ). به عبارت دیگر با افزایش مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA قابلیت استفاده آن در خاک، تجمع در ریشه و مقدار آن در اندام هوایی گیاه افزایش یافت. بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با ضریب انتقال گیاهی ( $P < 0.05$ )، وزن خشک اندام هوایی و وزن خشک ریشه همبستگی منفی و معنی‌داری وجود داشت ( $P < 0.01$ ). این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA، مقدار وزن خشک گیاه کاهش یافت و زغال زیستی این تأثیر منفی را کاهش داد.

تهیه‌شده از بقایای میسکانتوس (۱۷) و زغال زیستی تهیه‌شده از بقایای نی‌شکر (۳۳) قابلیت استفاده روی را به ترتیب ۹۲ و ۵۴ درصد کاهش دادند. زیرا روی توسط سطوح خارجی، مکان‌های داخلی، شبکه منافذ و شکاف‌های درون زغال زیستی جذب شد و در ریزحفره‌های درون زغال زیستی کمپلکس تشکیل داد (۹). بنابراین زغال زیستی با مکانیسم‌هایی از قبیل جذب سطحی (اختصاصی و غیراختصاصی)، تشکیل کلات‌های پایدار و کمپلکس با مواد آلی، قابلیت استفاده فلزات سنگین را کاهش داد (۱).

نتایج مطالعه ضریب همبستگی نشان داد که بین pH تیمارها با روی محلول ( $-0.84$ ) و روی قابل استفاده ( $-0.73$ ) همبستگی منفی و معنی‌داری وجود داشت ( $P < 0.01$ ). بنابراین با افزایش pH خاک در اثر کاربرد بیوپار (داده‌ها نشان داده نشده است) می‌تواند دلیلی بر کاهش جذب روی باشد. همچنین ضریب همبستگی پیرسون بین سطح ویژه زغال زیستی و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA  $-0.92$  ( $P < 0.05$ ) و بین دمای گرماکافت و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA  $-0.94$  ( $P < 0.05$ ) بود که مطابق با نتایج تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی سطح زغال‌های زیستی تهیه‌شده در دماهای بالاتر گرماکافت، نقش مهمی در غیرمتحرک

جدول ۶- ضریب همبستگی پیرسون بین روی محلول و روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA با پاسخ‌های گیاه ( $n=13$ )

| ویژگی                    |                         | روی محلول  | روی عصاره‌گیری‌شده با DTPA-TEA |
|--------------------------|-------------------------|------------|--------------------------------|
| Characteristics          |                         | Soluble Zn | DTPA-extractable Zn            |
| اندام هوایی              | وزن خشک اندام هوایی     | -0.78**    | -0.88**                        |
| Shoot                    | Shoot dry weight        |            |                                |
|                          | غلظت روی در اندام هوایی | 0.72**     | 0.90**                         |
|                          | Concentrations in shoot |            |                                |
| ریشه                     | وزن خشک ریشه            | -0.79**    | -0.87**                        |
| Root                     | Root dry weight         |            |                                |
|                          | غلظت روی در ریشه        | 0.70**     | 0.81**                         |
|                          | Concentrations in root  |            |                                |
| شاخص‌های گیاه‌پالایی     | ضریب تجمع زیستی         | 0.70**     | 0.81**                         |
| Phytoremediation indices | Bioaccumulation factor  |            |                                |
|                          | ضریب انتقال گیاهی       | -0.58*     | -0.59*                         |
|                          | Translocation factor    |            |                                |

\*\*معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد، \* معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد.

\*\* Significant at  $P < 0.01$ , \* Significant at  $P < 0.05$ .

خشک ذرت را افزایش دهد. بنابراین استفاده از زغال زیستی برگ گردو می‌تواند راهکاری مفید و اقتصادی جهت تثبیت روی در خاک‌های آلوده به روی و افزایش رشد گیاه ذرت در مکان‌های آلوده به شمار رود.

### نتیجه‌گیری

دمای تولید زغال زیستی تهیه‌شده از برگ‌گردو، مقدار کاربرد و برهمکنش بین آنها می‌تواند بر مقدار روی قابل استفاده گیاه تأثیرگذار و جذب روی را از خاک‌های به‌شدت آلوده کاهش، و ماده



- 1- Ahmad M., Ok Y.S., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Kim B.Y., Ahn J.H., Lee Y.H., Al-Wabel M.I., Lee S.E., and Lee S.S. 2016. Lead and copper immobilization in a shooting range soil using soybean stover and pine needle-derived biochars: Chemical, microbial and spectroscopic assessments. *Journal of Hazardous Materials*, 301:179-86.
- 2- Ali A., Guo D., Zhang Y., Sun X., Jiang S., Guo Z., Huang H., Liang W., Li R., and Zhang Z. 2017. Using bamboo biochar with compost for the stabilization and phytotoxicity reduction of heavy metals in mine-contaminated soils of China. *Scientific reports*, 7(1):p.2690.
- 3- Al-Wabel M.I., Usman A.R.A., El-Naggar A.H., Aly A.A., Ibrahim H.M., Elmaghraby S., and Al-Omran A. 2015. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22:503-511.
- 4- Archanjo B.S., Mendoza M.E., Albu M., Mitchell D.R.G., Hagemann N., Mayrhofer C., Mai T.L.A., Weng Z., Kappler A., Behrens S., Munroe P., Achete C.A., Donne S., Araujo J.R., van Zwieten L., Horvat J., Enders A., and Joseph S. 2017. Nanoscale analyses of the surface structure and composition of biochars extracted from field trials or after co-composting using advanced analytical electron microscopy. *Geoderma*, 294:70-79.
- 5- Arenas-Lago D., Carvalho L.C., Santos E.S., and Abreu M.M. 2016. The physiological mechanisms underlying the ability of *Cistus monspeliensis* L. from São Domingos mine to withstand high Zn concentrations in soils. *Ecotoxicology and environmental safety*, 129:219-227.
- 6- Branzini A., González RS., and Zubillaga M. 2012. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. *Journal of environmental management*, 102:50-54.
- 7- Brunauer S., Emmett P.H., and Teller E. 1938. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*, 60(2):309-319.
- 8- Chen Y., Xie T., Liang Q., Liu M., Zhao M., Wang M., and Wang G. 2016. Effectiveness of lime and peat applications on cadmium availability in a paddy soil under various moisture regimes. *Environmental Science and Pollution Research*, 23:7757-7766.
- 9- Cheng C.H., Lehmann J., and Engelhard M.H. 2008. Natural oxidation of black carbon in soils: changes in molecular form and surface charge along a climosequence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6):1598-1610.
- 10- Dai S., Li H., Yang Z., Dai M., Dong X., Ge X., Sun, M., and Shi L. 2018. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1-14.
- 11- Eid E.M., and Shaltout K.H. 2016. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by nine native plant species grown at a sewage sludge dumpsite. *International Journal of Phytoremediation*, 18(11):1075-1085.
- 12- Esfandbod M., Merritt C.R., Rashti M.R., Singh B., Boyd S.E., Srivastava P., Brown C.L., Butler O.M., Kookana R.S., and Chen C. 2017. Role of oxygen-containing functional groups in forest fire-generated and pyrolytic chars for immobilization of copper and nickel. *Environmental Pollution*, 220:946-954.
- 13- Galal T.M., and Shehata H.S. 2015. Bioaccumulation and translocation of heavy metals by *Plantago major* L. grown in contaminated soils under the effect of traffic pollution. *Ecological Indicators*, 48:244-251.
- 14- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. p. 475-490. In: Klute A. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 1.2<sup>nd</sup> edition. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin.
- 15- Hofmann. N. R. 2012. Nicotianamine in zinc and iron homeostasis. *Plant Cell*, 24. 373.
- 16- Hosseinpour A., and Motaghian H. 2018. *Soil Testing (Correlation, Calibration, and Fertilizer Recommendation Studies)*, Shahrekord University.
- 17- Houben D., Evrard L., and Sonnet P. 2013. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Biomass and Bioenergy*, 57:196-204.
- 18- Kabata-Pendias A., and Pendias H. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants*. Third Ed. CRC Press. Boca Raton, London.
- 19- Kumar A., Tsechansky L., Lew B., Raveh E., Frenkel O., and Graber E.R. 2018. Biochar alleviates phytotoxicity in *Ficus elastica* grown in Zn-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 618:188-198.
- 20- Leppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. p. 437-447. In: Sparks D.L. (ed.) *Methods of Soil*

Analysis. SSSA, Madison.

- 21- Liang J., Liu J., Yuan X., Dong H., Zeng G., Wu H., Wang H., Liu J., Hua S., Zhang S., Yu Z., He X., and He Y. 2015. Facile synthesis of alumina-decorated multi-walled carbon nanotubes for simultaneous adsorption of cadmium ion and trichloroethylene. *Chemical Engineering Journal*, 273:101-110.
- 22- Liang J., Zhong M., Zeng G., Chen G., Hua S., Li X., Yuan Y., Wu H., and Gao X. 2017. Risk management for optimal land use planning integrating ecosystem services values: a case study in Changsha, Middle China. *Science of the Total Environment*, 579:1675-82.
- 23- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42:421-428.
- 24- Liu J., Wang J., Qi J., Li X., Chen Y., Wang C., and Wu Y. 2012. Heavy metal contamination in arable soils and vegetables around a sulfuric acid factory, China. *Clean-Soil, Air, Water*, 40(7):766-772.
- 25- Liu T., Liu B., and Zhang W. 2014. Nutrients and heavy metals in biochar produced by sewage sludge pyrolysis: its application in soil amendment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 23(1):271-275.
- 26- Liu W., Wang S., Lin P., Sun H., Hou J., Zuo Q., and Huo R. 2015. Response of  $\text{CaCl}_2$ -extractable heavy metals, polychlorinated biphenyls, and microbial communities to biochar amendment in naturally contaminated soils. *Journal of Soils and Sediments*, 16(2):476-485.
- 27- Mohamed I., Zhang GS., Li Z.G., Liu Y., Chen F., and Dai K. 2015. Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application. *Ecological Engineering*, 84:67-76.
- 28- Mukhopadhyay M., Das A., Subba P., Bantawa P., Sarkar B., Ghosh P., and Mondal T.K. 2012. Structural, physiological, and biochemical profiling of tea plantlets under zinc stress. *Biologia Plantarum*, 57(3):474-480.
- 29- Nawab J., Khan S., Shah M.T., Gul N., Ali A., Khan K., and Huang Q. 2016. Heavy metal bioaccumulation in native plants in chromite impacted sites: a search for effective remediating plant species. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 44(1):37-46.
- 30- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Carbon, organic carbon and organic matter. p. 961-1010. In Sparks D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison.
- 31- O'Connor D., Peng T., Zhang J., Tsang D.C., Alessi D.S., Shen Z., Bolan N.S., and Hou D. 2018. Biochar application for the remediation of heavy metal polluted land: a review of in situ field trials. *Science of The Total Environment*, 619:815-826.
- 32- Park J.H., Choppala G.K., Bolan N.S., Chung J.W., and Chuasavathi T. 2011. Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348:439-451.
- 33- Puga A.P., Abreu C.A., Melo L.C.A., and Beesley L. 2015. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management*, 159:86-93.
- 34- Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-435. In: Sparks D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison.
- 35- Ruiz E., Azcarate J. A., Rodriguez L., and Rincon J. 2009. Assessment of metal availability in soil from a Pb- Zn mine site of South-Central Spain. *Soil and Sediment Contamination*, 18:619-641.
- 36- Sposito G., Lund L.J., and Chang A.C. 1982. Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. *Soil Science Society of America Journal*, 46:260-265.
- 37- Sumner M.E., and Miller P.M. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficient. p. 1201-1230. In Sparks D.L. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. SSSA, Madison.
- 38- Tembo B.D., Sichilongo K., and Cernak J. 2006. Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia. *Chemosphere*, 63:497-501.
- 39- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L. (ed.) *Methods of soil Analysis*. SSSA, Madison.
- 40- Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson K.T., Fortier C.A., and Lima I.M. 2011. Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59:2501-2510.
- 41- Wang P., Tang L., Wei X., Zeng G., Zhou Y., Deng Y., Wang J., Xie Z., and Fang W. 2017. Synthesis and

- application of iron and zinc doped biochar for removal of nitrophenol in wastewater and assessment of the influence of co-existed Pb(II). *Applied Surface Science*, 392:391-401.
- 42- Yathavakulasingam T., Mikunthan T., and Vithanage M. 2016. Acceleration of Lead Phytostabilization by Maize (*Zea mays* L.) in Association with *Gliricidia sepium* Biomass. *Chemical and Environmental Systems Modeling Research Group, National Institute of Fundamental Studies, Kandy, Sri Lanka*, 2(5):16-21.
- 43- Yousaf B., Liu G., Wang R., Zia-ur-Rehman M., Rizwan M.S., Imtiaz M., Murtaza G., and Shakoor A. 2016. Investigating the potential influence of biochar and traditional organic amendments on the bioavailability and transfer of Cd in the soil-plant system. *Environmental Earth Sciences*, 75(5):374.
- 44- Yousaf B., Liu G., Abbas Q., Ullah H., Wang R., Zia-ur-Rehman M., and Niu Z. 2017. Addition of biochar nanosheets to soil alleviate health risks of potentially toxic elements via consumption of wheat grown in an industrially contaminated soil. *Chemosphere*, 1:161-170.
- 45- Zhang G., Guo X., Zhao Z., He Q., Wang S., Zhu Y., Yan Y., Liu X., Sun K., Zhao Y., and Qian T. 2016. Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil. *Environmental Pollution*, 218:513-522.



## Effect of Biochars Produced at Different Temperatures on the Availability of Zinc and Maize (*Zea mays* L.) Responses in a Contaminated Soil

P. Kabiri<sup>1</sup>– H.R. Motaghian<sup>2\*</sup> – A.R. Hosseinpour<sup>3</sup>

Received: 23-04-2018

Accepted: 18-07-2018

**Introduction:** Anthropogenic activities have transformed the global geochemical cycling of heavy metals. Mine tailings are of great concern due to the detrimental effects of toxic inorganic elements causing environmental risks. Zinc (Zn) as an essential element is required in small amounts for various biochemical reactions and physiological functions. However, high concentrations of Zn can induce oxidative stress. Applying an organic amendment is a promising, in situ phytostabilization approach to alleviate the phytotoxic effects of heavy metal in contaminated soils. The application of biochar as an amendment may be a solution to reduce the risk of pollutant diffusion. Biochars is a fine-grained biological residue combusted under low oxygen conditions, resulting in a porous, stable carbon-based material. The potential biochar applications include carbon sequestration, soil fertility improvement, and pollution remediation; therefore, it can reduce pollutants mobility and bioavailability.

**Materials and Methods:** Results of this research indicated that biochars decreased Zn concentration in maize shoots and roots. They reduced Zn concentration in the shoot/root of maize. Zinc concentration in shoots and roots of maize (*Zea mays* L.) harvested at 60 days after sowing, decreased with increasing thermochemical temperature and application rate of biochar. In treated soil with 2% (w/w) biochar prepared at 600 °C, Zn concentration in shoots and roots decreased by 21.6 and 33.0 % respectively ( $p < 0.05$ ). Physiological responses showed that WB applications improved the shoot/root growth and dry biomass (root and shoot). In comparison with the control, the highest shoot and root dry matter values were found in 2% (w/w) biochar-600 °C treatment by 131.4 and 116.7% respectively ( $p < 0.05$ ). Zinc bioaccumulation towards plant decreased with increasing thermochemical temperatures and application rate of biochars. Determination of bioaccumulation factor (BF) and translocation factor (TF) indicated that bioaccumulation factor is higher than translocation factor in maize planting. For the treatment biochar produced at 600 °C, BF, and TF were 0.132 and 0.117 respectively. Thereby maize can be considered as a potential phytostabilizer. At the same time efficiency of phytostabilizing nature of maize can increase together with the application of biochar. The results showed that water and DTPA-extractable Zn concentrations were significantly ( $p < 0.05$ ) lower in Walnut leaves biochars treated soils than those in unamended soils. Bioavailable Zn concentration (soluble and DTPA-extractable Zn) decreased by increasing WB thermochemical temperature and application rate. In comparison with the control, the 2% biochar-600 °C significantly reduced soluble and DTPA-extractable Zn by 63.1 and 34.9 % respectively ( $p < 0.05$ ). A significant positive correlation coefficients was found between soluble Zn and Zn concentrations in plant shoot and root (0.72, 0.70,  $p < 0.01$ ), and between DTPA-extractable values and shoot and root Zn concentrations (0.90, 0.81,  $p < 0.01$ , respectively). There is a negative correlation between soluble Zn and shoot and root dry weight (-0.78, -0.79,  $p < 0.01$  respectively), and between bioaccessible Zn and shoot and root dry weight (-0.88, -0.87,  $p < 0.01$ , respectively). Importantly, the results of the Pearson correlation analysis revealed a negative relationship between biochar surface area (and production temperature) and DTPA-extractable Zn in the soil, suggesting biochars produced at higher temperature played a more important role in immobilizing heavy metals.

**Results and Discussions:** The results indicated that biochars decreased Zn concentration in maize shoots and roots. Zinc concentration in shoots and roots of maize (*Zea mays* L.) harvested at 60 days after sowing date, decreased with increasing thermochemical temperature and application rate of biochar. In treated soil with 2% (w/w) biochar prepared at 600 °C, Zn concentration in shoots and roots decreased by 21.6 and 33.0 %, respectively ( $p < 0.05$ ). Physiological responses showed that WB application improved the shoot/root growth and dry biomass (root and shoot). In comparison with the control, the highest shoot and root dry matter values were found in 2% (w/w) biochar-600 °C treatment by 131.4 and 116.7%, respectively ( $p < 0.05$ ). Zinc bioaccumulation towards plant decreased with increasing thermochemical temperatures and application rate of biochars.

1, 2 and 3 M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor, Department of Soil Science, University of Shahrekord, Respectively

(\* - Corresponding Author Email: motaghian.h@yahoo.com)

Determination of bioaccumulation factor (BF) and translocation factor (TF) indicated that bioaccumulation factor is higher than translocation factor in maize planting. For the treatment biochar produced at 600 °C, BF and TF were 0.132 and 0.117, respectively. Therefore, maize can be considered as a potential phytostabilizer. The efficiency of phytostabilizing nature of maize can be increased by application of biochar. The results showed that water and DTPA-extractable Zn concentrations were significantly ( $p < 0.05$ ) lower in the soils treated by Walnut leaves biochars as compared with those in unamended soils. Bioavailable Zn concentration (soluble and DTPA-extractable Zn) decreased by increasing WB thermochemical temperature and application rate. In comparison with the control, the 2% biochar-600 °C significantly reduced soluble and DTPA-extractable Zn by 63.1 and 34.9 %, respectively ( $p < 0.05$ ). A significant positive correlation coefficient was found between soluble Zn and Zn concentrations in plant shoot and root (0.72, 0.70,  $p < 0.01$ ), and between DTPA-extractable values and shoot and root Zn concentrations (0.90, 0.81,  $p < 0.01$ , respectively). There was a negative correlation between soluble Zn and shoot and root dry weight (-0.78, -0.79,  $p < 0.01$  respectively), and between bioaccessible Zn and shoot and root dry weight (-0.88, -0.87,  $p < 0.01$ , respectively). Importantly, the results of the Pearson correlation analysis revealed a negative relationship between biochar surface area (and production temperature) and DTPA-extractable Zn in the soil, implying the fact that the biochars produced at higher temperature played a more important role in immobilizing heavy metals.

**Conclusions:** Our results denote that WB application to a contaminated soil has the potential of in situ remediation by immobilizing Zn, thereby reducing metal availability to maize. Given that Walnut leaf is a readily available agricultural residue, we suggest that its conversion to biochar and incorporation into a contaminated soil can be an achievable and cost-effective approach to mitigate metal exposure of maize. The WB has the potential to significantly affect the behavior of Zn in soil by altering its solubility and availability. In conclusion, these results highlight the biochar potential to mitigate the metals phytoaccumulation and reduce metal exposure of maize. Further experiments are needed not only to define the biochar potential in phytoremediation but also to better understand the criteria for choosing the best ingredient. The results of this pot experiment are encouraging and need to be confirmed with the long-term field experiments.

**Keywords:** Heavy metals, Phytostabilization, Pyrolysis





## ارزیابی زمین‌آماری پایداری خاکدانه‌ها و نسبت جذبی سدیم در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه

شکراله اصغری<sup>۱\*</sup> - محمود شهبایی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۵

### چکیده

این پژوهش به منظور برآورد تغییرات توزیع مکانی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و نسبت جذبی سدیم (SAR) در خاک‌های متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه اجرا گردید. نمونه‌های خاک از دو کاربری کشاورزی (۴۹ نمونه) و بایر (۵۱ نمونه) به هم چسبیده (۸۰ ha) برای اندازه‌گیری شن، سیلت، رس، کربن آلی، اسیدیته، آهک، هدایت الکتریکی (EC)، SAR و MWD به صورت شبکه‌های منظم ۱۰۰×۱۰۰ m در بخش شندآباد منطقه شبستر برداشته شد. از روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای تحلیل تغییرات مکانی متغیرهای خاک استفاده گردید. متغیرهای کربن آلی و EC به ترتیب از کمترین (۶۶۰ m) و بیشترین (۱۹۸۷ m) دامنه تأثیر برخوردار بودند. وابستگی‌های مکانی قوی و متوسط به ترتیب برای SAR با دامنه تأثیر ۱۹۰۳ m و MWD با دامنه تأثیر ۱۶۱۴ m به دست آمد. مدل نیم‌تغییرنمای گوسی برای SAR و MWD برازش گردید. بهترین تخمین براساس ضریب تطابق (CCC) با روش OK برای SAR (۰/۳۸۲) و با روش IDW توان ۲ برای MWD (۰/۳۲۵) انجام گرفت. نقشه‌های توزیع مکانی نشان داد که از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر به دلیل نزدیک شدن به رسوبات دریاچه، مقادیر SAR، EC، اسیدیته، آهک و رس افزایش ولی شن، کربن آلی و MWD کاهش یافت.

**واژه‌های کلیدی:** اراضی کشاورزی، تغییرات مکانی، خاک‌های شور و سدیمی، شبستر، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

### مقدمه

کشاورزی و بیابانی شدن متعاقب آن‌ها، جان شش میلیون نفر از ساکنان منطقه را به طور مستقیم و غیر مستقیم تهدید می‌کند (۱۲). وبستر (۲۵) نشان داد که خصوصیات خاک معمولاً دارای وابستگی مکانی هستند. نمونه‌های خاک نزدیک به هم در مقایسه با نمونه‌های دور از هم، دارای خصوصیات مشابهی هستند. اطلاعات مربوط به تغییرات مکانی خصوصیات خاک از نظر به کارگیری روش‌های مدیریتی خاک در محل، اهمیت فراوان دارد. اردهان‌اوغلو و همکاران (۳) الگوی توزیع مکانی درصد سدیم تبادل (ESP)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) عصاره ۱ به ۲/۵ را در خاک‌های متأثر از نمک دشت ایگدیر ترکیه مطالعه نمودند. در پژوهش آن‌ها مدل کروی برای نیم‌تغییرنمای ESP، مدل نمایی برای نیم‌تغییرنمای EC و مدل خطی برای نیم‌تغییرنمای pH برازش داده شد. همچنین الگوی توزیع مکانی ESP و EC در منطقه مورد مطالعه مشابه هم بود. شنگ و همکاران (۲۳) به منظور تهیه نقشه رقومی خاک‌های متأثر از نمک واقع در مناطق بیابانی چین با وسعت ۵۲۵ کیلومتر مربع، از سه شاخص بافت خاک، طبقه‌بندی بافتی و مقدار کل شوری خاک در ۲۰۵ پروفیل خاک استفاده نمودند. آن‌ها بیان داشتند این

خاک‌هایی که نمک‌های محلول در آن‌ها رشد گیاهان را به مخاطره می‌اندازد خاک‌های متأثر از نمک نامیده می‌شوند. این گروه از خاک‌ها شامل خاک‌های شور، خاک‌های سدیمی و خاک‌های شور-سدیمی بوده و در مناطق آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک جهان بسیار شایع هستند (۲۲). دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب کشور ایران، دومین دریاچه شور جهان با مساحت ۵۸۲۲ کیلومتر مربع است. بحران خشکسالی پیش آمده در طی سال‌های اخیر باعث کم شدن حجم آب این دریاچه گردیده است. طوفان‌های نمکی برخاسته از املاح بستر دریاچه خشک شده موجب گسترش خاک‌های شور در اراضی کشاورزی حاشیه دریاچه گردیده است. شور شدن اراضی

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

\*- نویسنده مسئول: (Email: shokrollah.asghari@gmail.com)

۲- دانش‌آموخته دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز  
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.72257

سدیم با سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه. (۳) تعیین پارامترهای نیم‌تغییرنا مثل مدل نیم‌تغییرنا، کلاس همبستگی مکانی و دامنه تأثیر متغیرهای خاک. (۴) مقایسه دقت روش‌های کریجینگ و وزن‌دهی عکس فاصله در درون‌یابی متغیرهای خاک.

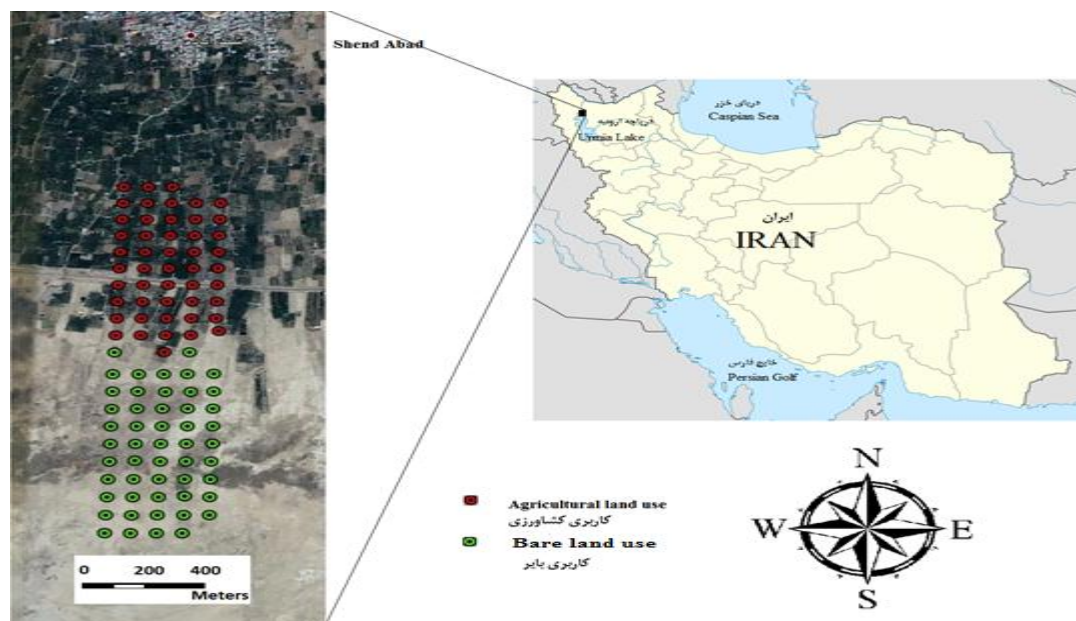
### مواد و روش‌ها

این پژوهش در شمال غرب دریاچه ارومیه واقع در محدوده اراضی کشاورزی شهر شندآباد با فاصله حدود ۱۵ کیلومتر از شهرستان شبستر و چسپیده به اراضی بایر حاشیه خشکیده بستر دریاچه ارومیه (مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۴ ثانیه تا ۴۵ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۸ ثانیه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۶ دقیقه و ۳۷ ثانیه تا ۳۸ درجه و ۷ دقیقه و ۴۲ ثانیه عرض شمالی) اجرا گردید (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه دارای آب و هوای سرد و نیمه‌خشک است. بیشینه، کمینه و میانگین دمای سالانه در این منطقه به ترتیب ۳۳، ۵- و ۱۲ درجه سلسیوس، میانگین بارندگی سالانه ۲۸۵ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۰۰ متر است. اراضی واقع در این منطقه به دلیل نزدیکی به دریاچه ارومیه، در معرض تهدید طوفان‌های نمکی ناشی از خشک شدن آب دریاچه قرار دارند. برای این منظور، دو کاربری چسپیده به هم به مساحت ۸۰ هکتار ( $2000 \times 400$  m) شامل اراضی بایر و اراضی کشاورزی (غالباً زیر کشت صیفی‌جات و درختان هلو) انتخاب گردید سپس ۵۱ نمونه از کاربری بایر و ۴۹ نمونه از کاربری کشاورزی از عمق ۰ تا ۱۰ cm خاک در قالب شبکه منظم  $100 \times 100$  (شکل ۱) با ثبت مختصات جغرافیایی هر نقطه در فروردین (کاربری بایر) و آذر (کاربری کشاورزی) سال ۱۳۹۶ برداشته شد. نمونه‌های خاک دست‌خورده (با حداقل دست‌خوردگی) پس از انتقال به آزمایشگاه هوا خشک گردیده و بخشی از آنها برای اندازه‌گیری پایداری خاکدانه‌ها جدا گردید و بخش باقی‌مانده پس از خرد شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (۱۸)، آهک به روش تیتراسیون با اسیدکلریدریک و سود (۲۰)، اسیدیته (pH) در گل اشباع، هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذبی سدیم (SAR) در عصاره ۱ به ۲/۵ (۷ و ۱۲)، توزیع اندازه ذرات شن، سیلت و رس به روش هیدرومتری ۴ قرائته (۱۱)، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در خاکدانه‌های کوچکتر از ۴/۷۵ mm به روش الک تر با الک‌های به قطر سوراخ ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ mm (۲۸) اندازه‌گیری شد.

نوع نقشه‌ها در مقایسه با روش‌های سنتی دارای مزیت‌هایی از قبیل سریع، هدفمند، کمی و آسان بودن و دارای قابلیت بروزرسانی هستند. نتایج پژوهش فروغی‌فر و همکاران (۸) در دشت تبریز نشان داد آهک فاقد وابستگی مکانی، کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)، جرم مخصوص ظاهری، سیلت و شن دارای وابستگی مکانی متوسط و pH، EC، نسبت جذبی سدیم (SAR) و رس دارای وابستگی مکانی قوی هستند. اوجی و کمالی (۱۹) نتایج نقشه‌های درون‌یابی به روش کریجینگ معمولی را در اراضی پسته‌کاری منطقه هرمزآباد رفسنجان بررسی کرده و گزارش نمودند که با ریزتر شدن بافت خاک و نیز افزایش دور آبیاری از متوسط ۲۸ به ۵۲ روز، شوری خاک از سمت جنوب به طرف شمال منطقه مطالعاتی افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش دلبری و جهانی (۶) در منطقه چات استان گلستان نشان داد EC، pH از همبستگی مکانی متوسط در سطح منطقه برخوردار بوده و کمترین دامنه تأثیر برای EC (حدود ۳۰۰۰ متر) و بیشترین دامنه تأثیر برای ESP و pH (حدود ۶۰۰۰ متر) به دست آمد. رنجبر و جلالی (۲۱) بیان کردند همبستگی مثبت و معنی‌دار بین ESP با رس، pH، EC، ظرفیت تبادل کاتیونی و SAR و همبستگی منفی و معنی‌دار بین ESP و سیلت در منطقه تبرک همدان یافت شد. همچنین درصد سدیم تبادلی، pH، EC، ظرفیت تبادل کاتیونی و SAR دارای همبستگی مکانی قوی ولی مقادیر رس و سیلت دارای همبستگی مکانی متوسط بودند. عنابی و همکاران (۱) تغییرات مکانی پایداری خاکدانه‌ها (MWD تر) را در ۱۱۳ نمونه خاک سطحی (۱۰-۰ cm) برداشته‌شده از یک منطقه کشاورزی ( $km^2$ ) در کشور تونس بررسی کردند. نتایج نشان داد مقدار متوسط MWD تر از ۰/۳۸ تا ۲/۸۰ mm در منطقه مورد مطالعه تغییر نمود همچنین پایداری خاکدانه‌ها دارای ساختار مکانی بوده و نیم‌تغییرناها در فاصله ۵ کیلومتری به سقف رسیدند.

با عنایت به اثرات منفی پراکنش نمک ناشی از خشک شدن آب دریاچه ارومیه بر کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه، لزوم مطالعه اثرات شوری و سدیمی شدن بر تغییرات مکانی پارامترهای کیفیت خاک و بررسی همبستگی بین این ویژگی‌ها به طور جد احساس می‌گردد که با برنامه‌های دولت محترم در ستاد احیای دریاچه ارومیه نیز مطابقت دارد. فرض بر آن است که روند تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک، در اراضی با کاربری بایر و کشاورزی و نیز با فاصله گرفتن از بستر خشک شده دریاچه به دلیل تفاوت در غلظت املاح یکسان نخواهد بود. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: (۱) تهیه نقشه توزیع مکانی پایداری خاکدانه‌ها و نسبت جذبی سدیم در کاربری‌های بایر و کشاورزی اراضی متأثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه. (۲) بررسی همبستگی بین پایداری خاکدانه‌ها و نسبت جذبی





شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقشه‌ی توزیع نقاط نمونه‌برداری در تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه  
Figure 1- Geographic position and distribution map of sampled points in satellite image of the studied area

انتخاب گردید. روش‌های مختلفی در برآورد متغیرهای مکانی وجود دارد که تفاوت عمده آن‌ها در محاسبه اوزان است که به نقاط اندازه‌گیری شده واقع در همسایگی نقطه مورد تخمین می‌دهند. در این پژوهش از روش‌های درون‌یابی OK و IDW (توان ۱ و ۲) جهت بررسی تغییرات مکانی متغیرها استفاده شد. نقشه تغییرات مکانی متغیرهای خاک با استفاده از نرم افزار Arc GIS 9.3 رسم گردید.

به منظور ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی از معیارهای ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده گردید (۱۴). همچنین ضریب تطابق<sup>۱</sup> (CCC) به منظور ارزیابی میزان مطابقت مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده MWD و SAR از رابطه زیر محاسبه گردید (۱۵):

$$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2} \quad (2)$$

که در آن  $\rho_c$  ضریب تطابق (CCC) برآورد شده،  $\rho$  ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر،  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$  به ترتیب واریانس مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر،  $\mu_x$  و  $\mu_y$  به ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر می‌باشد. آماره CCC میزاندگره‌ای را نشان می‌دهد که جفت مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر در اطراف خط ۴۵ درجه از مبدأ قرار می‌گیرند. در حقیقت، ضریب تبیین ( $R^2$ ) میزان دقت و RMSE

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف – اسمیرنوف، پارامترهای آمار کلاسیک و ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌ها با نرم افزار SPSS 16 محاسبه گردید. تجزیه‌های نیم تغییرنما و درون‌یابی به روش‌های کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای ارزیابی توزیع تغییرات مکانی خصوصیات فیزیکوشیمیایی مورد مطالعه، MWD و SAR با استفاده از نرم افزار GS<sup>+</sup> (۱۰) انجام گرفت. نیم‌تغییرنمای تجربی تابعی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (۹):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

که در آن  $N(h)$  تعداد جفت نمونه‌های به کار رفته در محاسبه که در فاصله  $h$  از یکدیگر قرار دارند،  $Z(x_i)$  مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر و  $Z(x_i + h)$  مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر که به فاصله‌ی  $h$  از  $Z(x_i)$  قرار دارد می‌باشد.

هر نیم تغییرنما از سه پارامتر اثر قطعه‌ای، دامنه تأثیر و حد آستانه یا سقف تشکیل شده است. مقدار نیم‌تغییرنما به ازای  $h=0$  را اثر قطعه‌ای می‌گویند که معمولاً ناشی از وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر، خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی، آزمایشگاهی و آنالیز است. با افزایش  $h$  مقدار نیم تغییرنما تا فاصله معینی اضافه شده سپس به حد ثابتی می‌رسد که این فاصله را دامنه تأثیر و مقدار نیم تغییرنما که ثابت شده را حد آستانه گویند (۱۴). بهترین مدل برازش یافته (گوسی، کروی، نمایی و خطی) با در نظر گرفتن کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و بیشترین ضریب تبیین ( $R^2$ )

1- Concordance correlation coefficient

میزان صحت روش درون‌یابی را نشان می‌دهد در حالی‌که CCC ترکیبی از صحت و دقت پیش‌بینی یک متغیر را از طریق ارزیابی میزان مطابقت با خط ۴۵ درجه در نظر می‌گیرد. هرچه میزان CCC به یک نزدیک‌تر باشد صحت و دقت درون‌یابی متغیر بالاتر است (۵).

## نتایج و بحث

### آماره‌های توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک

توصیف آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک منطقه مورد مطالعه به تفکیک کاربری بایر و کشاورزی در جدول ۱ آورده شده است.

طبقه‌بندی ویلدینگ و درس (۲۶) برای ارزیابی تغییرات ویژگی‌های خاک براساس ضریب تغییرات (CV) آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت: (۱) اگر CV کوچکتر از ۱۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری کمی دارد، (۲) اگر CV بین ۱۵ و ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری متوسط دارد، (۳) اگر CV بالای ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری بالایی دارد. بنابراین مطابق جدول ۱، تغییرپذیری MWD، شن و رس در کاربری

جدول ۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک اندازه‌گیری شده در کاربری‌های بایر و کشاورزی

Table 1- Descriptive statistics of the measured soil variables in the bare (B) and agricultural (A) land uses

| متغیر<br>Variable                   | واحد<br>Unit                | کاربری<br>Land use | حداقل<br>Min | حداکثر<br>Max | میانگین<br>Mean | ضریب تغییرات<br>(CV, %) |
|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------|-------------------------|
| شن Sand                             | %                           | B بایر             | 2.62         | 50.12         | 23.71           | 51.68                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 44.45        | 80.04         | 61.09           | 13.02                   |
| سیلت Silt                           | %                           | B بایر             | 36.24        | 65.91         | 50.91           | 15.47                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 16.48        | 45.67         | 30.34           | 19.40                   |
| رس Clay                             | %                           | B بایر             | 7.38         | 51.47         | 25.34           | 50.75                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 3.31         | 16.00         | 8.57            | 34.71                   |
| کربن آلی OC                         | %                           | B بایر             | 0.19         | 3.60          | 1.50            | 60.56                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 0.09         | 5.07          | 2.08            | 52.69                   |
| آهک $\text{CaCO}_3$                 | %                           | B بایر             | 20.49        | 35.27         | 29.41           | 12.84                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 16.69        | 23.68         | 20.11           | 8.32                    |
| اسیدیته $\text{pH}_e$               | -                           | B بایر             | 7.48         | 9.37          | 8.25            | 4.50                    |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 6.81         | 8.14          | 7.68            | 3.52                    |
| هدایت الکتریکی $\text{EC}_{1:2.5}$  | $\text{dS m}^{-1}$          | B بایر             | 0.26         | 9.67          | 2.23            | 104.77                  |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 0.32         | 4.16          | 0.93            | 85.76                   |
| نسبت جذبی سدیم $\text{SAR}_{1:2.5}$ | $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ | B بایر             | 0.63         | 63.99         | 14.78           | 113.05                  |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 0.53         | 7.83          | 1.15            | 89.71                   |
| میانگین وزنی قطر خاکدانه MWD        | mm                          | B بایر             | 0.03         | 1.41          | 0.51            | 74.82                   |
|                                     |                             | A کشاورزی          | 0.41         | 1.75          | 0.90            | 33.48                   |

OC: Organic carbon; SAR: Sodium adsorption ratio; EC: Electrical conductivity; MWD: Mean weigh diameter of aggregates. CV: Coefficient of variation. B: Bare; A: Agriculture

بایر، کربن آلی، EC و SAR در هر دو کاربری منطقه مورد مطالعه بالا بود. تغییرات بالای این متغیرها را می‌توان به روش‌های مدیریتی اعمال شده از قبیل استفاده از مالچ شن و سنگریزه، افزودن کود دامی و نیز نوع گیاه کشت شده در کاربری کشاورزی در مقایسه با کاربری بایر نسبت داد. مقادیر بالای CV برای کربن آلی (۹۹ درصد) و رس (۴۳ درصد) در دشت تبریز (۸) و نیز برای کربن آلی (۷۱ درصد) و MWD (۷۴ درصد) در اراضی آبرفتی اطراف شهر کرد (۱۶) گزارش شده است. براساس مثلث بافت امریکایی، خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس بافت لوم سیلتی ( $n=22$ )، لوم ( $n=13$ )، لوم رسی سیلتی ( $n=7$ )، رسی سیلتی ( $n=7$ ) و رسی ( $n=2$ ) در کاربری بایر و نیز لوم شنی ( $n=39$ )، لوم ( $n=7$ ) و شن لومی ( $n=3$ ) در کاربری کشاورزی بودند. بنابراین خاک‌های واقع در کاربری کشاورزی به علت قرارگیری در دشت دامنه‌ای مشرف به کوه میشو داغ و نیز کاربرد مالچ شن و سنگریزه توسط کشاورزان محلی، عمدتاً درشت‌بافت بوده در حالی‌که خاک‌های کاربری بایر به دلیل متأثر شدن از رسوبات دریاچه ارومیه، عمدتاً ریزبافت هستند.

میانگین کربن آلی در کاربری کشاورزی (۲/۰۸ درصد) بیشتر از کاربری بایر (۱/۵ درصد) می‌باشد (جدول ۱) که دلیل آن را می‌توان به استفاده کشاورزان از کودهای دامی و نیز کشت گیاهان مختلف زراعی و باغی در کاربری کشاورزی نسبت داد؛ این موضوع موجب گردیده است میانگین آهک (۲۰/۱۱ درصد) و اسیدیته (۷/۶۸) در کاربری کشاورزی کوچکتر از مقادیر متوسط این متغیرها (به ترتیب ۲۹/۴۱ و ۸/۲۵ درصد) در کاربری بایر و نیز متوسط MWD در کاربری کشاورزی (۰/۹۰ mm) بزرگتر از کاربری بایر (۰/۵۱ mm) باشد (جدول ۱). بنابراین خاک منطقه مورد مطالعه همانند سایر خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ایران (۲ و ۸) دارای ماده آلی کم، pH قلیایی و آهکی است.

مقادیر متوسط EC و SAR (عصاره ۱ به ۲/۵) به ترتیب از  $dS\ m^{-1}$  و  $0.5\ (meq\ l^{-1})^{0.5}$  و ۱/۱۵ در کاربری کشاورزی به  $dS\ m^{-1}$  و  $0.5\ (meq\ l^{-1})^{0.5}$  و ۲/۲۳<sup>۱</sup> در کاربری بایر افزایش یافت (جدول ۱) لذا براساس تقسیم بندی ریچارد (۲۲) خاک‌های منطقه مورد مطالعه (کاربری بایر) در گروه خاک‌های شور و سدیمی قرار می‌گیرند. البته اظهار نظر کشاورزان محلی و مشاهدات میدانی از منطقه حاکی از آن است که اراضی کاربری کشاورزی نیز به علت طوفان‌های نمکی ناشی از بستر خشک شده دریاچه ارومیه و شور شدن آب چاه‌های عمیق مورد استفاده برای آبیاری محصولات کشت شده، تدریجاً در حال شور و سدیمی شدن هستند.

ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای خاک در جدول ۲ آورده شده است. به طور کلی همبستگی منفی ( $P < 0.01$ ) بین MWD با سیلت، رس، آهک، اسیدیته، EC و SAR یافت شد در

حالی که همبستگی مثبت ( $P < 0.01$ ) بین MWD با شن و کربن آلی به دست آمد. همچنین همبستگی منفی ( $P < 0.01$ ) بین SAR با شن و کربن آلی و همبستگی مثبت ( $P < 0.01$ ) بین SAR با رس، سیلت، آهک، اسیدیته و EC یافت شد (جدول ۲). رس و آهک از عوامل سیمانی کننده ذرات خاک و خاکدانه سازی بوده در حالی که شن و سدیم از عوامل تخریب خاکدانه‌ها محسوب می‌شوند (۱۳). این نتایج با یافته‌های نبی‌الهی و همکاران (۱۷) مطابقت دارد که گزارش کردند در ۱۵۰ نمونه خاک برداشته شده از اراضی متأثر از نمک استان کردستان، بین MWD با اسیدیته، EC و SAR همبستگی منفی ( $P < 0.01$ ) و MWD با کربن آلی همبستگی مثبت ( $P < 0.01$ ) وجود دارد. این در حالی است که عنابی و همکاران (۱) در ۱۱۳ نمونه خاک برداشته شده از اراضی کشاورزی تونس، بین MWD با شن همبستگی منفی ( $P < 0.01$ ) و MWD با رس همبستگی مثبت ( $P < 0.01$ ) به دست آوردند. همبستگی مثبت MWD با شن و نیز همبستگی منفی MWD با رس در پژوهش حاضر را می‌توان به همبستگی مثبت شن با کربن آلی و همبستگی مثبت رس با SAR نسبت داد (جدول ۲). دلایل احتمالی همبستگی‌های به دست آمده بین متغیرهای ذکر شده در بالا را می‌توان به این صورت توجیه نمود که در منطقه مورد مطالعه از کاربری بایر به سمت کاربری کشاورزی به علت کاربرد مالچ سنگریزه و شن و نیز کود دامی توسط کشاورزان در اراضی زیر کشت صیفی جات مثل خیار، بادمجان و کدو، مقادیر شن و MWD به طور همزمان افزایش یافته است در حالی که از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر به دلیل نزدیکی به دریاچه با افزایش رس و SAR، پایداری خاکدانه‌ها (MWD) کاهش یافته است (اشکال ۴ و ۵).

جدول ۲- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه (n=100)  
Table 2- Pearson correlation (r) between soil variables in the studied area (n=100)

| متغیر<br>Variable    | شن<br>Sand | سیلت<br>Silt | رس<br>Clay | کربن آلی<br>OC | آهک<br>CaCO <sub>3</sub> | اسیدیته<br>pH <sub>e</sub> | هدایت الکتریکی<br>EC | نسبت جذبی<br>سدیم SAR | میانگین وزنی قطر<br>خاکدانه MWD |
|----------------------|------------|--------------|------------|----------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| شن                   | 1          | 0.86**       | 0.84**     | 0.43**         | -0.78**                  | -0.66**                    | -0.40**              | -0.60**               | 0.60**                          |
| سیلت                 |            | 1            | 0.46**     | -0.40**        | 0.80**                   | 0.57**                     | 0.29**               | 0.41**                | -0.54**                         |
| رس                   |            |              | 1          | -0.33**        | 0.54**                   | 0.56**                     | 0.40**               | 0.62**                | -0.48**                         |
| کربن آلی             |            |              |            | 1              | -0.13 <sup>ns</sup>      | -0.23**                    | -0.41**              | -0.38**               | 0.58**                          |
| آهک                  |            |              |            |                | 1                        | 0.68**                     | 0.17 <sup>ns</sup>   | 0.40**                | -0.38**                         |
| اسیدیته              |            |              |            |                |                          | 1                          | 0.15 <sup>ns</sup>   | 0.56**                | -0.31**                         |
| هدایت الکتریکی       |            |              |            |                |                          |                            | 1                    | 0.61**                | -0.56**                         |
| نسبت جذبی سدیم       |            |              |            |                |                          |                            |                      | 1                     | -0.57**                         |
| SAR <sub>1:2.5</sub> |            |              |            |                |                          |                            |                      |                       |                                 |

\*\* و \*\*\* به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در زیر جدول ۱ آورده شده است

Variable symbols description is available under Table 1. \*, \*\*, Significant at  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively

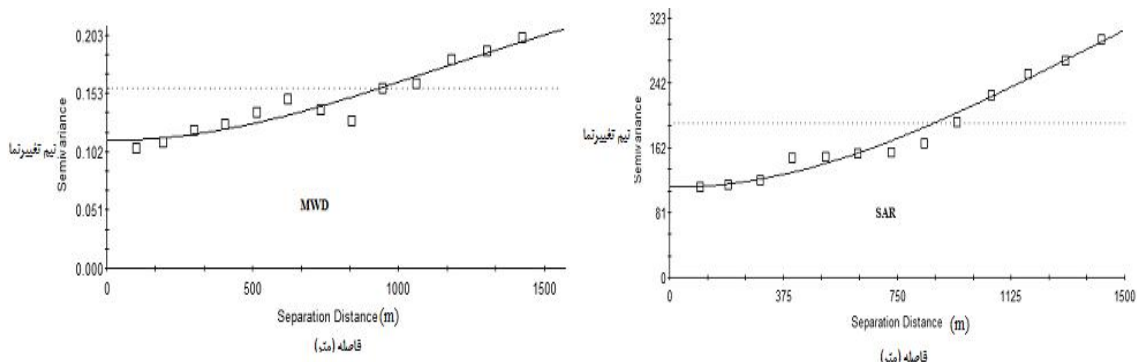
## تغییرات مکانی ویژگی‌های خاک

بررسی و نتایج در داده‌ها از طریق ابزار تحلیل روند در تحلیل گرزمین آمار Arc GIS انجام شد سپس روند موجود در جهت شمالی-جنوبی پس از برازش یک رویه درجه دوم حذف و نیم‌تغییرنمای تجربی برای همه متغیرهای مورد آزمایش در خاک منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. بهترین مدل‌های برازش یافته نیم‌تغییرنماها براساس کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و بالاترین ضریب تبیین ( $R^2$ )، پارامترهای هر مدل شامل اثر قطعه‌ای، نسبت اثر قطعه‌ای به سقف، دامنه تأثیر و کلاس وابستگی مکانی برای متغیرهای خاک در جدول ۳ آورده شده است. در این مطالعه، کلاس وابستگی مکانی متغیرهای خاک براساس نسبت اثر قطعه‌ای به سقف تعیین گردید (۴): اگر این نسبت

جدول ۳- پارامترهای مدل‌های برازش شده به نیم‌تغییرنمای متغیرهای خاک  
Table 3- Parameters of the models fitted to the semivariograms for soil variables

| متغیر<br>Variable               | وابستگی مکانی، مدل<br>Spatial dependence, model | دامنه تأثیر<br>(متر)<br>Range (m) | اثر قطعه‌ای<br>Nugget | سقف<br>Sill | نسبت اثر قطعه‌ای<br>Nugget/sill | مجموع مربعات<br>باقی‌مانده<br>RSS | ضریب<br>تبیین<br>$R^2$ |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|---------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| شن Sand                         | S، قوی G گوسی                                   | 1063                              | 98                    | 1048        | 0.09                            | 5222                              | 0.99                   |
| سیلت Silt                       | S، قوی Sph کروی                                 | 1154                              | 1.3                   | 225.3       | 0.006                           | 1799                              | 0.99                   |
| رس Clay                         | S، قوی G گوسی                                   | 1465                              | 64                    | 438.9       | 0.15                            | 1906                              | 0.98                   |
| کربن آلی OC                     | S، قوی E نمایی                                  | 660                               | 0.1                   | 1.05        | 0.1                             | 0.34                              | 0.23                   |
| آهک $CaCO_3$                    | S، قوی Sph کروی                                 | 1210                              | 0.1                   | 46.83       | 0.002                           | 236                               | 0.94                   |
| اسیدیته $pH_e$                  | S، قوی Sph کروی                                 | 1018                              | 0.047                 | 0.247       | 0.19                            | 0.009                             | 0.83                   |
| هدایت الکتریکی $EC_{1:2.5}$     | M، متوسط G گوسی                                 | 1987                              | 2.14                  | 9.29        | 0.26                            | 2.45                              | 0.87                   |
| نسبت جذبی سدیم<br>$SAR_{1:2.5}$ | S، قوی G گوسی                                   | 1903                              | 112                   | 534.9       | 0.21                            | 1255                              | 0.98                   |
| میانگین وزنی قطر خاکدانه<br>MWD | M، متوسط G گوسی                                 | 1614                              | 0.111                 | 0.27        | 0.41                            | 0.0009                            | 0.92                   |

Variable symbols description is available under Table 1. S: strong; M: moderate; W: weak. Sph: Spherical; G: Gaussian; E: Exponential.



شکل ۲- نیم‌تغییرنماها (نقاط) و مدل‌های برازش شده (خطوط) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و نسبت جذبی سدیم (SAR)  
Figure 2. Semivariograms (points) and fitted models (lines) of mean weight diameter of aggregates (MWD) and sodium adsorption ratio (SAR)

منطقه مورد مطالعه بودند. نقاط واقع در فواصل ماورای دامنه تأثیر، فاقد وابستگی مکانی تعریف شده هستند، دارای توزیع تصادفی بوده و مستقل رفتار می‌کنند (۹).

#### ارزیابی صحت روش‌های درونیابی

در جدول ۴ معیارهای ارزیابی صحت برآورد روش‌های درونیابی OK و IDW (توان وزنی ۱ و ۲) برای MWD و SAR آورده شده است. معیار میانگین خطا (ME) بیانگر متوسط خطای پیش‌بینی بوده و بیش‌برآوردی را برای MWD (هر دو روش درونیابی) و SAR (OK) و کم‌برآوردی را برای SAR (IDW) نشان می‌دهد. براساس آماره میانگین مطلق خطا (MAE)، در تخمین MWD بین سه روش درونیابی تفاوت چندانی مشهودی وجود ندارد همچنین روش IDW (توان وزنی ۱) به علت داشتن MAE کوچکتر در مقایسه با سایر روش‌های درونیابی از صحت نسبتاً بالایی در برآورد SAR برخوردار بوده است. معیار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز گویای آن است که در برآورد MWD، روش IDW توان ۲ و در برآورد SAR روش OK به علت داشتن RMSE کوچکتر دارای صحت تخمین نسبتاً بالایی است (جدول ۴). مقادیر مثبت ME، بیش‌برآوردی و مقادیر منفی آن، کم‌برآوردی متغیر را نشان می‌دهد؛ هرچه MAE و RMSE نزدیک‌تر صفر باشند بیانگر آن است که تخمین متغیر با صحت بالاتری صورت گرفته است (۵). برای تحلیل بیشتر صحت و دقت درونیابی، مقادیر برآورد شده MWD و SAR در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها برای همه نقاط نمونه‌برداری (n=100) ترسیم گردید (شکل ۳).

در این پژوهش، شن، سیلت، رس، کربن آلی، آهک، اسیدیته و SAR به علت داشتن نسبت اثر قطعه‌ای به سقف کوچکتر از ۰/۲۵ (جدول ۳)، براساس تقسیم‌بندی کمباردلا و همکاران (۴) دارای قوی‌ترین وابستگی مکانی بودند. همبستگی مکانی متوسط برای MWD توسط محمدی و متقیان (۱۶) و همبستگی مکانی قوی برای SAR توسط رنجبر و جلالی (۲۱) نیز گزارش گردیده است. کمباردلا و همکاران (۴) بیان کردند که متغیرهای با وابستگی مکانی قوی‌تر توسط تغییرپذیری ذاتی خاک کنترل می‌شوند در حالی که متغیرهای با وابستگی مکانی ضعیف‌تر توسط عوامل بیرونی مثل روش‌های مدیریتی و خاک‌ورزی کنترل می‌شوند.

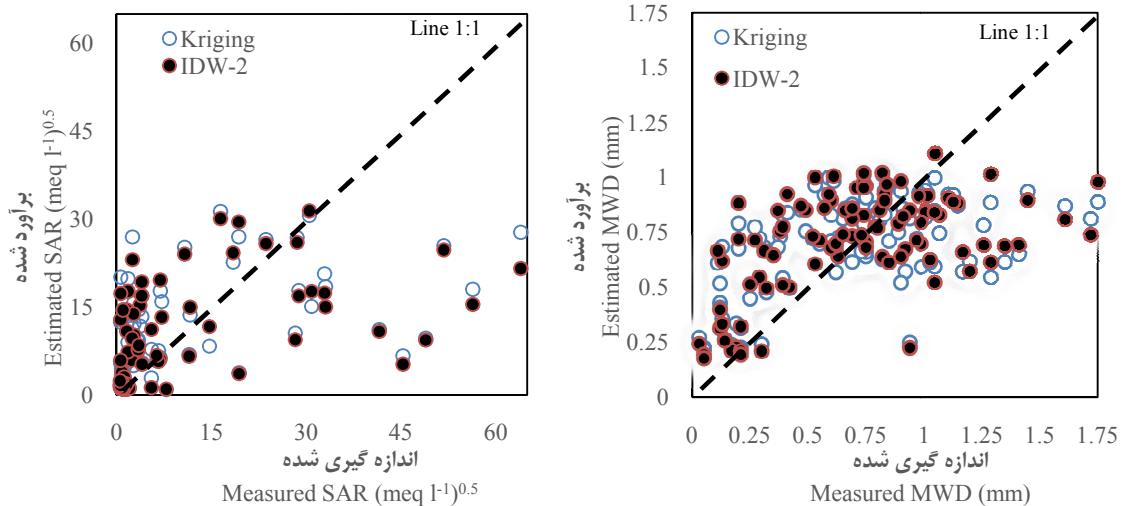
دامنه تأثیر فاصله مکانی بین نمونه‌ها است که در ماوراء آن، متغیر ناحیه‌ای در نقاط مجاور هم، تأثیر چندانی بر یکدیگر ندارند. بدیهی است که هرچه دامنه تأثیر بزرگتر باشد، ساختار مکانی گسترده‌تر است و محدوده‌ای که می‌توان از داده‌های آن برای تخمین مقادیر مجهول استفاده کرد، افزایش می‌یابد. دامنه تأثیر در تحلیل ناهمسانگردی‌های ساختاری و طراحی فاصله بهینه شبکه نمونه‌برداری کاربرد زیادی دارد (۹ و ۱۴). مقادیر دامنه تأثیر از ۶۶۰ m برای کربن آلی تا ۱۹۸۷ m برای EC در منطقه مورد مطالعه (۲۰۰×۴۰۰ m) متغیر بود (جدول ۳). کمترین دامنه تأثیر برای کربن آلی به‌دست آمد؛ این یافته را می‌توان به ماهیت متفاوت دو کاربری مورد مطالعه از نظر محصولات زیرکشت نسبت داد. فروغی‌فر و همکاران (۸) نیز برای کربن آلی، کوچکترین دامنه تأثیر (۲۲۷۰ m) را در مقایسه با سایر متغیرهای مورد مطالعه در دشت تبریز (۱۴×۷ km) گزارش کردند. دامنه تأثیر MWD (۱۶۱۴ m) کوچکتر از دامنه تأثیر EC (۱۹۸۷ m) و SAR (۱۹۰۳ m) بود (جدول ۳) بنابراین می‌توان استنباط نمود EC و SAR دارای ساختار مکانی گسترده‌تری در مقایسه با MWD در

جدول ۴- آماره‌های ارزیابی صحت برآورد متغیرهای خاک با استفاده از روش‌های مختلف درونیابی

Table 4. Accuracy assessment indices for estimating soil variables using different interpolation methods

| متغیر                                     | روش    | میانگین خطا | میانگین مطلق خطا | مجذور میانگین مربعات خطا | ضریب تطابق |
|-------------------------------------------|--------|-------------|------------------|--------------------------|------------|
| Variable                                  | Method | ME          | MAE              | RMSE                     | CCC        |
| MWD (mm)                                  | OK     | 0.005       | 0.269            | 0.339                    | 0.279      |
| میانگین وزنی قطر خاکدانه                  | IDW-1  | 0.010       | 0.263            | 0.335                    | 0.299      |
|                                           | IDW-2  | 0.008       | 0.262            | 0.078                    | 0.325      |
| SAR (meq l <sup>-1</sup> ) <sup>0.5</sup> | OK     | 0.067       | 6.51             | 11.19                    | 0.382      |
| نسبت جذبی سدیم                            | IDW-1  | -0.495      | 6.33             | 11.32                    | 0.332      |
|                                           | IDW-2  | -0.347      | 6.46             | 11.48                    | 0.351      |

ME: mean error; MAE: mean absolute error; RMSE: root mean square error; CCC: Concordance correlation coefficient; OK: Ordinary kriging; IDW: inverse distance weighting. Variable symbols description is available under Table 1.



شکل ۳- نمودار ۱:۱ میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و نسبت جذبی سدیم (SAR) اندازه‌گیری و برآورد شده  
Figure 4. 1:1 Scatter plots of the measured and estimated mean weight diameter of aggregates (MWD) and sodium adsorption ratio (SAR)

گردید؛ در این قسمت‌ها به‌علت استفاده کشاورزان محلی از کودهای دامی و نیز مالچ‌شن و سنگریزه (برای حفظ رطوبت خاک و تسهیل جوانه‌زنی بذور صیفی‌جات)، مقادیر کربن آلی (درصد $>2$ ) و شن (درصد $>40$ ) بالا است (شکل ۴). وجود همبستگی‌های معنی‌دار ( $P<0.01$ ) بین MWD با شن ( $r=0.60$ )، کربن آلی ( $r=0.58$ ) و SAR ( $r=-0.57$ ) نیز تأییدکننده ادعاهای فوق می‌باشد (جدول ۲). با توجه به این‌که شن از عوامل کاهنده پایداری خاکدانه‌ها (۱۳) است لذا به‌نظر می‌رسد در منطقه مورد مطالعه، MWD بیشتر متأثر از کربن آلی و SAR بوده است. به عبارت دیگر وجود کربن آلی زیاد در کاربری کشاورزی باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها در آب و در نتیجه MWD گردیده است در حالی‌که در کاربری بایر به علت مقادیر بالای سدیم (SAR زیاد) نسبت به کاربری کشاورزی، از پایداری خاکدانه‌ها و MWD کاسته شده است. سدیم به‌علت پراکنش رس‌ها از عوامل مخرب خاکدانه‌سازی می‌باشد. یزدانی و همکاران (۲۷) نیز گزارش کردند در خاک‌های منطقه اصفهان با افزایش شن و گچ، MWD افزایش ولی با افزایش SAR و EC، MWD کاهش یافت.

شکل ۵ نشان می‌دهد از شمال به جنوب منطقه مورد مطالعه با تغییر کاربری از کشاورزی به بایر به‌علت نزدیک شدن به رسوبات دریاچه، بر میزان رس و EC افزوده شده است. روند تقریباً مشابهی در مورد تغییرات اسیدیته و آهک در منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. وجود همبستگی‌های مثبت و معنی‌دار ( $P<0.01$ ) بین رس با آهک ( $r=0.54$ )، اسیدیته ( $r=0.56$ )، EC ( $r=0.40$ ) و SAR ( $r=0.62$ ) نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲). مقایسه نقشه توزیع مقادیر MWD (شکل ۴) با نقشه‌های توزیع مقادیر رس و آهک (شکل ۵) و نیز همبستگی‌های آن‌ها (جدول ۲) نشان می‌دهد اگرچه رس و آهک

بالاترین مقدار ضریب تطابق (CCC) برای MWD در روش IDW توان ۲ ( $0.325$ ) و برای SAR در روش OK ( $0.382$ ) یافت شد (جدول ۴). این مقادیر CCC بیانگر آن است که در پهنه‌بندی MWD روش IDW توان ۲ و در پهنه‌بندی SAR روش OK از مطابقت نسبتاً خوبی حول خط ۱:۱ (۵) مابین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیرهای مذکور برخوردار بوده است. اصغری و همکاران (۲) نیز گزارش کردند روش OK به علت داشتن CCC بالاتر ( $0.48$ ) در مقایسه با روش IDW توان ۱ ( $0.24$ ) و توان ۲ ( $0.29$ ) در تخمین مقاومت فروری خاک از دقت و صحت بالاتری برخوردار بود در حالی‌که براساس آماره CCC، در پهنه‌بندی جرم مخصوص ظاهری حداکثر، روش IDW توان ۲ ( $0.09$ ) دارای دقت و صحت بیشتری در مقایسه با روش OK ( $0.02$ ) بود.

#### نقشه‌های توزیع مکانی ویژگی‌های خاک

نقشه‌های توزیع مکانی شن، کربن آلی، MWD و SAR (شکل ۴) و رس، EC، اسیدیته و آهک (شکل ۵) با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS در ۵ کلاس طبقه‌بندی برای منطقه مورد مطالعه رسم گردید. شکل ۴ نشان می‌دهد که خاک‌های با SAR بالا ( $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ )  $>20$  و MWD پایین ( $<0.25$  mm) در بخش‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه (کاربری بایر) و نزدیکی دریاچه واقع شده‌اند؛ در این قسمت‌ها میزان کربن آلی (درصد $<0.75$ ) و شن (درصد $<22$ ) پایین بوده (شکل ۴) در حالی‌که میزان رس (درصد $>27$ ) و  $\text{dS m}^{-1}$  ( $>4$ ) EC بالا می‌باشد (شکل ۵). بیشترین مقادیر MWD ( $>1$  mm) در شمال شرق و نیز کمترین مقادیر SAR ( $(\text{meq l}^{-1})^{0.5}$ )  $<2$  در بخش‌های شمالی منطقه مورد مطالعه و کاربری کشاورزی مشاهده

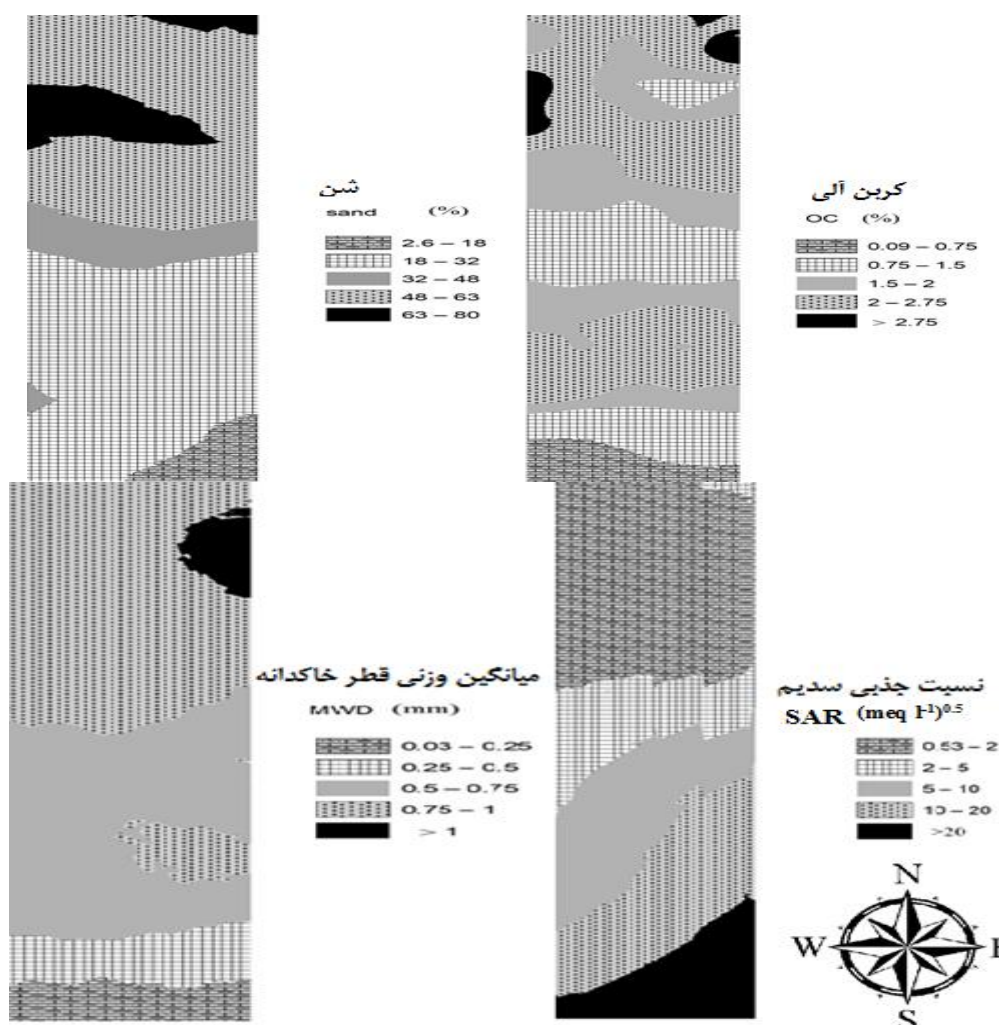


کربن آلی و شن همبستگی مثبت یافت شد. بین SAR با EC و رس همبستگی مثبت و با شن و کربن آلی همبستگی منفی یافت شد. متغیر SAR از وابستگی مکانی قوی و دامنه تأثیر بالا (۱۹۰۳ m) در حالی که MWD از وابستگی مکانی متوسط و دامنه تأثیر پایین (۱۶۱۴) برخوردار بود. از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر و با نزدیک شدن به رسوبات دریاچه ارومیه بر میزان رس، SAR، EC، اسیدیته و آهک افزوده شده از مقدار شن و MWD کاسته شد. بنابراین به منظور برنامه‌ریزی برای کشاورزی پایدار، لازم است اقدامات مدیریتی و حفاظتی مناسب در کاربری بایر اجرا گردد. کمترین دامنه تأثیر (۶۶۰ m) برای کربن آلی در میان متغیرهای مورد مطالعه به دست آمد لذا پیشنهاد می‌شود برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان در مطالعات بعدی، فواصل نمونه‌برداری خاک به جای ۱۰۰ متر، ۶۶۰ متر در نظر گرفته شود.

از عوامل مؤثر بر خاکدانه‌سازی هستند ولی در این پژوهش تغییرات این متغیرها در جهت عکس تغییرات MWD می‌باشد. علت این قضیه را می‌توان به همبستگی مثبت و معنی‌دار ( $P < 0.01$ ) SAR با رس و آهک (جدول ۲) نسبت داد. به عبارت دیگر، با افزایش رس و آهک به علت بالا رفتن سهم کاتیون سدیم در مکان‌های تبادل، از پایداری خاکدانه‌ها و در نتیجه MWD کاسته شده است. تاجیک (۲۴) نیز همبستگی منفی بین SAR و EC با پایداری خاکدانه‌ها در آب در خاک‌های برداشته شده از برخی مناطق گلستان، کرمانشاه، مازندران و آذربایجان غربی گزارش کرد.

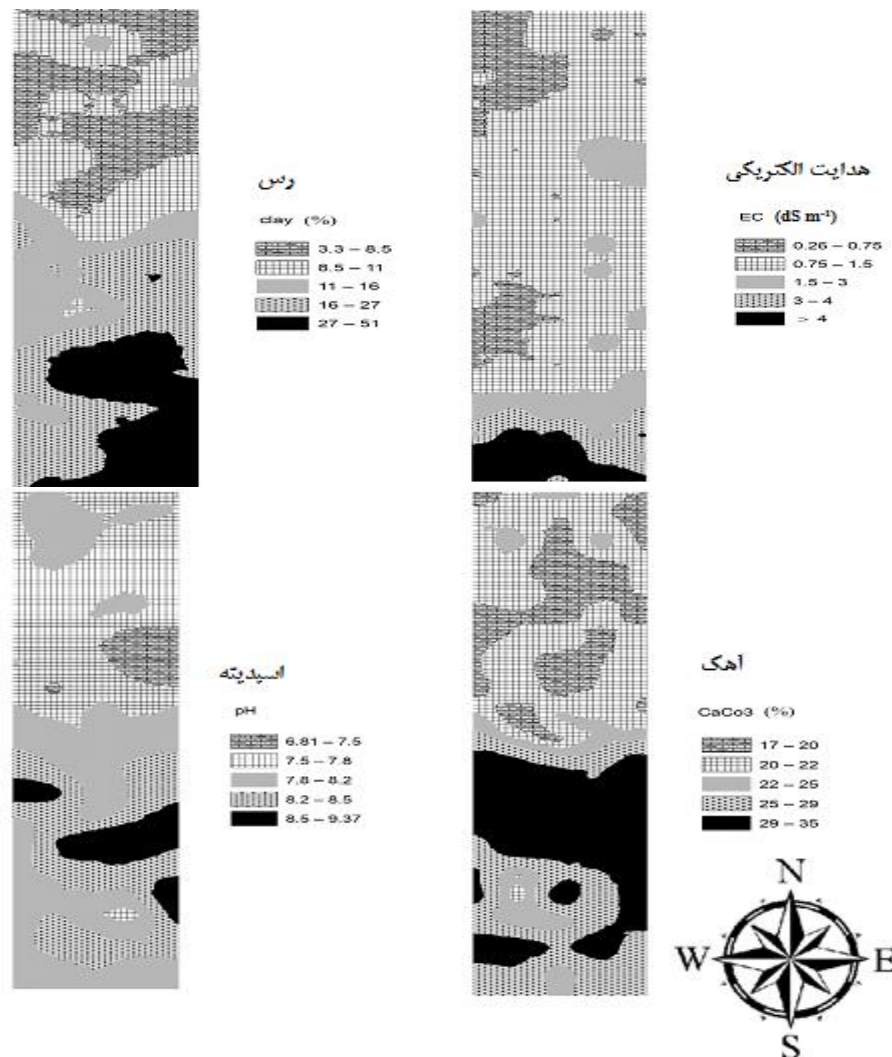
## نتیجه‌گیری

براساس نتایج CV در منطقه مورد مطالعه، تغییرپذیرترین متغیر SAR در کاربری بایر و کم‌تغییرپذیرترین متغیر اسیدیته در کاربری کشاورزی بود. بین MWD با SAR و EC همبستگی منفی و با



شکل ۴- نقشه‌های تغییرات مکانی شن، کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و نسبت جذبی سدیم در منطقه مورد مطالعه

Figure 4- Spatial variability maps of sand, OC, MWD and SAR in the studied area



شکل ۵- نقشه‌های تغییرات مکانی رس، هدایت الکتریکی، اسیدیته و آهک در منطقه مورد مطالعه

Figure 5- Spatial variability maps of clay, EC, pH and  $\text{CaCO}_3$  in the studied area

## منابع

- 1- Annabi M., Raclot D., Bahri H., Bailly G.S., Gomez C., and Bissonnais Y.L. 2017. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia. *Catena*, 153: 157-167.
- 2- Asghari Sh., Sheykhzadeh G.R., and Shahabi M. 2017. Geostatistical analysis of soil mechanical properties in Ardabil plain of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63 (12): 1631-1643.
- 3- Ardahanlioglu O., Oztas T., Evren S., Yilmaz H., and Yildirim Z. 2003. Spatial variability of exchangeable sodium, electrical conductivity, soil pH and boron content in salt- and sodium-affected areas of the Iğdir plain (Turkey). *Journal of Arid Environments*, 54: 495-503.
- 4- Cambardella C., Moorman T., Novak J., Parkin T., Karlen D., Turco R., and Konopka A. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501-1510.
- 5- Dai F., Zhou Q., Lv Z., Wang X., and Liu G. 2014. Spatial prediction of soil organic matter content integrating artificial neural network and ordinary kriging in Tibetan Plateau. *Ecological Indicator*, 45: 184-194.
- 6- Delbari M., and Jahani S. 2014. Investigation of soil salinity and sodicity properties in Chat region of Golestan province. *Iranian Journal of Soil Research*, 28(2): 432-446. (In Persian)
- 7- Douaik A., Van Meirvenne M., and Toth T. 2005. Soil salinity mapping using spatio-temporal kriging and Bayesian Maximum Entropy with interval soft data. *Geoderma*, 128: 234-248.
- 8- Foroughifar H., Jafarzadah A.A., TorabiGelsefidi H., Aliasgharzadah N., Toomanian N., and Davatgar, N. 2011. Spatial variations of surface soil physical and chemical properties on different landforms of Tabriz plain. *Water and*



- Soil Science- University of Tabriz, 21(3): 1-21. (In Persian with English abstract)
- 9- Goovaerts P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press. Oxford.
- 10- GS<sup>+</sup>5.1. 2001. Gamma Design software. Plainwell, MI, USA.
- 11- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. p. 255–293. In: Dane J. H., and Topp G. C. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- 12- Hamzeshpourea N., and Bogaert P. 2017. Improved spatiotemporal monitoring of soil salinity using filtered kriging with measurement errors: An application to the West Urmia Lake, Iran. *Geoderma*, 295: 22–33.
- 13- Hillel D. 2004. Environmental soil physics. New York, USA: Academic Press.
- 14- Isaaks H.E., and Srivastava R.M. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, NY.
- 15- Lin L.I. 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. *Bio-metrics*, 45: 255–268.
- 16- Mohammadi J., and Motaghian M.H. 2011. Spatial prediction of soil aggregate stability and aggregate-associated organic carbon content at the catchment scale using geostatistical techniques. *Pedosphere*, 21(3): 389–399.
- 17- Nabiollahia K., Taghizadeh-Mehrjardib R., Kerry R., and Moradiana S. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators*, 83: 482–494.
- 18- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539–579. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 19- Owji A.R., and Kamali A. 2015. The effect of irrigation management and soil texture on the pattern of soil salinity variability in pistachio orchards of Rafsanjan. *Irrigation & Water Engineering*, 3(10): 65-77. (In Persian with English abstract)
- 20- Page A.L. 1985. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods*. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 21- Ranjbar F., and Jalali M. 2016. The combination of geostatistics and geochemical simulation for the site-specific management of soil salinity and sodicity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121: 301–312.
- 22- Richards L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agricultural Handbook No. 60*. U.S. Salinity Laboratory Riverside, California.
- 23- Sheng J., Maa L., Jiang P., Li B., Huang F., and Wu, H. 2010. Digital soil mapping to enable classification of the salt-affected soils in desert agro-ecological zones. *Agricultural Water Management*, 97: 1944–1951.
- 24- Tajik F. 2004. Evaluation of aggregates stability in some regions of Iran. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 8(1): 107-122. (In Persian)
- 25- Webster R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advanced Soil Science*, 3: 1–70.
- 26- Wilding L.P., and Dress L.R. 1983. Spatial variability and pedology. p: 83-116. In: Wilding L.P., Smeckand N.E, and Hall GF, (EDs). *Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions*. Elsevier Science Pub.
- 27- Yazdani A., Mosaddeghi M.R., Khademi H., Ayoubi S., and Khayamim F. 2014. Relationship between surface aggregate stability and some soil and climate properties in Isfahan province. *Soil Management*, 3(2): 23-31. (In Persian)
- 28- Yoder R.E. 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy*, 28: 337-35.



## Geostatistical Assessment of Aggregates Stability and Sodium Adsorption Ratio in Salt-Affected Soils Around Urmia Lake

Sh. Asghari<sup>1\*</sup> - M. Shahabi<sup>2</sup>

Received: 07-05-2018

Accepted: 16-07-2018

**Introduction:** Salinity and sodicity are the most important land degradation problems particularly in arid and semi-arid regions. Due to the depletion of Urmia Lake located in the northwest of Iran during recent years, the proportion of surrounding saline agricultural lands increased at a past pace. In the salt-affected soils, aggregate stability is weak due to the high contents of sodium. The analysis of spatial variability of mean weight diameter of aggregates (MWD) and sodium adsorption ratio (SAR) is necessary to implement a site-specific soil management especially in the salt-affected soils. The main object of this study was evaluating the effects of different land uses (bare and agriculture) on the spatial variability of MWD and SAR in the salt-affected soils around Urmia Lake.

**Materials and Methods:** This study was conducted in the agricultural and bare lands of Shend Abad region located at the 15 km of Shabestar city, northwest of Iran (45° 36' 34" E and 38° 6' 37" N). Totally, 100 geo-referenced samples were taken from 0-10 cm soil depth with 100×100 m intervals (80 ha) in agricultural (n=49) and bare (n=51) land uses. Sand, silt, clay, organic carbon (OC), CaCO<sub>3</sub>, pH<sub>e</sub>, MWD, SAR and electrical conductivity (EC), were measured in the collected soil samples. The wet sieving method was used to determine MWD of wet aggregates. The sieves were: 2, 1, 0.5, 0.25 and 0.106mm. The EC and SAR were measured in 1:2.5 (soil: distilled water) extra. The SAR was calculated from concentrations of Na<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup>. The best fit semivariogram model (Gaussian, spherical and exponential) was chosen by considering the minimum residual sum of square (RSS) and maximum determination coefficient (R<sup>2</sup>). Ordinary kriging (OK) and inverse distance weighting (IDW) interpolation methods were used to analyze spatial variability of MWD and SAR. Spatial distribution maps of soil variables were provided by Arc GIS software. The accuracy of OK and IDW methods in estimating MWD and SAR was evaluated by mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and concordance correlation coefficient (CCC) criteria. The CCC indicates the degree to which pairs of the measured and estimated parameter value fall on the 45° line through the origin.

**Results and Discussion:** According to the results of coefficient of variation (CV) from the study area, the most variable (CV=113.05%) soil indicator was SAR (bare land use), whereas the least variable (CV= 3.52%) was pH<sub>e</sub> (agricultural land use). The Pearson correlation coefficients (*r* value) indicated that there are significant (*P* < 0.01) correlations between MWD with OC (*r*=0.58), sand (*r*=0.60), SAR (*r*=-0.57), EC (*r*=-0.56), CaCO<sub>3</sub> (*r*=-0.38) and clay (*r*=-0.48). Also, negative correlations (*P* < 0.01) were observed between SAR with sand (*r*=-0.61), OC (*r*=-0.38) but positive correlations (*P* < 0.01) were found between SAR with EC (*r*=0.61), pH<sub>e</sub> (*r*=0.56), CaCO<sub>3</sub> (*r*=0.40) and Clay (*r*=0.62). The spatial dependency classes of soil variables were determined according to the ratio of nugget variance to sill expressed in percentages: If the ratio was >25% and <75%, the variable was considered moderately spatially dependent; if the ratio was >75%, variable was considered weakly spatially dependent; and if the ratio was <25%, the variable was considered strongly spatially dependent. The strong and moderate spatial dependences with the effective ranges of 1903 and 1614m were found for SAR and MWD, respectively. The OC and EC variables had the least (660m) and the highest (1987m) effective range, respectively. The range of influence indicates the limit distance at which a sample point has influence over another points, that is, the maximum distance for correlation between two sampling point. The models of fitted semivariograms were Gaussian for both MWD and SAR. The best prediction according to CCC criterion was obtained by OK for SAR (0.382) and IDW (<sup>2</sup>) for MWD (0.325). The spatial maps showed that from agricultural to bare land use by nearing to Urmia Lake, the MWD decreased by decreasing OC and increasing EC and SAR.

**Conclusions:** Results showed that MWD negatively related to the SAR and EC and positively related to the OC and sand in the study area. The SAR correlated positively with EC and Clay and negatively with sand and

1- Associate Professor of Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

(\*- Corresponding Author Email: shokrollah.asghari@gmail.com)

2- Graduated Ph.D Student of Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

OC. The spatial dependency was found strong for SAR and the moderate for MWD. The soil OC showed the smallest effective range (660m) among the studied variables. As a suggestion, for subsequent study, soil sampling distance could be taken as 660m in order to save time and minimize cost.

**Keywords:** Agricultural lands, Mean weight diameter of aggregates, Saline and sodic soils, Spatial variability, Shabestar

## تاثیر همزیستی میکوریزی بر جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی

مرتضی پوزش شیرازی<sup>۱\*</sup> - حسن حقیقت نیا<sup>۲</sup> - رحیم خادمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

### چکیده

به منظور بررسی اثرات تلقیح چند گونه قارچ میکوریز آربوسکولار بر میزان کلنیزاسیون ریشه، غلظت عناصر غذایی برگ و کارایی مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش خشکی، پژوهشی گلخانه‌ای بصورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور در سه تکرار، طی یک دوره ۱۰۰ روزه در سال ۱۳۹۶ در مرکز تحقیقات کشاورزی بوشهر انجام گردید. فاکتور اول شامل تلقیح ریشه گیاه با چهار گونه قارچ میکوریز آربوسکولار (*Glomus intraradices*، *Glomus vrsersiform*، *Glomus caledonium* و *Glomus mosseae*) و نیز یک تیمار بدون تلقیح بعنوان شاهد و فاکتور دوم شامل سه سطح رطوبتی خاک بر اساس نقصان رطوبت یا تخلیه مجاز رطوبتی شامل  $I_1=25$ ،  $I_2=50$  و  $I_3=70$  درصد از آب قابل استفاده بود. نتایج نشان داد که هم اثرات اصلی و هم برهمکنش آنها (بجز برای غلظت نیتروژن برگ) بر همه صفات اندازه‌گیری شده در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. کاربرد مایه تلقیح قارچ‌های میکوریزی سبب بالا رفتن درصد کلنیزاسیون ریشه شد به گونه‌ای که از ۵/۳۳ درصد در تیمار شاهد به ۲۲/۰۷ درصد در تیمار مایه‌زنی شده با *گلوبوموس/ایترارادیسز* افزایش یافت. تلقیح با تمام گونه‌ها نسبت به شاهد سبب بهبود غلظت عناصر در برگ گردید. کارایی مصرف آب نیز با استفاده از قارچ *گلوبوموس/ایترارادیسز* در تیمارهای بدون تنش، تنش ملایم و شدید بترتیب ۶۷/۹، ۴۹/۶ و ۵۲/۱ درصد افزایش یافت. استفاده از قارچ‌های میکوریزی بویژه گونه‌های *گلوبوموس/ایترارادیسز* و *گلوبوموس کالدونیوم* سبب بیشترین افزایش عملکرد و کارایی مصرف آب شد که این موضوع در نتیجه افزایش مقاومت به تنش خشکی بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** بوشهر، تنش رطوبتی، عناصر پرمصرف و کم مصرف، قارچ میکوریز آربوسکولار، گلخانه.

### مقدمه

استان بوشهر یکی از استان‌هایی است که در منطقه نیمه خشک ایران واقع گردیده، ضمن اینکه در سال‌های اخیر با خشکسالی‌های متعددی نیز روبرو بوده است، لذا برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی، علاوه بر کمبود آب، سبب کاهش کیفیت و افزایش شوری آن نیز گردیده است. از این‌رو، تداوم تولید این محصول با ارزش نیازمند افزایش بهره‌وری مصرف آب به هر طریق ممکن است. استفاده از تلقیح ریشه گیاه با قارچ‌های میکوریزی یکی از روش‌های نوینی است که علاوه بر بهبود تغذیه گیاه، سبب مواجهه بهتر گیاه با شرایط نامساعد محیطی از جمله تنش خشکی می‌گردد.

در تحقیق صورت گرفته در چین مشاهده شد که نشاءهای گوجه‌فرنگی که تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرند دارای طول ساقه کوتاه‌تر و ریشه ضعیف‌تر می‌باشند. با افزایش خشکی و بالا رفتن pF خاک، میزان فتوسنتز خالص کاهش یافته لیکن مقدار آمینو اسیدها افزایش می‌یابد. این امر باعث زیاد شدن غلظت اسید در ماده زمینه‌ای است. آن‌ها بهترین pF را برای رشد نشاء گوجه‌فرنگی ۱/۹ تا ۲/۲

گیاه گوجه‌فرنگی یکی از مهم‌ترین سبزیجات مورد استفاده انسان می‌باشد. سطح زیرکشت این محصول در استان بوشهر نزدیک به دوازده هزار هکتار است که عمده تولید آن بصورت خارج از فصل بوده و بعلاوه درآمدزایی مناسب به عنوان یکی از مهم‌ترین محصولات اقتصادی استان برای زارعین به شمار می‌آید. متوسط بارش کشور در سال زراعی ۹۴-۹۳ برابر ۲۳۴/۷ میلیمتر بوده است که این اندازه بارندگی، ایران را در زمره مناطق خشک جهان قرار می‌دهد (۱۰).

۱- مربی پژوهشی بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران  
(Email: m.shirazi741@gmail.com)  
(\*) نویسنده مسئول:  
۲- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، داراب، ایران  
۳- مربی پژوهشی موسسه تحقیقات علوم باغبانی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان بوشهر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بوشهر، ایران  
DOI: 10.22067/jsw.v32i4.72731

تنش خشکی قرار گرفتند، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد ماده خشک اندام هوایی، تعداد گل و میوه به طور معنی داری در گیاهان میکوریزی بیشتر بود. همچنین عملکرد بطور متوسط به ترتیب در گیاهان تحت تنش های شدید، متوسط، ملایم و بدون تنش به میزان ۲۴/۷٪، ۲۳/۱٪، ۱۶/۲٪ و ۱۲/۳٪ نسبت به گیاهان غیرمیکوریزی افزایش داشت. بنابراین کارایی مصرف آب (WUE) در گیاهان میکوریزی نیز در همه سطوح تنش خشکی بالاتر از گیاهان غیر میکوریزی بود.

### مواد و روش ها

این طرح بصورت گلدانی در گلخانه مرکز تحقیقات کشاورزی استان بوشهر با مختصات جغرافیایی ۱۳° و ۵۱° طول شرقی و ۱۶° و ۲۹° عرض شمالی و با ارتفاع ۱۱۰ متر از سطح دریا، حداکثر درجه حرارت ۵۱° درجه و حداقل ۱- درجه سلسیوس، میانگین بارندگی ۲۵۰ میلیمتر و میانگین دمای سالیانه ۲۵/۳ درجه سلسیوس و تبخیر سالیانه حدود ۳۰۰۰ میلیمتر در خاکی با بافت متوسط (شنی لومی) اجراء گردید.

به منظور کاهش اسپورهای طبیعی قارچ میکوریز و ضد عفونی نسبی، این خاک به مدت چند ماه در مقابل اشعه خورشید قرار گرفت. سپس برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک انتخاب شده، مورد اندازه گیری قرار گرفتند. ویژگی های مهم فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله pH در گل اشباع به وسیله الکتروود شیشه ای، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با دستگاه هدایت سنج، درصد کربن آلی (۳۲)، فسفر محلول در بیکربنات سدیم (۲۴)، بافت خاک توسط روش هیدرومتر (۸) و پتاسیم قابل تبادل توسط روش استات آمونیوم یک نرمال (۱۸) و عناصر کم مصرف قابل استخراج با DTPA (۱۹) تعیین گردید. همچنین رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی (F.C) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) با دستگاه صفحه فشاری (pressure plate) تعیین گردید که نتایج آن در جدول (۱) آمده است.

آزمایش حاضر بصورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی با دو فاکتور و در سه تکرار اجراء گردید. فاکتور اول در پنج سطح یعنی تلقیح با چهار گونه قارچ میکوریز آربوسکولار شامل *Glomus* واریته های مقاوم به خشکی بوده است (۲).

میزان کود مصرفی برای تمام تیمارها ثابت و بر اساس آزمون خاک تعیین شد که مقدار این عناصر عبارت بودند از: نیتروژن و

گزارش نمودند (۵). بر اساس تحقیقات صورت گرفته در نقاط مختلف، حداکثر تخلیه مجاز یا حداکثر کمبود مجاز برای گیاه گوجه فرنگی حدود ۵۰ درصد از کل آب قابل استفاده در خاک بیان گردیده است (۱).

همزیستی میکوریزی به دلیل فعال و متنوع بودن برای افزایش پایداری سیستم کشاورزی همواره مورد توجه بوده است. در شرایط کم آبی هیف های قارچ میکوریز آربوسکولار باعث افزایش جذب آب و هدایت هیدرولیکی ریشه ها شده و تنظیم اسمزی و تغییرات در کنترل روزنه ای و خاصیت ارتجاعی دیواره سلولی را کنترل می نمایند (۲). تنش کم آبی تعداد تارهای کشنده ریشه را کاهش می دهد و بر مورفولوژی ریشه و انشعابات ریشه صدمه وارد می نماید که در نتیجه آن جذب عناصر غذایی بوسیله سیستم ریشه ای کاهش می یابد. در این زمان، هیف های قارچ میکوریز آربوسکولار می تواند جانشین سیستم های ریشه شده و عناصر غذایی را جذب نمایند. نقش همزیستی میکوریزی در شرایط تنش کم آبی در جذب عناصر غذایی مهم تر از نقش آن در شرایط بدون تنش آبی است (۳۳).

در سال های اخیر از قارچ های میکوریز آربوسکولار برای مقابله با تنش های کم آبی در بسیاری از گیاهان استفاده شده است (۲۹). همزیستی میکوریزی از طریق اجتناب از خشکی، افزایش جذب عناصر فسفر و سایر عناصر ضروری برای رشد و توسعه گیاه، آن ها را در مقابل تنش حفظ می کند (۳).

مکانیسم های ممکن برای اصلاح مقاومت به خشکی در گیاهان میکوریزی می تواند شامل افزایش هدایت هیدرولیکی ریشه، تغییرات در کنترل روزنه ای (که این امر ممکن است تحت تأثیر سطوح آبسازیک اسید در شیره خام آوند چوبی صورت گیرد) (۱۴)، افزایش جذب آب ناشی از ریشه های خارجی زیاد (۱۶)، تنظیم اسمزی که حتی در پتانسیل های پایین آب بافت، ابقاء فشار تورژانس را تحریک می کند (۴)، باشد. استفاده از گونه های مختلف قارچ میکوریز آربوسکولار در کشت گیاه گندم و در سطوح تنش رطوبتی منجر به افزایش عملکرد و جذب عناصر فسفر، روی و مس گردیده است (۲۷). واریته های گندم حساس به خشکی تحت شرایط تنش رطوبتی وابستگی بیشتری به رابطه همزیستی میکوریزی داشته و جذب نسبی عناصر غذایی فسفر، روی، مس، منگنز و آهن در آنها، بیشتر از واریته های مقاوم به خشکی بوده است (۲).

تلقیح با گونه های بومی قارچ میکوریز آربوسکولار تأثیر مثبتی بر رشد و مقاومت به خشکی در نهال های چهار گونه لگوم درختی داشته است. رابطه همزیستی سبب گردیده که در این گیاهان پتانسیل شیره خام و همچنین میزان نسبی آب موجود در برگ ها افزایش یابد (۲۵).

طی یک آزمایش مزرعه ای که توسط ساب راما نیان و همکاران (۳۰) صورت گرفت، اثرات تلقیح با *Glomus intraradices* بر رشد، عملکرد کمی و کیفی گوجه فرنگی که در معرض شدت های مختلف

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش  
Table 1- Some physical and chemical properties of soil used in experiment

| EC              | pH      | CCE*               | O.C      | F.C         | PWP          | Ca    | Mg     | P                       | K      | Mn    | Cu    | Zn   | Fe  |
|-----------------|---------|--------------------|----------|-------------|--------------|-------|--------|-------------------------|--------|-------|-------|------|-----|
| هدایت الکتریکی  | اسیدیته | کربنات کلسیم معادل | کربن آلی | ظرفیت زراعی | پژمردگی دائم | کلسیم | منیزیم | فسفر                    | پتاسیم | منگنز | منگنز | روی  | آهن |
| دسی‌زیمنس-برمتر | 1:5     |                    | درصد     | %           |              |       |        | میلی گرم بر کیلوگرم خاک |        | mg/kg |       |      |     |
| 3.50            | 7.9     | 57                 | 0.43     | 16.4        | 6.5          | 580   | 275    | 8                       | 200    | 5.1   | 0.57  | 0.54 | 2.8 |

\*CCE= Calcium Carbonate Equivalent

نمونه برگ خشک شده در آون، یک نمونه یک گرمی از هر تیمار در کوره الکتریکی در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد خاکستر شده و سپس در ۵ میلی لیتر اسید کلریدریک دو نرمال حل و پس از عبور دادن از کاغذ صافی با اضافه نمودن آب مقطر، به حجم ۵۰ میلی لیتر رسانده و با دستگاه جذب اتمی مدل سولار عناصر آهن، مس، منگنز، روی و نیز با دستگاه اسپکتروفتومتر مدل فارماکسیا قرائت شد. غلظت فسفر با استفاده از روش رنگ سنجی (۲۳) تعیین و پتاسیم نمونه‌ها با دستگاه فلیم فتومتر مدل کورنینگ ۴۰۵ با روش شعله سنجی تعیین شد.

در نهایت با استفاده از نرم افزار SAS تجزیه‌های آماری و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه ای دانکن صورت گرفت و نتایج مورد بحث قرار گرفت.

## نتایج

### تأثیر سطوح تنش خشکی و گونه‌های قارچ بر غلظت برخی عناصر پر مصرف و کم مصرف

نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارها بر غلظت عناصر غذایی برگ نشان داد که تأثیر قارچ، تنش خشکی و برهمکنش آنها بر همه صفات موجود در جدول شماره ۲ در سطح یک درصد معنی‌دار است. تنها برهمکنش تیمار آبیاری با قارچ بر میزان غلظت نیتروژن در برگ گوجه فرنگی معنی دار نگردید.

در ذیل نتایج مقایسه میانگین تأثیر تنش خشکی، استفاده از قارچ های میکوریزی و برهمکنش آنها بر عناصر غذایی برگ گیاه گوجه فرنگی مورد بررسی قرار گرفت که اطلاعات مربوط به هر کدام از عناصر در جدول ۳ آمده است.

### الف) عناصر پر مصرف

مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار میزان نیتروژن در گیاه گوجه‌فرنگی گردید، به طوری که کمترین غلظت نیتروژن مربوط به تیمار تنش شدید رطوبتی و بیش‌ترین آن به تیمار بدون تنش اختصاص داشت.

پتاسیم به ترتیب به میزان ۵۰ و ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم خاک از منابع اوره و سولفات پتاسیم و نیز آهن، منگنز و روی به ترتیب به میزان ۱۰، ۵ و ۵ میلی گرم در کیلوگرم خاک از منابع کلات آهن و سولفات های منگنز و روی داده شد.

پس از اضافه نمودن کودهای مورد نیاز به خاک هر گلدان به وزن ۱۰ کیلوگرم، همزمان با کاشت نشاهای گوجه‌فرنگی رقم کالجی بر اساس دستورالعمل توصیه شده، عمل تلقیح قارچ‌های میکوریزی مطابق تیمارها نیز صورت گرفت. بدین صورت که میزان ۱۰۰ گرم مایه تلقیح توصیه شده از موسسه تحقیقات خاک و آب به خاک هر گلدان در مجاورت ریشه گیاه اضافه گردید.

جهت تعیین زمان آبیاری از ۳ تانسیموتر بارومتری با انتهای گچی در گلدان‌های مربوط به سه تیمار مختلف آبیاری استفاده گردید. میزان آب مصرفی نیز با توجه به تیمارهای مورد نظر (بر اساس نقصان رطوبت تا ۲۵، ۵۰ و ۷۰ درصد از آب قابل استفاده) و بر اساس روش جرمی محاسبه و به گیاهان موجود در گلدان‌ها داده شد. با توجه به آنکه حجم آب مصرفی در هر نوبت آبیاری، مقدار کمی را شامل می شد از بشر پلاستیکی با درجه بندی مشخص استفاده گردید.

کل آب مصرفی در سه تیمار یاد شده به ترتیب ۲۲/۳، ۲۰/۱ و ۱۷/۷ لیتر برای هر گلدان با وزن خاک ۱۰ کیلوگرم و طی ۳۵، ۲۴ و ۱۴ مرتبه آبیاری در طول مدت ۱۰۰ روز مصرف گردید. جهت کالیبره کردن عدد تانسیموتر با درصدهای مختلف رطوبت خاک، پس از حصول اطمینان از سالم بودن تانسیموترها، آنها را در گلدان‌هایی جداگانه قرار داده و درصد رطوبت خاک در طول چند روز به روش وزنی محاسبه گردیده و با عدد تانسیموتر تطابق داده شد.

کلیه مراقبت های لازم مانند سم پاشی جهت مبارزه با آفات برگ‌خوار صورت گرفت. در پایان اجرای طرح، گلدان‌ها در ظروف آب بزرگ وارد شده و پس از خیس خوردن کامل خاک (در حدود ۳ دقیقه) با دقت خاک اطراف ریشه‌ها جدا گردیده و ریشه‌ها تمیز شدند. درصد کلنیزاسیون ریشه‌ها با قارچ پس از رنگ‌آمیزی آنها با Try pan blue با روش Grid line intersect method (۲۶) تعیین شد. همچنین به منظور تعیین عناصر غذایی گیاه، پس از آسیاب نمودن

جدول ۲- تجزیه واریانس غلظت عناصر غذایی در برگ گیاه گوجه فرنگی  
Table 2- Analysis of variance of nutrient concentration in leaf tomato plant

| منابع تغییر<br>(Sources of var.)            | درجه<br>آزادی<br>d.f | میانگین مربعات<br>(Mean square) |           |             |           |          |             |           |
|---------------------------------------------|----------------------|---------------------------------|-----------|-------------|-----------|----------|-------------|-----------|
|                                             |                      | N<br>نیتروژن                    | P<br>فسفر | K<br>پتاسیم | Fe<br>آهن | Cu<br>مس | Mn<br>منگنز | Zn<br>روی |
| سطوح تنش خشکی<br>(Drought stress)           | 2                    | 0.864**                         | 0.018**   | 0.285**     | 2878**    | 2.615**  | 354.3**     | 278.1**   |
| قارچ میکوریزا<br>(Mycorrhizal fungi)        | 4                    | 0.456**                         | 0.032**   | 1.295**     | 14580**   | 9.412**  | 467.6**     | 282.7**   |
| برهمکنش<br>(Interaction )                   | 8                    | 0.084**                         | 0.003**   | 0.067**     | 809**     | 1.842**  | 85.5**      | 318.7**   |
| خطای آزمایش<br>Experimental fault           | 30                   | 0.028                           | 0.001     | 0.014       | 101.58    | 0.057    | 6.64        | 5.68      |
| ضریب تغییرات (%)<br>Coefficient of var. (%) |                      | 6.78                            | 5.65      | 3.66        | 7.12      | 2.87     | 4.25        | 4.36      |

ns = not significant \*\* significant at 1%

\*\* در سطح ۱٪ معنی دار است ns معنی دار نیست

شدید رطوبتی مجدداً میزان پتاسیم کاهش یافته است. تلقیح ریشه‌ها با گونه‌های مختلف قارچ نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان داد. بین گونه‌های گلوموس کالدونیوم، موسه/ و ورسیفورم اختلاف معنی‌داری از نظر میزان پتاسیم مشاهده نگردید. برترین تیمارها از نظر آماری مربوط به برهمکنش تیمار تنش ملایم رطوبتی همراه با تلقیح با گونه‌های گلوموس/ایتترارادیسز و گلوموس کالدونیوم بود.

#### ب) عناصر کم مصرف

مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون دانکن نشان داد که تنش رطوبتی در هر دو سطح سبب کاهش معنی‌دار میزان آهن در گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار بدون تنش گردیده است، بطوری که میزان آهن از ۱۷۳/۲ به ۱۱۰/۹ میکرو گرم در گرم وزن خشک برگ در سطح تنش شدید کاهش یافته است. تلقیح ریشه‌ها با گونه‌های مختلف قارچ نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را از نظر میزان آهن برگ نشان داد. بیشترین آهن برگ مربوط به تلقیح ریشه‌ها با گونه کالدونیوم و پس از آن به گونه‌های موسه/ و ایتترارادیسز اختصاص داشت. میزان آهن در گونه گلوموس کالدونیوم ۴۱ درصد بالاتر از شاهد بود. برهمکنش دو فاکتور نشان داد بیشترین غلظت آهن برگ مربوط به تیمار بدون تنش رطوبتی مایه زنی شده با گونه گلوموس کالدونیوم بود. کمترین میزان آهن برگ به تیمار دارای تنش شدید رطوبتی و بدون مایه زنی با قارچ اختصاص داشت.

نتایج نشان داد که تنش‌های ملایم و شدید رطوبتی هر دو سبب افزایش معنی‌دار میزان مس در گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار بدون تنش گردیده است، بطوری که میزان مس از ۷/۴۳ به ۸/۹۵ میکروگرم در گرم وزن خشک برگ افزایش یافته است. تاثیر تلقیح

البته بین تیمارهای تنش ملایم و شدید اختلاف معنی‌دار نبود. تلقیح ریشه‌ها با تمام گونه‌های قارچ میکوریز نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان داد. بین دو گونه گلوموس ورسیفورم و گلوموس/ایتترارادیسز نیز اختلاف معنی‌دار نبود. برهمکنش تیمار بدون تنش رطوبتی همراه با تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ بجز گلوموس کالدونیوم و شاهد در یک سطح آماری قرار داشته و بالاترین مقدار نیتروژن را شامل گردید. کمترین میزان نیتروژن به برهمکنش تنش شدید رطوبتی و شاهد قارچ اختصاص داشت.

تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار میزان فسفر در گیاه گوجه‌فرنگی گردیده است. کمترین میزان فسفر مربوط به تیمار تنش شدید رطوبتی و بیشترین آن به تیمار بدون تنش اختصاص داشت. تلقیح ریشه‌ها با همه گونه‌های قارچ میکوریز نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان داد. بین سه گونه ایتترارادیسز، ورسیفورم و موسه/ نیز اختلاف معنی‌دار نبود. گونه گلوموس/ایتترارادیسز نسبت به تیمار شاهد بدون قارچ توانست فسفر را به میزان ۳۱/۴ درصد افزایش دهد. در سطح بدون تنش بین گونه‌های قارچ میکوریزی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت ولی همگی با شاهد اختلاف معنی‌داری داشتند. در تنش ملایم غیر از گونه گلوموس ورسیفورم بقیه با شاهد اختلاف معنی‌داری را نشان دادند و در تنش شدید رطوبتی بین هیچ کدام از تیمارهای کاربرد قارچ با شاهد اختلاف معنی‌داری ملاحظه نشد. در بین همه تیمارها بالاترین میزان فسفر برگ مربوط به گونه‌های گلوموس/ایتترارادیسز و گلوموس کالدونیوم در تیمار بدون تنش بود.

تحت شرایط تنش ملایم رطوبتی نسبت به شاهد میزان پتاسیم در گیاه گوجه‌فرنگی افزایش معنی‌داری یافت اما در شرایط تنش

ریشه‌ها با گونه‌های مختلف قارچ موجب افزایش میزان مس در برگ شد. بیشترین میزان مس برگ به تلقیح ریشه‌ها با گونه موسه/ و پس از آن به گونه‌های گلوموس و رسیفورم و گلوموس/ اینترادیسز اختصاص داشت. میزان مس در گونه گلوموس موسه/ ۱۹/۲ درصد بالاتر از شاهد بود. برهمکنش دو فاکتور نشان داد که بیشترین میزان مس در برگ گوجه‌فرنگی مربوط به برهمکنش تنش شدید رطوبتی همراه با تلقیح با گونه موسه/ بود و کمترین میزان مس برگ به برهمکنش تیمار بدون تنش رطوبتی و شاهد اختصاص داشت.

جدول ۳- مقایسه میانگین گونه‌های مختلف قارچ میکوریز آربسکولار و سطوح تنش خشکی بر غلظت عناصر غذایی برگ.

Table 3- Mean comparison of arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress levels on leaf nutrients concentration

| تیمار آبیاری<br>(Irrigation )<br>(treatments) | شاهد<br>(control) | <i>Glomus<br/>caledonium</i> | <i>Glomus<br/>intraradices</i> | <i>Glomus<br/>versiform</i> | <i>Glomus<br/>mosseae</i> | میانگین<br>(Mean) |
|-----------------------------------------------|-------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------|
| غلظت نیتروژن % (N concentration %)            |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 2.67 A                                        | 2.04 gh           | 2.3 efg                      | 3.04 ab                        | 3.1 cde                     | 2.86 abc                  | I <sub>1</sub>    |
| 2.44 B                                        | 2.12 fgh          | 2.2 fgh                      | 2.79 bcd                       | 2.59 cde                    | 2.52 de                   | I <sub>2</sub>    |
| 2.33 B                                        | 1.98 h            | 2.32 efg                     | 2.52 de                        | 2.4 ef                      | 2.41 ef                   | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 2.05 D            | 2.27 C                       | 2.78 A                         | 2.69 AB                     | 2.59 B                    | Mean              |
| غلظت فسفر % (P concentration %)               |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 0.48 A                                        | 0.37 b            | 0.51 a                       | 0.52 a                         | 0.52 a                      | 0.48 a                    | I <sub>1</sub>    |
| 0.44 B                                        | 0.36 b            | 0.47 a                       | 0.50 a                         | 0.40 b                      | 0.47 a                    | I <sub>2</sub>    |
| 0.39 A                                        | 0.35 b            | 0.38 b                       | 0.40 b                         | 0.40 b                      | 0.41 b                    | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 0.36 C            | 0.453 AB                     | 0.473 A                        | 0.44 B                      | 0.453 AB                  | Mean              |
| غلظت پتاسیم % (K concentration %)             |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 3.12 B                                        | 3.0 de            | 3.11 cde                     | 3.16 cd                        | 3.14 cd                     | 3.19 cd                   | I <sub>1</sub>    |
| 3.58 A                                        | 3.32 bc           | 3.75 a                       | 3.90 a                         | 3.44 b                      | 3.47 b                    | I <sub>2</sub>    |
| 3.03 C                                        | 2.76 f            | 2.91 ef                      | 3.47 b                         | 2.91 ef                     | 3.1 cde                   | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 3.027 C           | 3.257 B                      | 3.513 A                        | 3.163 B                     | 3.253 B                   | Mean              |
| غلظت آهن % (Fe concentration %)               |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 173.2 A                                       | 153.8 cd          | 209.2 a                      | 180.9 b                        | 156.1 cd                    | 166.2 bc                  | I <sub>1</sub>    |
| 140.4 B                                       | 108.5 gh          | 175.7 b                      | 126.5 f                        | 144.6 de                    | 146.9 de                  | I <sub>2</sub>    |
| 110.9 C                                       | 87.7 i            | 108.8 gh                     | 123.3 fg                       | 99.7 hi                     | 135.1 ef                  | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 116.7 D           | 164.6 A                      | 143.6 B                        | 133.5 C                     | 149.4 B                   | Mean              |
| غلظت مس % (Cu concentration %)                |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 7.43 C                                        | 7.04 i            | 7.46 hi                      | 7.18 hi                        | 8.3 def                     | 7.15 hi                   | I <sub>1</sub>    |
| 8.55 B                                        | 7.57 gh           | 8.8 c                        | 8.65 cde                       | 8.71 cd                     | 9.03 c                    | I <sub>2</sub>    |
| 8.95 A                                        | 7.91 fg           | 8.1 f                        | 9.86 b                         | 8.24 ef                     | 10.66 a                   | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 7.50 D            | 8.12 C                       | 8.56 B                         | 8.42 B                      | 8.95 A                    | Mean              |
| غلظت منگنز % (Mn concentration %)             |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 54.25 B                                       | 52.93 fg          | 59.17 cde                    | 56.24 ef                       | 52.67 fg                    | 50.26 g                   | I <sub>1</sub>    |
| 63.80 A                                       | 52.52 fg          | 63.47 c                      | 74.50 a                        | 58.65 de                    | 69.86 b                   | I <sub>2</sub>    |
| 64.04 A                                       | 50.52 g           | 63.34 c                      | 75.80 a                        | 61.95 cd                    | 68.61 b                   | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 51.99 D           | 61.99 B                      | 68.85 A                        | 57.76 C                     | 62.91 B                   | Mean              |
| غلظت روی % (Zn concentration %)               |                   |                              |                                |                             |                           |                   |
| 50.27 C                                       | 47.67 gh          | 53.0 def                     | 49.67 fgh                      | 49.33 fgh                   | 51.67 fg                  | I <sub>1</sub>    |
| 58.95 A                                       | 45.20 h           | 60.44 bc                     | 86.90 a                        | 52.69 ef                    | 49.52 fgh                 | I <sub>2</sub>    |
| 54.68 B                                       | 48.50 fgh         | 56.44 cde                    | 50.50 fg                       | 60.82 b                     | 57.15 bcd                 | I <sub>3</sub>    |
|                                               | 47.12 D           | 56.63 B                      | 62.36 A                        | 54.28 C                     | 52.78 C                   | Mean              |

\* میانگین‌هایی که در هر ردیف و ستون دارای حرف مشترک هستند، در سطح ۵٪ با آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند

Means followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.05) by Duncan test.

در تیمار شاهد به ۶۴/۰۴ میکروگرم در گرم وزن خشک برگ در تیمار تنش شدید رطوبتی افزایش یافت. تلقیح ریشه‌ها با گونه‌های مختلف قارچ نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را از نظر میزان منگنز برگ نشان داد. بیشترین منگنز برگ مربوط به تلقیح ریشه‌ها با گونه

مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که تنش رطوبتی در هر دو سطح سبب افزایش معنی‌دار غلظت منگنز در گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار بدون تنش گردیده است ولی بین دو سطح تنش اختلاف معنی‌دار نبود، بطوری که میزان منگنز از ۵۴/۲۵



### تأثیر سطوح تنش خشکی و تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ بر میزان کلنیزاسیون ریشه

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۴) نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی و تلقیح با قارچ میکوریز آربسکولار و نیز برهمکنش آن‌ها بر میزان کلنی‌سازی ریشه گوجه فرنگی در سطح ۱٪ معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن (نمودار ۱) نشان داد که تنش خشکی سبب کاهش معنی‌دار میزان کلنیزاسیون ریشه گوجه‌فرنگی شد، بطوری که کمترین کلنی‌سازی ریشه مربوط به تیمار ۷۵٪ تخلیه رطوبتی (تنش شدید) بود و بیشترین میزان کلنیزاسیون به تیمار بدون تنش یعنی ۲۵٪ تخلیه رطوبتی اختصاص داشت. تلقیح ریشه‌ها با هر چهار گونه قارچ سبب افزایش کلنیزاسیون ریشه شد اما بین گونه‌های گلوموس موسه/ و گلوموس ورسیفورم اختلاف معنی‌دار نبود و به- ترتیب این دو گونه در بالاترین گروه آماری قرار گرفتند، هرچند بین گونه گلوموس ورسیفورم و گلوموس/ اینتر/ادیسز اختلاف معنی‌دار وجود نداشت (نمودار ۲).

برترین تیمار مربوط به برهمکنش مایه‌زنی ریشه با قارچ گلوموس/ اینتر/ادیسز تحت شرایط بدون تنش بود (جدول ۵). در شرایط تنش ملایم و شدید نیز بالاترین درصد کلنیزاسیون ریشه مربوط به تیمار مایه‌زنی ریشه‌ها با گونه گلوموس/ اینتر/ادیسز بود.

گلوموس/ اینتر/ادیسز و پس از آن به گونه‌های گلوموس موسه/ و گلوموس کالدونیوم اختصاص داشت. میزان مگنز در گونه موسه/ ۳۲/۴ درصد بالاتر از شاهد بود. برترین تیمارها از نظر آماری مربوط به برهمکنش تیمار تنش ملایم و شدید رطوبتی همراه با مایه‌زنی با گونه گلوموس/ اینتر/ادیسز بود. کمترین میزان مگنز برگ به برهمکنش تیمار تنش شدید و شاهد قارچ اختصاص داشت. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که سطوح ملایم و شدید تنش رطوبتی سبب افزایش معنی‌دار میزان روی در گیاه گوجه‌فرنگی نسبت به تیمار بدون تنش گردیده است و بین دو سطح تنش نیز اختلاف معنی‌دار بود. تلقیح ریشه‌ها با گونه‌های مختلف قارچ نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری را از نظر میزان روی برگ نشان داد. بیشترین روی برگ مربوط به تلقیح ریشه‌ها با گونه گلوموس موسه/ و پس از آن به گونه گلوموس کالدونیوم اختصاص داشت. میزان روی در گونه موسه/ ۳۲/۴ درصد بالاتر از شاهد بود. برترین تیمار از نظر آماری مربوط به برهمکنش تیمار تنش ملایم رطوبتی همراه با مایه‌زنی با گونه گلوموس موسه/ بود. کمترین میزان روی برگ به برهمکنش تیمار تنش ملایم و شاهد قارچ اختصاص داشت. بطوری که میزان روی در تیمار اخیر حدود ۴۸ درصد کمتر از برترین تیمار بود.

جدول ۴- تجزیه واریانس تأثیر سطوح تنش خشکی و سطوح مختلف قارچ میکوریزا بر میزان کلنی‌سازی ریشه  
Table 4- Analysis of variance of drought stress and mycorrhizal fungi treatments on root colonization

| منابع تغییر                            | درجه آزادی          | میانگین مربعات (Mean square) | کلونی‌سازی ریشه (Root colonization) |
|----------------------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| (Sources of var.)                      | (Degree of freedom) |                              |                                     |
| (drought stress) تنش خشکی              | 2                   | 391.1**                      |                                     |
| (mycorrhizal fungi) قارچ میکوریزا      | 4                   | 714.6**                      |                                     |
| (Interaction) برهمکنش                  | 8                   | 21.7**                       |                                     |
| (Experimental fault) خطای آزمایش       | 30                  | 1.704                        |                                     |
| (coefficient of var.) ضریب تغییرات (%) |                     | 7.76                         |                                     |

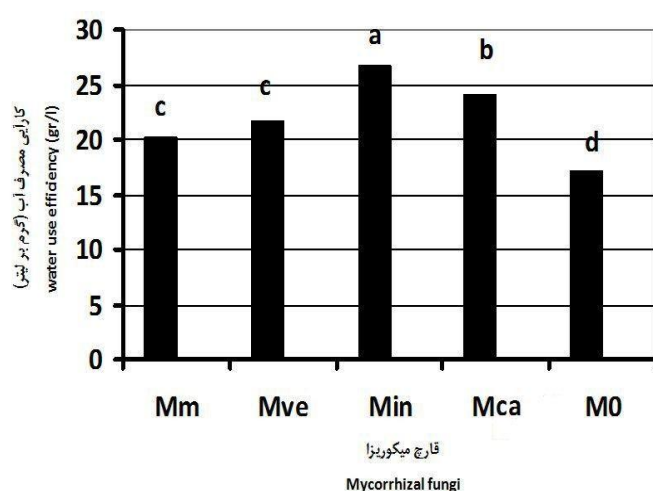
\*\* significant at 1%

\* \* در سطح ۱٪ معنی‌دار است.

جدول ۵- مقایسه میانگین برهمکنش گونه‌های مختلف قارچ میکوریز آربسکولار و تیمارهای آبیاری بر درصد کلنیزاسیون ریشه  
on root colonization. Table 5- Mean comparison of arbuscular mycorrhizal fungi and water treatments

| تیمار آبیاری (Irrigation) treatment | <i>Glomus caledonium</i> | <i>Glomus intraradices</i> | <i>Glomus versiform</i> | <i>Glomus mosseae</i> | شاهد (control) |
|-------------------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------|
| I <sub>1</sub>                      | 26.4 b                   | 30.7 a                     | 27.5 b                  | 28.6 b                | 2.04 gh        |
| I <sub>2</sub>                      | 16.9 d                   | 20.8 c                     | 17.2 d                  | 19.1 cd               | 5.7 g          |
| I <sub>3</sub>                      | 10.9 f                   | 14.7 e                     | 12.1 e                  | 11.4 f                | 2.9 h          |

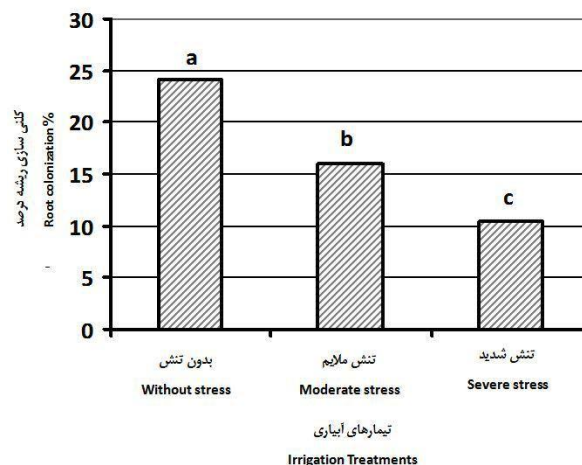
\* میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک هستند، در سطح ۵٪ با آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند  
Means followed by the same letter are not significantly different (P<0.05) by Duncan test.



نمودار ۲- تأثیر تلقیح با قارچ میکوریزا بر درصد کلنیزاسیون ریشه

Figure 2- Effect of mycorrhizal fungi on root colonization

Mm=Glomus mosseae, Mve=Glomus versiform, Min=Glomus intraradices, Mca=Glomus caledonium, M0=Control



نمودار ۱- تأثیر تیمارهای آبیاری بر درصد کلنیزاسیون ریشه

Figure 1- Effects of water treatments on root colonization

Mm=Glomus mosseae, Mve=Glomus versiform, Min=Glomus intraradices, Mca=Glomus caledonium, M0=Control

جدول ۶- تجزیه واریانس تأثیر سطوح تنش خشکی و سطوح مختلف قارچ میکوریزا بر کارایی مصرف آب  
Table 6- Analysis of variance of drought stress and mycorrhizal fungi treatments on water use efficiency

| منابع تغییر                       | درجه آزادی          | میانگین مربعات (Mean square) |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|
| (Sources of var.)                 | (Degree of freedom) | کارایی مصرف آب WUE           |
| (drought stress) تنش خشکی         | 2                   | 121.8 **                     |
| (mycorrhizal fungi) قارچ میکوریزا | 4                   | 16.39 **                     |
| (Interaction) برهمکنش             | 8                   | 4.1 **                       |
| (Experiemental fault) خطای آزمایش | 30                  | 3.06                         |

\*\*significant at 1%

\*\* در سطح ۱٪ معنی دار است

شدن تنش، کارایی مصرف آب نیز در گیاه گوجه فرنگی کاهش یافت (نمودار ۳). تلقیح ریشه‌ها با هر چهار گونه قارچ نسبت به تیمار بدون تلقیح سبب افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب شد و در این بین، گونه کالدونیوم بیشترین تأثیر را بر افزایش کارایی مصرف آب داشت (نمودار ۴). در بین کلیه تیمارها، برترین تیمار به برهمکنش مایه‌زنی ریشه با قارچ گلوموس کالدونیوم تحت شرایط بدون تنش اختصاص داشت (جدول ۷).

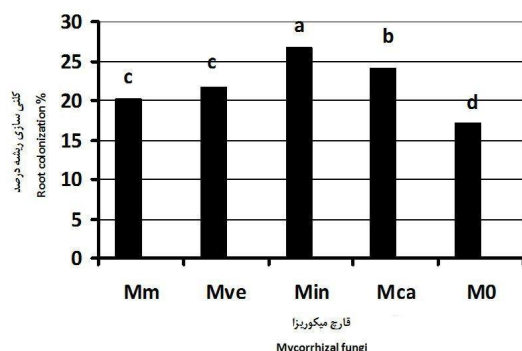
تأثیر سطوح تنش خشکی و تلقیح با گونه‌های مختلف قارچ بر کارایی مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد که اثرات اصلی تنش خشکی و تلقیح با قارچ میکوریزا و نیز برهمکنش آن‌ها بر کارایی مصرف آب گوجه‌فرنگی در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن نشان داد که تنش ملایم خشکی سبب افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب شد اما با بیشتر

جدول ۷- مقایسه میانگین برهمکنش گونه‌های مختلف قارچ میکوریزا آربسکولار و تیمارهای آبیاری بر کارایی مصرف آب  
on water use efficiency. Table 7- Mean comparison of arbuscular mycorrhizal fungi and water treatments

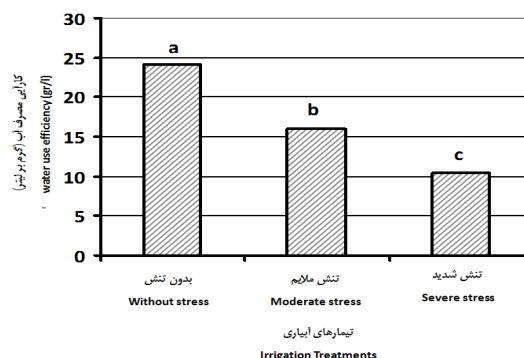
| تیمار آبیاری (Irrigation) treatment | Glomus caledonium | Glomus intraradices | Glomus versiform | Glomus mosseae | شاهد (control) |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------|------------------|----------------|----------------|
| I <sub>1</sub>                      | 25.15 abc         | 28.33 a             | 21.29 def        | 19.01 efgh     | 16.87 gh       |
| I <sub>2</sub>                      | 25.22 abc         | 26.62 ab            | 23.72 bcd        | 21.37 de       | 17.80 fgg      |
| I <sub>3</sub>                      | 22.06 cde         | 25.21 abc           | 20.09 efg        | 20.41 def      | 16.57 h        |

\* میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حرف مشترک هستند، در سطح ۵٪ با آزمون دانکن دارای اختلاف معنی‌دار نمی‌باشند  
Means followed by the same letter are not significantly differentns (P<0.05) by Duncan test.



نمودار ۴- تاثیر تلقیح با قارچ میکوریزا بر کارایی مصرف آب  
Figure 4- Effects of mycorrhizal fungi inoculation on root colonization

Mm=Glomus mosseae, Mve=Glomus versiform, Min=Glomus intraradices, Mca=Glomus caledonium, M0=Control



نمودار ۳- تاثیر تیمارهای آبیاری بر کارایی مصرف آب  
Figure 3- Effects of water treatments on water use efficiency

## بحث

در گیاهان تلقیح شده با قارچ میکوریزی، به دلیل توسعه شبکه هیف قارچ در محیط پیرامون ریشه، سطوح جذب کننده آب بیشتر شده و بدین صورت هدایت هیدرولیکی ریشه افزایش می یابد که این خود منجر به افزایش فتوسنتز در گیاه شده و نتیجه نهایی آن در افزایش رشد و عملکرد گیاه مشاهده می گردد (۷).

همانگونه که از نمودار (۲) پیداست تلقیح با هر چهار گونه قارچ میکوریز مورد استفاده در آزمایش سبب افزایش معنی دار کلنیزاسیون ریشه نسبت به تیمار عدم تلقیح شده است. بطوری که درصد تلقیح از ۵/۳۳ به ۲۲/۰۷ درصد در تیمار تلقیح شده با قارچ میکوریز گونه گلوموس/ایترارادیسز افزایش یافته است. ال کراکی و همکاران (۲) و گاویتو و میلر (۱۵) اظهار داشتند که یکی از شاخص های مهم فعالیت قارچ میکوریزی، میزان کلنی سازی سیستم ریشه ای بوسیله این قارچ ها می باشد که بوسیله عوامل مختلفی از جمله خصوصیات ظاهری و ساختمانی سیستم ریشه ای، مقدار و کیفیت ترشحات ریشه ای، مصرف کودهای شیمیایی فسفره و غلظت بالای عناصر سنگین تحت تأثیر قرار می گیرد.

یکی از دلایل برقراری رابطه همزیستی قارچ با ریشه ها، پایین بودن میزان فسفر خاک است. از آنجایی که سطح فسفر خاک مطابق جدول (۱) پایین و زیر حد بحرانی (حد بحرانی فسفر برای گوجه فرنگی ۱۵ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک) بود، لذا همه گونه های قارچ توانسته اند ارتباط همزیستی نسبتاً مناسبی را با این گیاه برقرار سازند.

از نتایج دیگر این تحقیق کاهش معنی دار عملکرد در اثر تنش رطوبتی و برعکس، افزایش معنی دار عملکرد گوجه فرنگی در تیمارهای تلقیح با قارچ های میکوریزی در مقایسه با شاهد است. کارلینگ و براون (۱۲) اظهار نمودند که یکی از مهم ترین آثار کاربرد

قارچ های میکوریزی افزایش عملکرد گیاهان زراعی، خصوصاً در خاک های با حاصلخیزی پایین است. افزایش عملکرد به دلیل افزایش سطح جذب ریشه ها از طریق نفوذ میسیلیوم قارچ در خاک و بالطبع دسترسی گیاه زراعی به حجم بیشتری از خاک می باشد.

در تحقیق حاضر با افزایش سطوح تنش خشکی غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و آهن کاهش معنی داری داشت، اما عناصر منگنز و مس روند معکوسی نشان دادند. با افزایش تنش، غلظت این عناصر در گیاه افزایش یافت. تنش ملایم رطوبتی سبب افزایش غلظت پتاسیم و روی در برگ شد و در تنش شدید غلظت این عناصر مجدداً کاهش یافت (جدول ۳). تحت شرایط تنش رطوبتی گیاه با تجمع پتاسیم در آوند چوبی، پتانسیل اسمزی شیره آوند چوبی را کاهش داده و به افزایش فشار ریشه و جذب آب کمک می کند (۶).

همچنین در این تحقیق تلقیح با تمام گونه های قارچ میکوریز استفاده شده در آزمایش نسبت به عدم تلقیح، تأثیر مثبت و معنی داری بر غلظت همه عناصر شامل نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، مس و روی در گیاه داشته است. مطالعات نشان داده است که غلظت نیتروژن در گیاهان میکوریزایی افزایش می یابد. اما مدرکی دال بر اینکه قارچ های میکوریزی قادر به تثبیت ازت باشند وجود ندارد. اگر چه در این مورد همزیستی مضاعف با باکتری های تثبیت کننده نیتروژن و یا اکتینومیسیت ها می تواند دلیل این امر باشد (۲۲). به هر حال مارشنر و دل (۲۱) بیان کردند که گیاه میزبان می تواند تا ۲۵ درصد از نیاز نیتروژنی خود را از طریق رابطه همزیستی با قارچ های میکوریز آربوسکولار تأمین نماید. شاید بتوان گفت که مهم ترین معتبرترین تأثیر رابطه همزیستی میکوریز آربوسکولار، افزایش جذب عناصر معدنی و بویژه فسفر در گیاه میزبان باشد. این تأثیر بخصوص در اراضی که فسفر محلول در خاک کم بوده یا در اثر خشکی، ضریب پخشیدگی عنصر فسفر بسیار کاهش یافته است،

مشهودتر می باشد (۱۷).

مارشور و دل (۲۱) عنوان کردند، حدود ۱۰ درصد از کل پتاسیم جذب شده بوسیله گیاه میزبان ناشی از فعالیت هیف‌های خارج ریشه‌ای قارچ‌های میکوریز آربسکولار است. آزمون مزرعه‌ای صورت گرفته بر روی گیاه ذرت نیز نشان داده است که در تیمارهای تلقیح شده با گونه‌های بومی قارچ‌های میکوریز آربسکولار جذب پتاسیم در گیاه میزبان بیشتر از گیاهان شاهد بوده است (۲۰). افزایش جذب پتاسیم در گیاهان میکوریزی بویژه تحت شرایط تنش ملایم رطوبتی علاوه بر تأثیر مثبت بر مولفه‌های رشد گیاه، بر ویژگی‌های دیگری نظیر روابط آبی، تبادلات گازی و تنظیم اسمزی گیاه نیز موثر می‌باشد (۲۸ و ۲۹).

همانند عنصر روی، میزان مس موجود در محلول خاک بسیار اندک بود و از طرفی دیگر، ضریب پخشیدگی این عنصر در خاک نیز بسیار کم است. این دو عامل باعث شده تا در گیاهان میکوریزی میزان مس جذب شده بیشتر از گیاهان غیر میکوریزی باشد (۲۱). از طرف دیگر قارچ میکوریزی گلوموس موسه/ در همزیستی با گیاه گندم و از طریق فعالیت فسفاتنازی خود توانسته ترکیبات آلی فسفره را هیدرولیز کرده و بدین صورت جذب همزمان فسفر و مس را در گندم افزایش دهد (۳۱).

قارچ‌های میکوریزی از طریق ترشح انواعی از سیدروفورها و کلاته کردن آهن توانسته‌اند جذب و انتقال آهن به گیاهان بادام‌زمینی

و سورگوم را افزایش دهند (۱۱). همچنین گونه‌های مختلف قارچ‌های میکوریزی نیز توانایی متفاوتی در جذب آهن از خود نشان می‌دهند (۱۳). با این وجود نتایج حاصل از تأثیر برقراری رابطه همزیستی میکوریزی در غلظت آهن جذب شده در گیاه میزبان بسیار متغیر است.

در این تحقیق کارایی همزیستی میکوریزی بین گونه‌های مختلف قارچ در افزایش جذب عناصر معدنی در گیاه گوجه‌فرنگی متفاوت بود. کارایی گلوموس/اینتر/ادیسز در جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منگنز و روی نسبت به سایر گونه‌ها بیشتر بوده است. این موضوع نشان دهنده این است که پتانسیل همزیستی گونه‌های مختلف قارچ تحت شرایط مختلف محیطی متفاوت است.

### نتیجه‌گیری

با توجه به تأثیر مثبت مایه زنی قارچ‌های میکوریزی بر جذب عناصر غذایی و کارایی مصرف آب در گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش رطوبتی، بویژه در تنش‌های ملایم که در نتیجه مقاومت به تنش خشکی بوده است، پیشنهاد می‌گردد هنگام انتقال نشاء گوجه‌فرنگی به زمین اصلی، بویژه در مناطقی که دچار تنش‌های محیطی مختلف بخصوص تنش خشکی هستند، از مایه تلقیح این قارچ‌ها به‌خصوص گونه‌های گلوموس/اینتر/ادیسز و گلوموس کالدونیوم استفاده شود.

### منابع

- 1- Alizadeh A. 1995. The principles of irrigation systems design. Astan Quds Razavi Press. 539 Pp.
- 2- Al-Karaki G.N., and Al-Raddad A. 1997. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and drought stress on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in drought resistance. Mycorrhiza, 7: 83-88.
- 3- Augé R.M., Stodola A.J.W., and Tims J.E. 2001. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. Plant and Soil, 230: 87-97.
- 4- Auge, R.M., Scheke K.A., Wample R.L. 1986. Osmotic adjustment in leaves of VA mycorrhizal and plants is not related to phosphorus nutrition. New Physiologist. 82, 765-770.
- 5- Bai C.S. and Gy L. 1991. Effects of water stress on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) seedling. Acta Horticulture Science, 18 (4): 340-344.
- 6- Baker D.A., and Weatherley P.E. 1969. Water and solute transport by exuding root systems of *Ricinus communis*. Journal of Experimental Botany, 20: 485-496.
- 7- Bethlenfalvay G.J., and Linderman R.J. 1992. Mycorrhizae in sustainable agriculture. ASA Special Publication No. 54. American Society of Agronomy. Madison Wisconsin, USA.
- 8- Bouyoucos G.J. 1951. A recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soil. Agronomy Journal, 43:434-438.
- 9- Brar M.S., Brar A.S., Takkar P.N., and Singh T.H. 1987. Effect of K supply on its concentration in plant and on yield parameters of American cotton (*Gossypium hirsutum* L.). Journal of Potassium Research, 3: 145-154.
- 10- Bushkani M.M. 2016. The third Bushehr province agricultural development program. 3<sup>rd</sup> edition. Agricultural organization of Bushehr province (in Persian).
- 11- Caris C., Hordt W., Hawkins H.J., Romhel V., and Eckhard G. 1998. Studies of iron transport by arbuscular mycorrhizal hyphae from soil to peanut and sorghum plants. Mycorrhiza, 8: 35-39.
- 12- Carling D.E., and Brown M.F. 1982. Anatomy and physiology of vesicular-arbuscular and non mycorrhizal roots. Phytopathology, 72:1108-1114.
- 13- Clark R.B., and Zeto S.K. 1996. Mineral acquisition by mycorrhizal maize grown on acid and alkaline soil. Soil

- Biology and Biochemistry, 28: 1405-1503.
- 14- Duan, X., Neuman, D.S., Reiber, J. M. Green, D.C., Saxton, A.M. and Auge, R.M. 1996. Mycorrhizal influence on hydraulic and hormonal factors implicated in the control of stomatal conductance during drought. *Jornal of Experimental Botany*, 47: 1541-1550.
- 15- Gavito M.E., and Miller M.H. 1998. Changes in mycorrhiza development, dry matter partitioning and yield of maize. *Plant and Soil*, 199:177-186.
- 16- Hardi, K. 1985. The effect of removal of extraradical hyphae on water uptake by Vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. *New Phytologist*, 101: 677-684.
- 17- Ibijbijen J., Urquiaga S., Ismaili M., Alves B.J.R., and Boddey R.M. 1996. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition and nitrogen fixation of three varieties of common beans. *New Phytologist*, 134:353-360.
- 18- Knudson, D., Peterson, G.A. and Pratt, P.T. 1982. Lithium, sodium and potassium. Pp: 225-246. *In* Page AL, et al. (eds.). *Methodes of soil analysis. Part 2. 2<sup>nd</sup> ed.*, Am. Soc. Agron., Madison, WI.
- 19- Lindsay W.I., and Norvell W.A. 1978. Development by a DTPA test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42: 421-428.
- 20- Lu S., and Miller M.H. 1988. The role of VA mycorrhizae in the absorption of P and Zn by Maize in field and growth chamber experiments. *Canadian Journal of Soil Science*, 69: 97-109.
- 21- Marschner H., and Dell B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 159: 89-102.
- 22- Mostaajeran A., and Zoe F. 2007. *Symbiosis. Journal of Mycorrhiza*, Isfahan University Press. 218 Pp.
- 23- Murphy J., and Riley J.P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analysis Chemistry Acta.*, 27:31-36.
- 24- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorous in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA Circ. 939, U.S. Govern. Prin. Office, Washington, D.C., U.S.A.
- 25- Osonubi O., Mulongoy K., Awotoye O.O., Atayese M.O., and Okali D.U.U. 1991. Effects of ectomycorrhiza and Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on drought tolerance of for leguminouse woody seedlings. *Plant and Soil*, 136: 131-143.
- 26- Phillips J.M., and Hayman D.S. 1975. Improved procedures clearing roots and staining parasitic and vesicular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *The British Mycological Society*, 55, 158-161.
- 27- Rajali F. 2004. Supplying Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation by interglass method and determining it's effect on improving nutrients uptake in wheat under stress. PhD thesis. Tehran , Iran. (in Persian with English abstract)
- 28- Sharma K.D., Kuhad M.S., and Nandwal A.S. 1992. Influence of K nutrition on Brassica genotypes in response to water stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 19:110-115.
- 29- Song H. 2005. Effects of VAM on host plant in the condition of drought stress and its mechanisms. *Electronic Journal of Biology*, 1(3):44-48.
- 30- Subramanian, K. S., P. Santhanakrishnan, P. Blasubramanian. 2006. Responses of field grown tomato plants to arbuscular mycorrhizal fungal colonization under varying intensities of drought stress. *Scientia Horticulturae*, 107: 245-253.
- 31- Tarafdar, J.C., and Marschner H. 1994. Efficiency of VAM hyphae in utilization of organic phosphorus by wheat plants. *Soil Science and Plant Nutrition*, 40:593-600.
- 32- Walkley, A., and Black, T.A. 1934. An examination of the Deglijareff method for determining organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37:29-38.
- 33- Wu Q.S., and Zou Y.N. 2009b. The effect of Dual application of arbuscular mycorrhizal fungi and polyamines upon growth and nutrient uptake on trifoliolate orange (*Poncirus trifoliolate*) seedlings. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj Napoca*, 37(2):95-98.



## Effects of Mycorrhizal Symbiosis on Nutrient Uptake and Water Use Efficiency of Tomato under Drought Stress

M. Pouzesh Shirazi<sup>1\*</sup> - H. Haghghatnia<sup>2</sup> - R. Khademi<sup>3</sup>

Received: 22-05-2018

Accepted: 29-07-2018

**Introduction:** Tomato is one of the most important vegetables that are used by human. High price of tomato due to its out of season production in Bushehr province has made a great tendency for farmers of this area to cultivate it in fall and winter in nearly 12000 hectares in the province. Mean annual precipitation is about 250 mm per year. Maximum and minimum annual temperatures are 51 and -1 Celsius degrees. Mean annual evaporation is 3000 mm. Recent droughts and going down of water table because of over usage of underground water are main problems of this region that have enforced farmers to decrease irrigation water utilization and try to increase water use efficiency by using new technologies. Therefore, any new technical methods which can increase water use efficiency will help crop production quality and quantity and result in yield stability in the region. Many researchers have proved that mycorrhizal fungi can improve agricultural systems sustainability because of their ability to increase water absorption due to their long and expanded hyphae. Also they are known to increase nutrient uptake from soils even poor in minerals. Therefore, a greenhouse project was designed to determine the effect of Arbuscular mycorrhizal fungi on nutrients uptake and water use efficiency of tomato under drought stress in Bushehr province in southern Iran.

**Materials and Methods:** The experiment was carried out on completely randomized block design in factorial with three replications during 2016-2017 in the greenhouse of Bushehr agricultural and natural resources research organization located in Southern Iran. Factors were as follows: 1) four Arbuscularmycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*, *Glomus intraradices*, *Glomus versiform* and *Glomus caledonium*) and a control (without inoculation), 2) irrigation at three levels based on soil moisture depletion at  $I_1=25$ ,  $I_2=50$  and  $I_3=70$  percent of available water to show stress (from non-stress to low and high stress levels). Soil used for this experiment was dried in sunshine for one month to be evacuated from any native fungi. Soils of the region are calcareous ones with low salinity limitation ( $EC= 3.70$  dS/m) and poor nutrition elements and slightly alkali ( $pH=7.9$ ). Inoculation of roots by fungi was done by pouring one spoon of fungi near tomato roots while cultivating the transported seedlings in the pot. This would help the roots to be exposed to fungi directly while spreading through growing. Irrigation water used were 22.3, 20.1 and 17.7 liter for each pot filled with 10 kg soil during the season. The experiment lasted 100 days and tomato properties were measured such as yield, colonization percent, nutrition elements concentration and also, water use efficiency. Dried leaves were milled and put in furnace at 550 Celsius degrees. Roots were soaked in water for five minutes to be detached from soil and cleaned toughly. Detached roots were maintained in small glass jars filled with alcohol and were kept in refrigerator at 5 Celsius degrees. Roots were then colored by Try pan blue method and root colonization percent was measured by Grid line intersect method.

**Results and Discussion:** Results showed that interaction effect of mycorrhizal fungi and irrigation levels was significant at 1% level on tomato properties (except for N concentration in leaves). Mean comparison with Duncan's test proved that increase in drought stress caused decrease in all tomato properties but fungi inoculation could mitigate water shortage in comparison to non-inoculated tomatoes. Higher drought stress decreased colonization significantly. Drought stress caused significant deficiency in nutrition elements such as N, P and Fe, however some elements such as K, Zn and Mn were increased in medium drought stress. Inoculation with all mycorrhizal fungi improved nutrition elements concentration in tomato leaves. Water use efficiency was increased 67.9, 49.6 and 52.1 percent from non to medium and high stress respectively in tomatoes treated with *Glomus intraradices*.

**Conclusion:** Using of mycorrhizal fungi specially *Glomus intraradices* and *Glomus caledonium* increased

1 - Scientific Staff of Soil and Water Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bushehr, Iran

(- \*Corresponding Author Email: m.shirazi741@gmail.com)

2 - Soil and Water Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Darab station, AREEO, Darab, Iran

3- Scientific Staff of Horticulture Research Department, Bushehr Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bushehr, Iran

tomato water use efficiency and improved growth properties due to the increment of water resistance ability in plant. This phenomenon is caused by higher nutrition elements uptake by roots and optimization of water relationship in tomato in the presence of mycorrhizal fungi. According to results, it is suggested tomato roots inoculation with mycorrhizal fungi especially in regions with high water stress potential.

**Keywords:** Arbuscular mycorrhizal fungi, Bushehr, greenhouse, Macro and micronutrients, Water stress



## بررسی رابطه تغییرات رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در رویشگاه جنگلی مله سیاه در استان ایلام

جعفر حسین زاده<sup>۱\*</sup> - افسانه تنگو<sup>۲</sup> - علی نجفی فر<sup>۳</sup> - احمد حسینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۱۱

### چکیده

پایش مستقیم رطوبت خاک و استخراج داده‌های رطوبت به صورت نقطه‌ای نه تنها پرهزینه و وقت‌گیر است، بلکه در سطوح وسیع، غیر عملی است. این در حالی است که خشک‌سالی پدیده‌ای منطقه‌ای بوده و برای پایش آن به داده‌های وسیع و منطقه‌ای نیاز است از این رو، برآورد رطوبت خاک با استفاده از داده‌های هواشناسی گزینه‌ای مناسب است. پژوهش حاضر با بررسی امکان برآورد رطوبت خاک جنگل از طریق پارامترهای آب و هوایی از جمله بارندگی، دمای متوسط، میانگین حداکثر دما، میانگین حداقل دما، رطوبت نسبی، حداقل دمای مطلق، حداکثر دمای مطلق و رطوبت نسبی انجام شد. برای این منظور، در دو دامنه جنوبی و شمالی رویشگاه جنگلی مله سیاه در ایلام، تعداد ۱۸ جفت حس‌گر سنجش رطوبت در عمق‌های ۵۰، ۷۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری نصب و رطوبت خاک، با استفاده از دستگاه تی‌دی‌آر<sup>۵</sup> در فاصله زمانی ماهانه در مدت سه سال متوالی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که می‌توان از شاخص‌های هواشناسی برای برآورد بیلان رطوبت خاک در عرصه‌های جنگلی مورد مطالعه، که اندازه‌گیری مستمر و گسترده رطوبت خاک در آنها مشکل است، به‌نحو مطلوبی استفاده کرد. میزان رطوبت خاک این منطقه در شهریور ماه به حداقل خود می‌رسد. رطوبت ماهانه خاک، حتی در عمق زیاد، بیش‌ترین همبستگی را با پارامترهای اقلیمی همان ماه داشته و در این رابطه میانگین دما و رطوبت نسبی هوا به ترتیب بیش‌ترین همبستگی را نشان داد. مقدار ضریب تبیین ( $R^2$ ) برای رابطه رگرسیونی، حدود ۰/۹۳ بود که نشان دهنده برآورد بسیار مناسب رطوبت خاک به وسیله مدل می‌باشد. لذا بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بر اساس پارامترهای حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک، می‌توان وضعیت بیلان رطوبت خاک جنگل را به‌نحو مناسبی برآورد و حتی حداقل برای یک ماه آتی پیش‌بینی نمود.

**واژه‌های کلیدی:** جنگل بلوط، دستگاه TDR، متغیرهای هواشناسی، رگرسیون گام به گام

### مقدمه

است (۲۰، ۳۲). دست‌نوی و وروت (۱۱) یک چارچوب مفهومی و تحلیلی را برای ارتباط دادن تغییر آب و اقلیم در سطح زمین و رطوبت خاک و گسترش کمی درازمدت رطوبت خاک در اثر تغییر اقلیم توسعه دادند.

عبارت رطوبت خاک عموماً به ذخیره موقت بارش در عمق بالای ۱ تا ۲ متری از نیم‌رخ خاک اشاره دارد اگرچه تنها درصد کمی از بارش بعد از تبخیر و تعرق، رواناب سطحی و نفوذ عمقی در خاک ذخیره می‌شود، اما ذخیره همین مقدار از رطوبت خاک برای حفظ کشاورزی، مرتع و پوشش جنگلی، حیاتی است (۲۳). بررسی رطوبت در منطقه توسعه ریشه برای آگاهی از بیلان آب در مناطق خشک و حوزه‌های آبخیز جهت برنامه‌ریزی‌های مدیریتی آب امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. (۲۹). رطوبت یکی از فراسنج‌های اساسی خاک است که در مطالعات آب و خاک و مدیریت منابع آب، کاربرد زیادی دارد (۴). رطوبت خاک به‌طور قابل توجهی بر اقلیم، آب و

نقش رطوبت خاک در منطقه ریشه به‌طور گسترده‌ای به عنوان یک پارامتر کلیدی در هواشناسی، هیدرولوژی و کشاورزی به‌خوبی شناخته شده است آگاهی مناسب از رطوبت خاک برای درک و پیش‌بینی اثرات متقابل بین اقلیم، آب و هوا و فرایند سطح زمین لازم

۱، ۳ و ۴ - دانشیار و استادیاران پژوهش بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی ایلام، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

(\*) - نویسنده مسئول: (Email: j.hoseinzadeh@gmail.com)

۲ - دانشجوی دکتری جنگل‌شناسی و اکولوژی جنگل، دانشگاه منابع طبیعی و علوم کشاورزی ساری

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.71927

5- Time domain reflectometry



بر روی رواناب و رطوبت خاک را در ۲۸ حوضه استرالیا به منظور نشان دادن حساسیت رواناب و رطوبت خاک به تغییرات آب و هوا شبیه سازی کردند و نشان دادند درصد تغییر در سطوح رطوبت خاک می تواند متأثر از درصد تغییر در بارش باشد و درجه حرارت به تنهایی در مقایسه با بارش، تأثیر کمی بر روی رواناب و رطوبت خاک خواهد داشت. شانگ و همکاران (۲۸) یک مدل برای محاسبه میزان رطوبت سطحی خاک در چین با استفاده از پارامترهای بارش و تبخیر در ۷۹ ایستگاه هواشناسی کشاورزی توسعه دادند. هدف اصلی این مقاله این است که آیا برآورد رطوبت خاک از طریق پارامترهای آب و هوایی (بارش، دما و رطوبت نسبی) ثبت شده از یک ایستگاه نزدیک به محل مورد مطالعه، که سریع تر و با هزینه کمتر قابل حصول است، امکان پذیر هست؟ لذا در این تحقیق سعی شده است با بررسی رابطه بین میزان رطوبت خاک با پارامترهای آب و هوایی یا اقلیمی از قبیل بارندگی، دمای متوسط، میانگین حداکثر دما، میانگین حداقل دما، رطوبت نسبی، حداقل دمای مطلق، حداکثر دمای مطلق و رطوبت نسبی، نسبت به برآورد رطوبت خاک و میزان آب در دسترس درختان جنگلی از طریق پارامترهای مناسب اقدام گردد. بررسی نقش بارش ها و سایر پارامترهای اقلیمی مربوط به ماه های قبل و آزمون این فرض که رطوبت موجود در اعماق خاک احتمالاً مربوط به بارش ها یا دمای ماه های قبل باشد، از اهداف دیگر در این تحقیق است.

## مواد و روش ها

### منطقه مورد مطالعه

محل اجرای تحقیق، رویشگاه جنگلی مله سیاه از توابع بخش چوار شهرستان ایلام، در حاشیه جنوبی جاده چوار به حاج بختیار، واقع در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهر ایلام انتخاب گردید. جنگل مله سیاه که در عرض جغرافیایی  $33^{\circ} 45' 02''$  و طول جغرافیایی  $46^{\circ} 13' 03''$  (مرکز محدوده) واقع شده، مساحتی حدود ۲۴۸۸ هکتار را در بر گرفته است که عرصه ای معادل هفت هکتار از آن، در ارتفاع حدود ۱۴۰۰ متری از سطح دریا، برای اندازه گیری رطوبت خاک تعیین گردید (شکل ۱). میانگین سالانه بارش (در بازه ۳۰ ساله اخیر) در ایستگاه های ایلام (به فاصله ۱۲ کیلومتر واقع در ارتفاع ۱۳۶۳ متری از سطح دریا) و ایوان (به فاصله پنج کیلومتر واقع در ارتفاع ۱۲۷۰ متری از سطح دریا)، به عنوان نزدیک ترین ایستگاه ها، به ترتیب ۶۲۱ و ۳/۶ میلی متر اندازه گیری شده است. براساس داده های اقلیمی ایستگاه ایلام، حداکثر دمای مطلق روزانه ثبت شده ۴۰/۶ درجه سانتی گراد، حداقل دمای مطلق روزانه ۱۴/۶- درجه سانتی گراد و میانگین دمای سالانه منطقه در ۱۶/۹ درجه سانتی گراد می باشد. شکل ۲ نمودار آمبروترمیک منطقه در طی سالهای ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۰ نشان می دهد.

هوا، تولید و رشد گیاه، هیدرولوژی و اکولوژی خاک (دینامیک کربن و نیتروژن و ردیابی انتشار گازها) اثر می گذارد (۳۱، ۲۷) اما با وجود اهمیت غیرقابل انکار رطوبت خاک در مطالعات محیطی، به دلیل دشواری در اندازه گیری های مستمر از نظر مکانی و زمانی و پرهزینه و وقت گیر بودن سنجش های میدانی، تاکنون از این مشخصه به طور گسترده در مدل های زیستی، بهره برداری لازم نشده است (۲). رطوبت خاک به دلیل ناهمگونی در خواص خاک، پوشش زمین، توپوگرافی و توزیع غیر یکنواخت بارش و تبخیر و تعرق دارای تغییرات مکانی و زمانی می باشد (۲۳).

اندازه گیری رطوبت خاک، به طور مستقیم با استفاده از روش های درجا مانند نوترون متر و TDR یا به طور غیرمستقیم به وسیله توابع انتقالی و یا سنجش از دور انجام می شود (۱۸). اندازه گیری درجا یا نقطه ای به منظور پایش رطوبت خاک در مقیاس های کوچک نظیر کرت های مزرعه ای و مقیاس محلی دقت بسیار بالایی داشته، اما برای مقیاس های بزرگ (حوزه آبخیز، ناحیه ای، قاره ای و جهانی) به دلیل فراهم نبودن اطلاعات کافی از پیوستگی و پوشش مکانی و نیز صرف هزینه و زمان زیاد، مناسب نیست. این در حالی است که خشک سالی پدیده ای منطقه ای بوده و برای پایش آن به داده های وسیع و منطقه ای نیاز است. بنابراین ارائه یک روش ساده برای پایش رطوبت خاک در مقیاس منطقه ای از اهمیت اساسی برخوردار است.

شاخص های اقلیمی یا آب و هوایی که در ایستگاه های هواشناسی به طور مستمر اندازه گیری و ثبت می شوند، به عنوان اطلاعاتی که به آسانی در دسترس هستند، می تواند در تعیین خصوصیات سطحی خاک مانند دما و رطوبت خاک، مورد استفاده قرار گیرند. در مورد رابطه تغییرات آب و هوا بر دمای خاک تحقیقاتی صورت گرفته و نتایجی گزارش شده است (۸، ۶، ۵) اما در خصوص رابطه آب و هوا با تغییرات رطوبت خاک مطالعات بسیار اندکی وجود دارد. مطالعات قبلی نشان داده است که رطوبت خاک تحت تأثیر آب و هوا و بازخورد مثبتی از الگوهای بارش است (۱۲، ۱). همچنین از برخی محققان رابطه آب و هوا بر فرآیندهای فیزیکی مختلف دیگری مانند رطوبت سطحی خاک، تبخیر و تعرق، تشعشع در سطح، ذوب برف و رواناب، موثر اعلام شده است (۳۰ و ۲۴، ۲۱، ۲۰، ۱۳). ایران نژاد و همکاران (۱۷) در بررسی برآورد رطوبت خاک با استفاده از داده های هواشناسی زود یافت در دو ایستگاه هواشناسی و نیز داده های دمای سطح و اعماق خاک نشان دادند در ایستگاه قراخیل در لایه های سطحی و در ایستگاه داراب در اعماق پایتتر خاک، ضریب همبستگی بین رطوبت مشاهده شده و مدل سازی شده با استفاده از داده های روزانه بارندگی و تبخیر تعرق، بیشتر است. دلیرتری و لیگیت (۱۰) ناندیستگ و شینودا (۲۲) با بررسی ارتباط بین رطوبت خاک با باران و دما در فصول مرطوب و خشک نشان دادند رطوبت خاک با میزان بارش ارتباط مستقیمی دارد. چپو و همکاران (۱۹۹۵) اثر تغییر اقلیم

## روش تحقیق

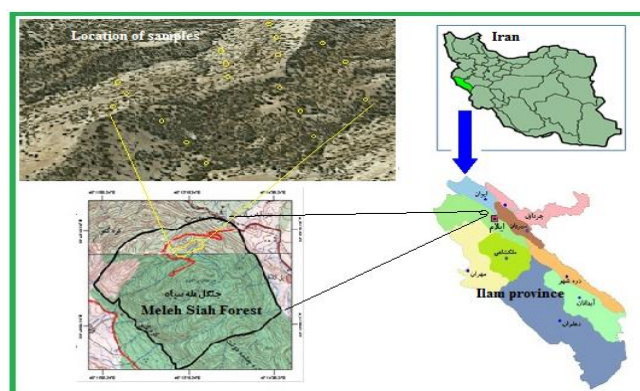
اقلیمی که بیشترین رابطه را با میزان رطوبت خاک دارند از ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. سپس برای تعیین رابطه رگرسیونی بین میانگین پارامترهای هواشناسی حاصل از دو ایستگاه مذکور با مقدار رطوبت خاک از مدل رگرسیون در قالب آنالیز واریانس ANOVA استفاده شد و در نهایت باتوجه به نرمال بودن داده‌ها، ضرایب مدل رگرسیون با استفاده از آزمون t مورد سنجش قرار گرفت.

## نتایج و بحث

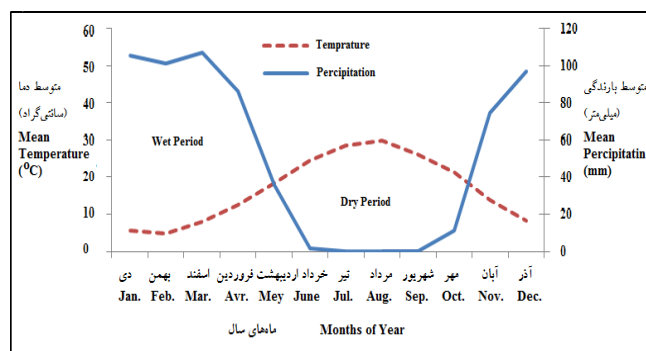
تغییرات میانگین رطوبت اعماق مختلف خاک در ماه‌های سال و در جهت‌های اصلی شمالی و جنوبی در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، میزان رطوبت خاک در شهر یورماه به حداقل خود می‌رسد و تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف در تمام ماه‌های سال در سطح خاک شدیدتر است، به گونه‌ای که افت رطوبت در فاصله ۲۰ سانتی‌متری بین عمق ۷۰ تا ۵۰ سانتی‌متر، بسیار بیشتر از فاصله ۴۰ سانتی‌متری بین عمق‌های ۱۱۰ تا ۷۰ سانتی‌متر است.

برای انجام تحقیق، دو دامنه جنوبی و شمالی در رویشگاه مورد مطالعه تعیین و در هر یک تعداد ۹ محل برای سنجش رطوبت خاک انتخاب شد. برای اطلاع از میزان و روند تغییرات رطوبت در عمق‌های مختلف خاک در محدوده توسعه ریشه درختان جنگلی زاگرس، سنجش رطوبت در سه عمق ۵۰، ۷۰ و ۱۱۰ سانتی‌متری با سه تکرار انجام گرفت و در مجموع ۱۸ نقطه جنگل به‌طور ماهانه مورد اندازه‌گیری رطوبت خاک قرار گرفت. در هر نقطه یک جفت میله فلزی سنجش رطوبت بطور عمودی در اعماق خاک نصب گردید تا با استفاده از دستگاه TDR میزان رطوبت خاک اندازه‌گیری گردد. اندازه‌گیری ماهانه رطوبت خاک طی سه سال متوالی انجام و بعنوان مقدار آب خاک برحسب میلی‌متر ثبت گردید (شکل ۱). برای تعیین ارتباط داده‌های رطوبت خاک با متغیرهای هواشناسی، ۷ متغیر زیر از مجموع داده‌های اقلیمی موجود در ایستگاه هواشناسی ایلام، مربوط به دو سال متوالی ۱۳۹۳ و ۱۳۹۴ استخراج شد: بارندگی، رطوبت نسبی هوا، دمای متوسط، میانگین حداکثر دما، میانگین حداقل دما، حداکثر دمای مطلق، حداکثر دمای مطلق.

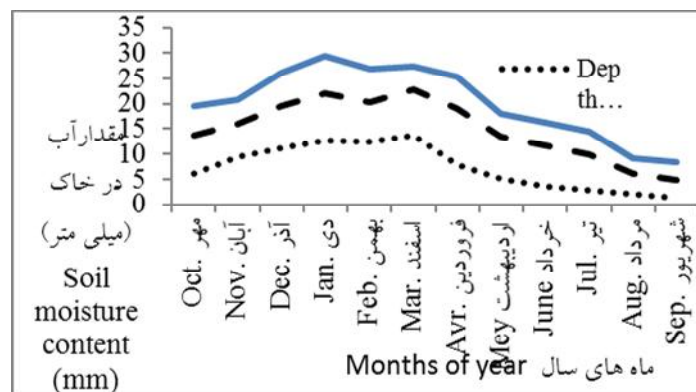
برای تجزیه و تحلیل داده‌ها و تعیین مهمترین شاخص‌های



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط اندازه‌گیری رطوبت خاک  
Figure 1- Position of study area and Soil moisture measurement points

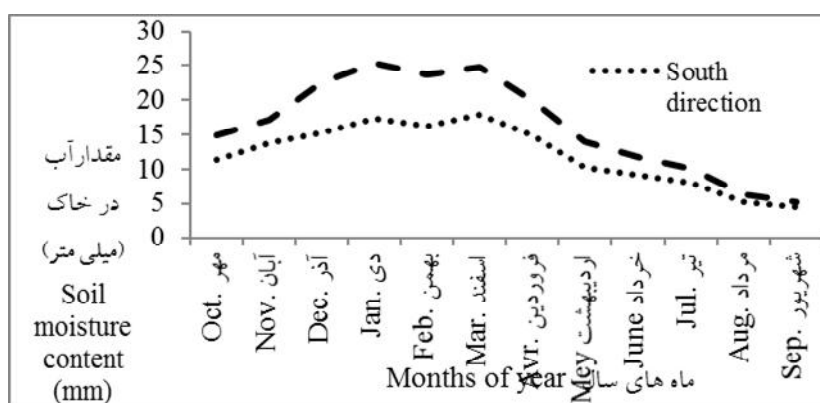


شکل ۲- نمودار آمبروترمیک منطقه در طی سالهای ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۰  
Figure 2- Ambrotromic diagram of the area during the years 1986 to 2011



شکل ۳- نمودار تغییرات میانگین رطوبت عمق‌های خاک در ماه‌های سال

Figure 3- Changes in average soil moisture content in the months of the year



شکل ۴- تغییرات میانگین رطوبت عمق‌های مختلف خاک در دو جهت اصلی و در ماه‌های سال

Figure 4- Changes in monthly average moisture content of different soil depths in two main directions

خاک همان ماه دارند. چنانچه میانگین رطوبت خاک (تلفیق همه عمق‌ها) در نظر گرفته شود، از بین پارامترهای اقلیمی مولفه‌های میانگین دما، بارندگی و رطوبت نسبی به ترتیب بیش‌ترین همبستگی را با رطوبت خاک نشان داده‌اند. بین رطوبت خاک و میانگین دمای ماهانه همبستگی منفی معنی‌دار در سطح  $0/01$  و بین رطوبت خاک با رطوبت نسبی هوا همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح  $0/01$  وجود دارد. از آنجائی که دو مولفه دما و رطوبت نسبی، به واسطه نقشی که در مقدار تبخیر و تعرق دارند، به ترتیب بیش‌ترین همبستگی را با میانگین رطوبت خاک نشان داده‌اند، اما رفتار رطوبت خاک در عمق‌های مختلف و ارتباط آن با شاخص‌های اقلیمی یکسان نیست، بر این مبنا رابطه رگرسیونی آن‌ها با میزان رطوبت خاک به تفکیک عمق خاک تعیین گردید که در جدول ۳ ارائه شده است. براساس گزارش شانگ و همکاران (۲۸) مقدار رطوبت خاک می‌تواند با استفاده از نسبت بارش روزانه به تبخیر روزانه محاسبه شود، اما تاثیر بارش بر رطوبت خاک با گذشت زمان کاهش می‌یابد.

براساس شکل ۴ منحنی میانگین رطوبت خاک در عمق‌های مختلف در هر دو جهت دارای طرح یکسان است و گرچه میانگین رطوبت خاک در ماه‌های مختلف سال در جهت رو به شمال بیشتر از جهت روبه جنوب است، اما در ماه‌های مرداد و شهریور تفاوت چندانی باهم ندارند. بیشترین میانگین رطوبت در اواسط آذر و اسفند ماه و کمترین میزان آن در شهریور ماه دیده شد. شیب کاهش رطوبت از فروردین تا شهریور به دلیل افزایش تبخیر از سطح خاک در حال افزایش است.

به منظور بررسی ارتباط بین مقادیر رطوبت خاک و شاخصهای اقلیمی، همبستگی پیرسون انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. ضریب همبستگی بین میانگین رطوبت خاک با شاخصهای اقلیمی دو ماه قبل معنی‌دار نبود اما ضریب همبستگی بین میانگین رطوبت خاک با شاخصهای اقلیمی همان ماه و ماه قبل، بسته به عمق خاک، در سطح  $0/01$  معنی‌دار بود. براساس نتایج جدول پارامترهای اقلیمی هر ماه بیش‌ترین همبستگی را با میزان رطوبت

جدول ۱- ضرایب همبستگی پیرسون بین میانگین رطوبت خاک جنگل با شاخص‌های اقلیمی در ماه‌های مختلف  
Table 1- Pearson correlation coefficients between forest soil moisture content and climatic indices

| شاخص‌های اقلیمی<br>climatic indices         | همان ماه<br>The same month | ماه قبل<br>Previous month | دو ماه قبل<br>Two months earlier |
|---------------------------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| بارندگی<br>Precipitation                    | 0.752**                    | 0.539                     | -0.007                           |
| میانگین دما<br>Mean Temperature             | -0.962**                   | -0.740**                  | -0.315                           |
| متوسط حداکثر دما<br>Max Average Temperature | -0.958**                   | -0.732**                  | -0.300                           |
| متوسط حداقل دما<br>Min Average Temperature  | -0.957**                   | -0.845**                  | -0.524                           |
| حداکثر دمای مطلق<br>Max Temperature         | -0.935**                   | -0.783**                  | -0.409                           |
| حداقل دمای مطلق<br>Min Temperature          | -0.960**                   | -0.735**                  | -0.347                           |
| رطوبت نسبی هوا<br>Moisture                  | 0.931**                    | 0.706*                    | 0.233                            |

\* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و \*\* همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ وجود دارد

\*There is a significant correlation at the level of 0.05 and \*\* significant correlation at the level of 0.01

جدول ۲- خلاصه ضرایب همبستگی مدل رابطه بین میانگین رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در ماه‌های مختلف  
Table 2- Summary of correlation coefficients of the relationship between soil moisture content and climatic indices in different Months

| ضریب همبستگی R<br>Correlation coefficient | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> تصحیح شده<br>R <sup>2</sup> Corrected | خطای معیار برآورد<br>Estimated standard error |
|-------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 0.965                                     | 0.931          | 0.915                                                | 1.69949                                       |

بارش ماه قبل بویژه در عمق خاک، این مدل‌ها می‌توانند در پیش‌بینی و برآورد بیلان رطوبت خاک در یک ماه بعدی و در صورت لزوم اتخاذ تدابیر مناسب مدیریتی جنگل کمک نمایند.

بدیهی است که شرایط آب و هوایی بویژه در کوتاه مدت تأثیر بیشتری بر رطوبت لایه‌های سطحی خاک خواهد گذاشت، بنابر انتظار تغییرات عمقی رطوبت در تمام ماه‌های سال در سطح خاک شدیدتر است و با افزایش عمق تغییرات رطوبت خاک کمتر می‌شود، نتایج مطالعات ایران‌نژاد و همکاران (۱۷)، رضانی اعتدالی و همکاران (۲۶) حاکی از تغییرات بیشتر رطوبت خاک در لایه سطحی است. گرچه تفاوت بین میانگین رطوبت خاک عمق‌های مختلف در جهت روبه جنوب با رطوبت خاک در جهت روبه شمال مورد انتظار است، ولی عمده این اختلاف مربوط به ماه‌های دارای بارندگی مشاهده شده است در حالی که این تفاوت در ماه‌های پایانی فصل خشک زیاد نیست. این موضوع حاکی از نقش مهم عامل تبخیر در دامنه‌های روبه جنوب در ماه‌هایی است که بارندگی رخ می‌دهد. بررسی بیلان رطوبت خاک (شکل ۳) نشان می‌دهد که میزان رطوبت خاک در عمق ۷۰ سانتی‌متری از ماه اردیبهشت تا تیر دارای محدودیت بوده و در ماه‌های مرداد و شهریور وضعیت بحرانی پیدا می‌کند. کمبود بحرانی

باتوجه به جدول ۲، مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) که نشان دهنده همخوانی مدل رگرسیون با داده‌ها است، برای رابطه بین میانگین رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در ماه‌های مختلف سال، ۰/۹۳ است که نشان دهنده برآورد بسیار مناسب رطوبت خاک به وسیله مدل می‌باشد.

جدول ۳ مدل‌های مناسب رگرسیون خطی و ضرایب مربوط را برای عمق‌های مختلف خاک به روش گام به گام<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. براساس نتایج به دست آمده، با استفاده از این معادلات می‌توان مقدار رطوبت عمق‌های مختلف خاک را با استفاده از شاخص‌های اقلیمی بارندگی، میانگین دما و رطوبت نسبی هوا که به آسانی در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، برآورد نمود. نتایج این تحقیق هم‌اندشانگ و همکاران (۲۸) نشان می‌دهد که تأثیر بارندگی بر رطوبت خاک با گذشت زمان و فاصله از وقوع بارش، بویژه در عمق‌های پایین‌تر، کاهش می‌یابد. رطوبت خاک عمق‌های پایین‌تر در هر زمان، علاوه بر دما و رطوبت هوا در همان زمان، عمدتاً با میزان بارندگی ماه قبل در ارتباط بوده است. با توجه به اثر قابل توجه

رطوبت خاک و تنش خشکی شدید حاصل از آن، بر الگوی رقابت درختان تأثیر گذار است و رقابت درختی هم یک عامل مستعدکننده خشکیدگی درختان در زاگرس عنوان شده است. درختانی که تحت

تنش خشکی بیشتری قرار گرفته و فشار بیشتری به آنها وارد می‌شود را در معرض خشکیدگی بیشتر گزارش شده است (۱۶).

جدول ۳- ضرایب مدل‌های رگرسیون رطوبت خاک در عمق‌های مختلف  
Table 3: Coefficients of Soil Moisture Regression Models in soil depths

| Table 3: Coefficients of Soil Moisture Regression Models in soil depths |                                                              |                                                 |        |                                             |                   |                                     |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------|
| متغیر وابسته<br>Dependent Variable                                      | مدل<br>Model                                                 | ضرایب استاندارد نشده<br>Nonstandard coefficient |        | ضرایب استاندارد شده<br>Standard coefficient | آزمون t<br>T Test | سطح معنی‌داری<br>Significance level |
|                                                                         |                                                              | Standard B                                      |        | Beta                                        |                   |                                     |
| رطوبت خاک در عمق ۵۰ سانتی<br>Soil Moisture in 50 cm                     | Constant value<br>مقدار ثابت                                 | 0.717                                           | 1.073  |                                             | 1.497             | 0.151                               |
|                                                                         | Current month Precipitation<br>بارندگی این ماه               | 0.017                                           | 0.080  | 0.540                                       | 4.787             | 0.000                               |
|                                                                         | Previous month Precipitation<br>بارندگی ماه گذشته            | 0.014                                           | 0.061  | 0.475                                       | 4.208             | 0.000                               |
| Soil Moisture in 70 cm<br>رطوبت خاک در عمق ۷۰ سانتی                     | Constant value<br>مقدار ثابت                                 | 2.214                                           | 4.029  |                                             | 1.820             | 0.085                               |
|                                                                         | Current month Humidity<br>رطوبت نسبی این ماه                 | 0.067                                           | 0.180  | 0.478                                       | 2.707             | 0.014                               |
|                                                                         | Previous month Precipitation<br>بارندگی ماه گذشته            | 0.027                                           | 0.068  | 0.444                                       | 2.514             | 0.021                               |
| Soil Moisture in 110 cm<br>رطوبت خاک در عمق ۱۱۰ سانتی                   | Constant value<br>مقدار ثابت                                 | 4.580                                           | 24.695 |                                             | 5.392             | 0.000                               |
|                                                                         | Current month Mean Temperature<br>میانگین درجه حرارت این ماه | 0.179                                           | -0.479 | -0.484                                      | -2.676            | 0.015                               |
|                                                                         | Previous month Precipitation<br>بارندگی ماه گذشته            | 0.034                                           | 0.079  | 0.420                                       | 2.324             | 0.031                               |

استفاده از پارامترهای هواشناسی ماه‌های قبل می‌توانست در پیش‌بینی و برآورد رطوبت خاک در ماه‌های آتی و امکان اقدامات پیش‌گیرانه کمک شایانی باشد، اما پارامترهای اقلیمی هر ماه بیش‌ترین همبستگی را با میزان رطوبت خاک همان ماه داشته‌اند که اگر آنها دسته‌بندی شوند، میانگین دما در گروه دمایی (شامل متوسط دما، میانگین حداکثر دما، میانگین حداقل دما، حداکثر مطلق دما و حداقل مطلق دما) و رطوبت نسبی در گروه رطوبت هوا (شامل میزان بارندگی و رطوبت نسبی هوا) به‌ترتیب بیش‌ترین همبستگی را نشان داده‌اند. بنابراین دمای هوا و رطوبت نسبی هوا شاخص‌های مهمی در تعیین میزان رطوبت خاک به حساب می‌آیند. گرچه انتظار می‌رفت

مقدار بارندگی با میزان رطوبت خاک رابطه قوی‌تری را نشان دهد اما بایستی توجه داشت که بارش در برخی ماه‌ها ناچیز یا صفر است و اتفاقاً برای هدف ما که تخمین رطوبت خاک بویژه در ماه‌های خشک از طریق پارامترهای قابل اندازه‌گیری انجام می‌شود، چندان مطلوب نخواهد بود و این مورد ممکن است به دلیل عدم تشابه بافت خاک و کاربری اراضی در اقلیم‌های مختلف باشد. نتایج مشابهی از نظر میزان همبستگی معنی‌دار در رابطه رطوبت خاک با بارندگی در نطنز اصفهان مشاهده شده است (۴). همچنین کارلسون و همکاران (۷) و جیلس و همکاران (۱۵) در بررسی رطوبت خاک با دقت قابل قبول نشان دادند تغییرات روزانه دما، همبستگی بالایی با مقدار رطوبت

کافی ایستگاه‌های هواشناسی مطابقت داده شود، لذا در همه جا کاربردی نخواهد بود.

این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان شاخص‌های هواشناسی مانند بارندگی، میانگین دما و رطوبت نسبی هوا، که داده‌های آنها در ایستگاه‌های هواشناسی موجود است و با اندازه‌گیری آنها در مناطق دور از ایستگاه‌ها آسان است، برای برآورد بیلان رطوبت خاک در عرصه‌های جنگلی که امکان اندازه‌گیری مستمر و گسترده رطوبت خاک در آنها وجود ندارد، مورد استفاده قرار داد. گرچه با توجه به توپوگرافی منطقه مورد مطالعه، فاصله ایستگاه هواشناسی و تاثیر ارتفاع در میزان رطوبت خاک ممکن است در دقت نتایج موثر باشد، اما استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های نزدیک به منطقه و مشابهت داده‌های حاصله با شرایط منطقه، امکان مقایسه مناسب را فراهم کرده است. پارامترهای بارندگی بویژه بارش ماه قبل، دمای هوا و از جمله آنها میانگین دمای ماهانه و همچنین رطوبت نسبی هوا بیشترین همبستگی معنی‌دار را با رطوبت خاک در سطح اطمینان ۹۹ درصد نشان داده است. بدیهی است که تغییرات رطوبت خاک بسته به نوع خاک، کاربری اراضی و نوع اقلیم متفاوت خواهد بود، اما نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رطوبت خاک در شهرپورماه به حداقل خود می‌رسد و لذا نقش رطوبت خاک در شهرپور ماه برای کیفیت بقای درختان و پوشش گیاهی از اهمیت زیادی برخوردار است.

خاک دارد. بایر و همکاران (۳) در بررسی عملکرد تخمین رطوبت در مقایسه با استفاده مستقیم از داده‌های هواشناسی برای تخمین بازده محصول با تجزیه و تحلیل همبستگی چندگانه نشان داد که رطوبت خاک با استفاده از روش مطلوب، بهترین برآوردگر عملکرد محصول بود، و به دنبال آن حداقل دما و حداکثر دما بود، بارش به تنهایی به عنوان ابزاری برای ارزیابی عملکرد نامناسب بود. در تحقیق دیگری فشایی و همکاران (۱۴) در جهت تخمین رطوبت با استفاده از تصاویر سنجنده نشان دادند هم روندی بارندگی و رطوبت نسبی هوا با مقادیر میانگین شاخص کمبود آب، حاکی از انطباق مناسب این شاخص با وضعیت رطوبتی منطقه می‌باشد.

با توجه به رابطه بدست آمده در این پژوهش، به راحتی می‌توان با ابزارهای قابل حمل نسبت به اندازه‌گیری دما و رطوبت هوا پرداخته و میزان رطوبت خاک را تخمین زد. بدیهی است که برای حصول دقت لازم، بایستی این دو عامل را با توجه به نوع خاک و شرایط محیطی مورد تحقیق بیشتر قرار داد. بسیاری از محققان اندازه‌گیری مستقیم رطوبت خاک، با استفاده از روش‌های درجا را معمولاً هزینه‌بر و زمان-بر می‌دانند (۱۸). بنابراین ارائه یک روش ساده برای برآورد رطوبت خاک در مقیاس منطقه‌ای از اهمیت اساسی برخوردار است. امروزه از تصاویر ماهواره‌ای برای تخمین وضعیت دمایی و رطوبتی خاک استفاده می‌شود ولی آن هم بایستی با اطلاعات دقیق زمینی و داده

## منابع

- 1- Alfaro E.J., Gershunov A., Cayan D. 2006. Prediction of summer maximum and minimum temperature over the central and western United States: The roles of soil moisture and sea surface temperature. *J. Clim.*, 19: 1407-1421.
- 2- Babazadeh H., Norouzi Aghdam E., Aghighi H., Shamsnia S.A., and Khodadadi dehkordi D. 2012. Estimation of soil surface moisture in arid and semi-arid range lands using remotely sensed Temperature/Vegetation Index measurements (TVX) (Case Study: Khorasan Province). *Iranian journal of Range and Desert Research*, 19(1):120-132. (in Persian with English abstract).
- 3- Baier W., Robertson G.W. 1968. The performance of soil moisture estimates as compared with the direct use of climatological data for estimating crop yields. *Agricultural Meteorology*, 5(1): 17-31.
- 4- Behyar M.B. 2014. Evaluation of soil moisture in Isfahan province by E-AMS method. *Journal of Geographical Research*, 29(1): 1-8. (in Persian).
- 5- Beltrami H. 2001. On the relationship between ground temperature histories and meteorological records. *Global and Planetary Change*, 29: 327-348.
- 6- Brown Sh.E., Pregitzer K.S., Reed D.D., and Burton A.J. 2000. Predicting daily mean soil temperature from daily mean air temperature in four Northern hardwood forest stands, *Forest Science*. 46: 297-301.
- 7- Carlson T., Gillies R., Perry E. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9: 161-173.
- 8- Chacko T.P., and Renuka G. 2002. Temperature mapping thermal diffusivity and subsoil heat flux at Kariavattom of Keral. *Proc Indian Academy Science*, 111: 79-85.
- 9- Chiew F.H.S., Whetton P.H., McMahon T.A., and Pittock A.B. 1995. Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology* 167: 121-147.
- 10- Deliberty T.L., and Legates D.R. 2003. Interannual and seasonal variability of modeling soil moisture Oklahoma. *International Journal of Climatology*, 23: 1057-1086.
- 11- Destouni G. and Verrot L. 2014. Screening long-term variability and change of soil moisture in a changing climate. *Journal of Hydrology*, 516: 131-139.

- 12- Dirmeyer P.A. 2000. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation. *Journal of Climatology*, 13: 2900-2922.
- 13- Dickinson, R.E., 2000. How coupling of the atmosphere to ocean and land helps determine the timescales of inter annual variability of climate. *Journal of Geophysical Research*, 105: 20115-20119.
- 14- Fashae M., Sanaee Nejad S. H., Davary K. 2016. Soil Moisture Estimation Using MODIS Images (Case Study: Mashhad Plain Area). *Journal of Water and Soil*. 29(6):1735-1745.
- 15- Gillies, R.R., Carlson, T.N., Cui, J., Kustas, W.P., and Humes, K.S., 1997. A verification of the triangle method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (15): 3145-3166.
- 16- Hosseini A., Hosseini S.M., Rahmani A., and Azadfar D. 2014. Comparison between two oak stands (healthy and affected by oak decline) in respect to characteristics of competitive environments at Ilam province. *Iranian Journal of Rangelands and Forests Plant Breeding and Genetic Research*, 21(4): 606-616. (in Persian with English abstract).
- 17- Irannejad P., Ghahreman N., Taheri P. 2013. Estimation of soil moisture content by using routine weather data in two agrometeorological stations of Iran. *The 2nd International Conference on Plant, Water, Soil and Air Modeling*, 8(9):1-12.
- 18- Khanmohammadi F., Homaee M., Noroozi A.A. 2015. Soil moisture estimating with NDVI and land surface temperature and normalized moisture index using MODIS images. *Journal of Water and Soil Conservation*, 4(2): 37-45. (In Persian with English abstract).
- 19- Koster R.D., Suarez M.J. 1995. Relative contributions of land and ocean processes to precipitation variability. *Journal of Geophysical Research*, 100: 13775-13790.
- 20- Koster R.D., Suarez M.J. and Heiser M. 2000. Variance and predictability of precipitation at seasonal to interannual timescales. *Journal of Hydrometeorology*, 1, 26-46.
- 21- Koster R.D., Suarez M.J. 2001. Soil moisture memory in climate models. *Journal of Hydrometeorology*, 2: 558-570.
- 22- Nandintsetseg B. and Shinoda M. 2011. Seasonal change of soil moisture in Mongolia: its climatology and modeling. *International Journal of Climatology*, 31: 1143-1152.
- 23- Narasimhan B., Srinivasan R., Arnold J.G., Di Luzio M. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *American Society of Agricultural Engineers*, 48(3): 1101-1113.
- 24- Pal J.S., and Eltahir E.A.B. 2001. Pathways relating soil moisture conditions to future summer rainfall within a model of the land-atmosphere system. *Journal of Climatology*, 14: 1227-1242.
- 25- Paulo C., Terry J., and Eduardo A. 2009. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97: 635-644.
- 26- Ramezani Etemadi H., Liaqat A., Parsi Nejad M. And Ramezani Etemadi M. 2012. Study of Agricultural Drought Status Based on Soil Moisture at Synoptic Station in Qazvin. *Journal of Water Research in Agriculture*, 1993-93: (1) 26.
- 27- Robock, A., Vinnikov K.Y., Srinivasan G., Entin J.K., Hollinger S.E., Speranskaya N.A. Liu S. and Namkhai A. 2000. The Global Soil Moisture Data Bank. *Bulletin of American Meteorology Society*, 81, 1281-1299.
- 28- Shang, K. Z., Wang, S.G., Ma Y.X., Zhou, Z.J., Wang, J.Y., Liu, H.L., Wang, Y.Q. 2007. A scheme for calculating soil moisture content by using routine weather data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5197-5206.
- 29- Talebi A., and Pourmohammadi S. 2009. Assessment of changes in soil moisture using a physical model of water balance. *Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering Iran, Karaj, Iran Watershed Association*. (in Persian).
- 30- Trajkovic S., and Kolakovic S. 2009. Estimation reference evapotranspiration using limited weather data. *Irrigation and Drainage*. NO.4. ASCE. 433-449.
- 31- Western A.W., and Grayson R. B. 1998. The Tarrawarra data set: Soil moisture patterns, soil characteristics, and hydrological flux measurements. *Water Resource Research*, 34: 2765-2768.
- 32- Yeh T.C., Wetherald R.I., and Manabe S. 1984. The effect of soil moisture on the short term climate and hydrology change-A numerical experiment. *Monthly Weather Review*, 112: 474-490.



## Relationship between Soil Moisture Changes and Climatic Indices in the Mele-Siah Forest Site of Ilam Province

J. Hosseinzadeh<sup>1\*</sup> - A. Tongo<sup>2</sup> - A. Najafifar<sup>3</sup> - A. Hosseini<sup>4</sup>

Received: 23-04-2018

Accepted: 02-07-2018

**Introduction:** Direct monitoring of soil moisture and the extraction of moisture data by point method is not only costly and time-consuming, but in a large scale, is impractical; while drought is a regional phenomenon and requires extensive and regional data to monitor it. Therefore, providing a simple method for monitoring soil moisture on a regional scale is of fundamental importance. Climatological or climatic indicators that are continuously measured and recorded at weather stations can be used as information that is readily available to determine soil surface properties such as temperature and soil moisture. The main objective of this study was to estimate soil moisture under forest cover, using climatic parameters that were recorded from a nearby station. Satellite imagery is currently used to estimate the temperature and moisture status of soil, but it must also be matched with accurate ground data and sufficient weather data stations, so it will not be applicable everywhere.

**Materials and Methods:** Mele-Siah forest habitat in the northwest of Ilam city was selected as the study area in this research. In this regard, in both the southern and northern slopes of Mele-Siah forest site, 18 pairs of humidity sensor at depths of 50, 70 and 110 cm were installed and soil moisture using TDR device was measured monthly. Monthly measurements of soil moisture were performed for three consecutive years and recorded as soil water content. In order to determine the relationship between soil moisture data and meteorological variables, the following 7 variables were extracted from the climatic data available at Ilam Weather Station: rainfall, relative humidity, average temperature, average maximum temperature, average minimum temperature, minimum absolute temperature and maximum absolute temperature. Multiple regression analysis and Pearson correlation coefficient in SPSS software were used to analyze the data and the relationship between soil moisture and climate indices.

**Results and Discussion:** The results indicated that the moisture variations at the soil surface, in comparison to the other depths, are more severe in all the months of the year. Therefore, the humidity drops at a distance of 20 cm between the depths of 70 to 50 cm, much more than 40 cm between the depths of 110 to 70 centimeters. The average moisture content in the months of the year in the direction of the north was more than that one was in the direction of the south. Climatic parameters of each month had high correlations with soil moisture levels of the same month. In this regard, average temperature and relative air humidity showed the highest correlations. Soil moisture in the area is minimized in September. The determination coefficient ( $R^2$ ) for the regression equation was about 0.93, which represented a very good estimation of soil moisture by the model. The highest average humidity was observed in early December and March and its lowest was observed in September. Correlation coefficients between soil moisture content and climatic indices of each month with two months before of them were not significant. However, the correlation coefficients between soil moisture content and climatic indices of the same month and previous month, except for rainfall, was significant. The results showed that we can use meteorological parameters to estimate soil moisture balance in the forests, which continuous and extensive measurement of soil moisture in them is difficult.

**Conclusion:** According to the study, the weather indicators such as average temperature and relative humidity of air whose data are available at weather stations or easy to measurable in remote areas, can be used to estimate soil moisture content under forests cover that do not have the possibility of continuous and extensive soil moisture measurement. Although rainfall was expected to be more strongly correlated with soil moisture content, but it should be noted that rainfall in some dry months is negligible or zero. Incidentally, we often want to estimate the moisture content of the soil, especially in dry months, through measurable parameters, thus the

1 and 3, 4- Associate Professor and Assistant Professors, Research Division of Natural Resources, Ilam Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ilam, Iran

(\*)-Corresponding Author Email: j.hoseinzadeh@gmail.com)

2- Ph.D. candidate at Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University



data of rainfall is not desirable. However, considering the topography of the study area, the distance from the meteorological station and the effect of elevation on soil moisture content may be effective on the accuracy of the results, but the use of data from meteorological stations near area provides the right comparison.

**Keywords:** Forest, Meteorological variables, Soil moisture, TDR device



## ارزیابی عملکرد روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه دو اقلیم متفاوت

جواد رمضانی مقدم<sup>۱\*</sup> - مصطفی یعقوب زاده<sup>۲</sup> - احمد جعفرزاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

### چکیده

فرآیند ریزمقیاس نمایی آماری با هدف ارتقای شبیه‌سازی‌های مدل‌های GCMs و کاربست نتایج آن‌ها در مقیاس محلی انجام می‌شود. در این بین انتخاب متغیرهای ورودی ریزمقیاس نمایی اولین گام مهم این فرآیند می‌باشد. از آنجا که هدف اصلی ریزمقیاس نمایی بهبود شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی می‌باشد، بسیاری از مطالعات روش‌های متنوعی را برای انتخاب متغیرهای ورودی ریزمقیاس نمایی مورد ارزیابی قرار داده‌اند. این مطالعه در نظر دارد تا با استفاده از آزمون‌های مقایسه‌ای جامع، عملکرد شبکه عصبی را در فرآیند ریزمقیاس نمایی بارش روزانه تخت تأثیر چهار روش انتخاب متغیر PCA، CA، SRA و ParCA در اقلیم‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار دهد. بدین منظور در ابتدا داده‌های مشاهداتی ۳۰ ساله مربوط به ایستگاه‌های بیرجند (اقلیم خشک - کویری) و اردبیل (اقلیم سرد - نیمه‌خشک)، حداقل سال‌های ۱۹۷۷-۲۰۰۴ گردآوری شد. به منظور شبیه‌سازی رفتار مؤلفه‌های اقلیمی متأثر از پدیده تغییر اقلیم از خروجی مدل CanESM2 استفاده شد. بدین ترتیب داده‌های بزرگ مقیاس مدل CanESM2 برای هر دو ایستگاه سینوپتیک به منزله متغیرهای ورودی و بازنگری مشاهداتی به عنوان متغیر خروجی در نظر گرفته شد. آزمون‌های مقایسه‌ای شامل شاخص‌های ارزیابی، مقایسه مشخصه‌های آماری، جدول Contingency Table Event جهت تشخیص سری روزهای تر و خشک و مقایسه نموداری توزیع آماری از جمله ابزارهای مورد استفاده در این مطالعه جهت ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف انتخاب متغیر می‌باشد. نتایج مطالعه نشان داد که به طور کلی ریزمقیاس نمایی بارش روزانه در تمامی روش‌های انتخاب متغیر در ایستگاه بیرجند دارای عملکرد بهتری نسبت به ایستگاه اردبیل می‌باشد. همچنین نتایج آزمون‌های مختلف نشان داد که روش‌های انتخاب متغیر CA و ParCA در اقلیم‌های خشک و روش SRA در اقلیم سرد-نیمه‌خشک از عملکرد بهتری برخوردار می‌باشد. بهترین مقادیر شاخص‌های RMSE، R و NSE برای ایستگاه بیرجند به ترتیب ۱/۲ میلی‌متر در روز، ۰/۵۵ و ۰/۲۵ و در ایستگاه اردبیل به ترتیب ۱/۷۵ میلی‌متر در روز، ۰/۱۴ و ۰/۱۳ بدست آمد. ارزیابی روش‌ها در تشخیص درست روزهای تر و خشک در بیرجند نشان داد که دقت روش‌های CA و ParCA به ترتیب ۲۵ و ۲۲ درصد می‌باشد. این بدان معنی است که روش CA توانسته است ۲۵ روزهای تر را به درستی تر تشخیص دهد.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل مؤلفه‌های اصلی، دوره‌های تر و خشک، کاهش ابعاد ورودی، همبستگی جزئی و CanESM2

### مقدمه

رفتار مؤلفه‌های اقلیمی متأثر از پدیده تغییر اقلیم از آن یاد می‌شود، خروجی مدل‌های GCMs<sup>۴</sup> می‌باشد. این مدل‌ها عمدتاً در مراکز هواشناسی و مطالعات فضایی کشورهای توسعه یافته تدوین شده‌اند. مرکز IPCC هر ۴ یا ۵ سال با استفاده از خروجی این مدل‌ها تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی را در سطح کره زمین و در قالب گزارش‌های ارزیابی ارائه می‌کند. این مدل‌ها سطح کره زمین را به صورت نقاط شبکه‌بندی شده مدل‌سازی می‌کنند و خروجی‌های خود را در مرکز این نقاط ارائه می‌کنند. فاصله این نقاط شبکه‌بندی شده که نشان دهنده دقت مدل‌های GCMs می‌باشد بسیار زیاد بوده و برای شبیه‌سازی رفتار مؤلفه‌های اقلیم در مقیاس محلی و ایستگاهی مناسب نمی‌باشند. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب در یک منطقه خاص

در حال حاضر شواهد زیادی مبنی بر وقوع پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای آن وجود دارد. IPCC<sup>۳</sup> در گزارش‌های ارزیابی خود افزایش دمای کره زمین را بیان نموده است (۱۶، ۱۷ و ۳۴). از طرفی دیگر مهم‌ترین و مطمئن‌ترین ابزاری که در مجامع علمی برای شبیه‌سازی

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(\*) نویسنده مسئول: (Email: j\_ramezani@uma.ac.ir)

۲ و ۳- استادیار و دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.72732

3- Intergovernmental Panel on Climate Change

بسیاری از پژوهش‌های انجام شده برای انتخاب متغیر از آزمون  $CA^5$  استفاده نموده‌اند (۱۳ و ۲۷). به عنوان مثال مطالعه چن و همکاران (۴) که با هدف بررسی پیامدهای تغییر اقلیم بر روی رواناب حوضه بالادست هانجیانگ<sup>۶</sup> کشور چین انجام شده است، جهت انتخاب متغیرهای ورودی  $SVM^7$  و  $SDSM^8$  از روش  $CA$  استفاده نموده‌اند (۴). همچنین در مطالعه مینیو و همکاران (۲۴) نیز برای انتخاب متغیرهای ورودی به  $SDSM$  جهت ریزمقیاس نمایی بارش روزانه و ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم بر حوضه آبریز تونگاپهادرا (Tungabhadra) کشور هندوستان از روش  $CA$  بهره گرفته شده است (۲۴). در مطالعه ناصری و همکاران (۲۶) که با هدف ارزیابی روش‌های ریزمقیاس نمایی در شبیه‌سازی بارش روزانه انجام شد، متغیرهای ورودی جهت ریزمقیاس نمایی با استفاده از روش  $ParCA^9$  انتخاب شدند. در پژوهش آن‌ها که از خروجی مدل  $HadCM3$  تحت دو سناریوی  $A2$  و  $B2$  به منظور شبیه‌سازی بارش روزانه بهره گرفته شده بود، متغیرهای رطوبت نسبی و سرعت ناحیه‌ای در ارتفاع‌های متفاوت ژئوپتانسیل به عنوان متغیر ورودی برگزیده شدند (۲۶). روش رگرسیون گام به گام  $SRA^{10}$  بعد از روش  $CA$  بیشترین کاربرد را در مطالعات مربوط به ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های  $GCMs$  دارا می‌باشد. روش‌های مبتنی بر رگرسیون عموماً به دنبال پیدا نمودن مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل می‌باشند که مجذور خطای معادله رگرسیونی آن‌ها با متغیر وابسته حداقل شود. خاشعی و همکاران (۲۱) و پژوهش‌های هات (۱۵)، حسامی و همکاران (۱۴) و چن و همکاران (۵) از جمله تحقیقاتی می‌باشند که جهت انتخاب متغیرهای ورودی به ریزمقیاس نمایی از روش  $SRA$  استفاده نمودند (۲۱ و ۵). مطالعه حسامی و همکاران (۱۴) به منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌های حدی در شرق کانادا با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی  $CGCMS1$ ، از ریزمقیاس نمایی  $SDSM$  بهره گرفتند. آن‌ها در مطالعه خود جهت انتخاب متغیرهای ورودی به  $SDSM$  از روش  $SRA$  استفاده نمودند (۱۴). همچنین مطالعه چن و همکاران (۱۴) به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه‌های هی<sup>۱۱</sup> چین، از خروجی مدل  $HadCM3$  تحت سناریوهای  $A2$  و  $B2$  استفاده نمودند. روش ریزمقیاس نمایی آن‌ها  $SDSM$  و متوسط درجه حرارت، تبخیر و بازنگی به عنوان متغیرهای اقلیمی مورد ارزیابی واقع شدند (۵). همچنین بعضی از مطالعات نظیر هارفام و

لازم است تا خروجی این مدل‌ها در مقیاس محلی و یا منطقه‌ای تبدیل گردد (۳۱). به تبدیل شبیه‌سازی مدل‌های  $GCMs$  از مقیاس‌های جهانی به محلی، ریزمقیاس نمایی گفته می‌شود. در حالت کلی ریزمقیاس نمایی در دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شود: آماری و دینامیکی. روش دینامیکی بر پایه شبیه‌سازی مدل‌های  $RCM^1$  می‌باشد. مدل‌های  $RCM$  در مقایسه با مدل‌های  $GCMs$  دارای دقت بالاتری می‌باشند. این بدین جهت می‌باشد که این مدل‌ها خروجی مدل‌های  $GCMs$  را بهبود داده و شبیه‌سازی‌های خود را برای یک منطقه خاص پیاده‌سازی کرده‌اند. البته این دقت بالای ریزمقیاس نمایی دینامیکی در کنار هزینه و زمان بیشتر، نیاز به فناوری و صنعت بالا دارد (۲ و ۳۰). این محدودیت‌ها باعث شده است که عمده پژوهش‌های مربوط به بررسی پیامدهای تغییر اقلیم جهت ریزمقیاس نمایی متوجه روش‌های آماری باشد. روش‌های آماری با ایجاد یک رابطه بین خروجی مدل‌های  $GCMs$  و متغیرهای اقلیمی عمل می‌کنند (۳۶). روش‌های آماری به سه دسته مولدهای اقلیمی<sup>۲</sup>، توابع انتقال<sup>۳</sup> و الگوهای هواشناسی<sup>۴</sup> تقسیم می‌شوند. به دلیل توسعه برنامه‌های رایانه‌ای و افزایش قدرت شبیه‌سازی مبتنی بر برنامه‌نویسی، توابع انتقال توجه بخش زیادی از پژوهش‌ها را به خود اختصاص داده است. توابع انتقال با استفاده از رگرسیون‌های خطی و غیرخطی، در پی مدل‌سازی بین متغیرهای بزرگ مقیاس (خروجی مدل‌های  $GCMs$ ) و متغیرهای کوچک مقیاس محلی می‌باشند (۶). در ریزمقیاس نمایی به روش توابع انتقال خروجی مدل‌های  $GCMs$  به عنوان ورودی و مؤلفه‌های اقلیمی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. در این بین آنچه که حایز اهمیت است، انتخاب متغیرهای بزرگ مقیاس مناسب جهت پیدا نمودن رابطه آماری با متغیرهای محلی می‌باشد. در تحقیقات مربوط به ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در حوضه منابع آب که مبتنی بر روش‌های توابع انتقال می‌باشد، اولین گامانتخاب متغیرهای ورودی یا پیش‌بینی‌کننده‌ها می‌باشد. انتخاب متغیرهای ورودی در مطالعات گذشته بر اساس دانش و آگاهی محقق انجام می‌شد و اخیراً بر اساس روابط آماری موجود بین متغیرهای ورودی و خروجی می‌باشد. در ادامه سعی شده است تا ضمن مروری جامع، اکثر روش‌های انتخاب متغیر در مطالعات ریزمقیاس نمایی متغیرهای اقلیمی مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی مطالعات انجام شده در مقوله ریزمقیاس نمایی نشان می‌دهد که به دلیل این‌که یکی از مهم‌ترین معیارهای انتخاب متغیرهای ورودی برای فرآیند ریزمقیاس نمایی، داشتن همبستگی بسیار قوی با داده‌های اقلیمی می‌باشد (۳۳)،

5-Correlation Analysis

6-Hanjiang

7-Support Vector Machine

8-Statistical Downscaling Model

9-Partial Correlation Analysis

10-Stepwise Regression Analysis

11-Haihe

1- Regional climate model

2-Weather Generator

3-Transfer Function/ Data Driver/ Black Box

4-Weather Pattern

و LASSO<sup>۸</sup> در ریزمقیاس نمایی بارش نه ایستگاه واقع در جنوب ایالت کبک<sup>۹</sup> کشور کانادا انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد زمانی که بین متغیرهای ورودی همبستگی قابل توجهی وجود داشته باشد، ریزمقیاس نمایی بر اساس روش LASSO دارای دقت بهتری نسبت به روش SRA می‌باشد (۱۱).

بر اساس دانش نویسندگان این پژوهش و بررسی منابع ارایه شده، معلوم گردید که کمتر مطالعه‌ای مبادرت به مقایسه اثرات روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های GCMs در اقلیم‌های مختلف نموده است. مطالعه پیش‌رو به منظور ریزمقیاس نمایی بارش روزانه، روش‌های انتخاب متغیر متفاوتی را در دو اقلیم متفاوت خشک-کوبری و سرد-نیمه‌خشک مورد مقایسه قرار داده است. همچنین در این مطالعه از آخرین خروجی مدل‌های گردش عمومی مبتنی بر گزارش پنجم IPCC جهت شبیه‌سازی رفتار مؤلفه‌های اقلیمی استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه و توصیف داده‌ها

شهرستان بیرجند مرکز استان خراسان جنوبی در شمال رشته کوه‌های باقران و در محدوده‌ی ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه و صفر ثانیه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۲ دقیقه و صفر ثانیه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. میانگین کمینه و بیشینه دمای سالانه بیرجند به ترتیب ۸ و ۲۴ درجه سانتی گراد، بارش سالانه ۱۲۰ میلی‌متر و میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل ۲۷۰۰ میلی‌متر است. بر اساس شاخص‌های اقلیم دوما رتن و ایوانف، شهر بیرجند دارای اقلیم خشک-کوبری می‌باشد (۱۸).

دشت اردبیل مشرف بر ارتفاعات بخش غربی رشته کوه البرز (ارتفاعات تالش)؛ در محدوده ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه و صفر ثانیه طول جغرافیایی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه و صفر ثانیه عرض جغرافیایی و در امتداد دامنه شرقی سبلان واقع شده است. مساحت آن حدود ۹۹۰ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه در ایستگاه سینوپتیک اردبیل حدود ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد بیشترین و کمترین بارش به ترتیب در ماه‌های اردیبهشت و مرداد اتفاق می‌افتد. میانگین دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک اردبیل ۷ درجه سانتی گراد است و یکی از نواحی سردسیر ایران محسوب می‌شود. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دوما رتن و ایوانف، شهر اردبیل دارای اقلیم سرد-نیمه‌خشک می‌باشد (۳۲).

در پژوهش‌های تغییر اقلیم دو نوع داده در نظر گرفته می‌شود: داده‌های مشاهداتی- پیش‌بینی شونده و داده‌های مدل‌های GCMs -

ویلبای (۱۲) با استفاده از چندین روش ترکیبی سعی نموده‌اند تا بهترین متغیرهای ورودی را جهت ریزمقیاس نمایی انتخاب نمایند. آن‌ها در مطالعه خود از روش‌های SRA<sup>۱</sup>، GA<sup>۱</sup> و یک روش مبتنی بر بر فاصله اطمینان، متغیرهای ورودی شبکه عصبی (Artificial Neural Network-ANN) و SDSM را جهت ریزمقیاس نمایی بارش روزانه انتخاب نمودند (۱۲). همچنین فیستوگلو و اوکان (۹) در مطالعه خود براساس شاخص‌های NSE<sup>۲</sup> و ضریب ملو<sup>۳</sup> تمام ترکیب‌های ممکن برای ورود به ریزمقیاس نمایی بارش روزانه را رتبه‌دهی نمودند و در نهایت ترکیبی که بیشترین امتیاز را داشت به عنوان ورودی‌های ریزمقیاس نمایی انتخاب نمودند (۹). دسته‌ای دیگر از مطالعات ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی نیز می‌باشند که از روش‌های متفاوتی نظیر PCA<sup>۴</sup>، Gamma Test و ICA<sup>۵</sup> جهت انتخاب متغیرهای ورودی استفاده نموده‌اند. به عنوان مثال کاویانی و میررکنی (۱۹) در پژوهش خود به منظور پیش‌بینی دمای میانگین روزانه ایستگاه همدیدی شهرستان یزد از روش ANN استفاده نمودند. آن‌ها در مطالعه خود با استفاده از روش PCA، از میان داده‌های ساعت آفتابی، تندی باد، بارش روزانه، رطوبت نسبی، فشار مطلق و تبخیر روزانه اقدام به انتخاب بهترین متغیرهای ورودی به ANN نمودند (۱۹). مطالعه نجفی و همکاران (۲۵) از روش ICA برای گزینش بهترین متغیرهای ورودی ریزمقیاس نمایی بارش روزانه با استفاده از مدل ANFIS و SVM در حوضه ویلامت<sup>۶</sup>، بهره گرفتند (۲۵).

بررسی منابع نشان می‌دهد که اکثر مطالعات صرفاً به کاربرد روش‌های مختلف انتخاب متغیر اکتفا نموده‌اند و پژوهش‌های کمی در خصوص مقایسه اثرات این روش‌ها در عملکرد ریزمقیاس نمایی انجام شده است. مطالعه یانگ و همکاران (۳۷) از جمله این معدود مطالعات به شمار می‌رود. این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد روش‌های CA<sup>۷</sup>، ParCA<sup>۷</sup> و SRA در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه در نواحی شمالی کشور چین انجام شده است. در این مطالعه وی با استفاده از آزمون‌های مقایسه‌ای متعدد اثرات هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر را در بهبود نتایج مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که روش SRA در ریزمقیاس نمایی بارش اثرات مطلوب‌تری نسبت به دو روش دیگر دارد (۳۷). همچنین مطالعه همایی و همکاران (۱۱) نیز با هدف مقایسه عملکرد روش‌های SRA

- 1-Genetic Algorithm
- 2-Nash Sutcliffe Efficiency
- 3-Mallow Coefficient
- 4-Principal Component Analysis
- 5-Independent Component Analysis-
- 6-Willamette
- 7-Partial Correlation Analysis

8-Least Absolute Shrinkage And Selection Operator-LASSO

9-Québec

ورودی به نحوی صورت پذیرد تا بین پیش‌بینی‌کننده‌ها و متغیر مورد نظر (پیش‌بینی شونده) همبستگی قوی وجود داشته و از حیث مشخصات فیزیکی ارتباط معنی‌داری داشته باشند. همچنین بهتر است مجموعه پیش‌بینی‌کننده‌ها شامل متغیرهایی باشند که توصیف کاملی از رطوبت، گردش هوا و ارتباط بین لایه‌های مختلف جو بالای زمین را دارا باشند (۳۳). همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، در این مطالعه با استفاده از خروجی مدل CanESM2، تعداد ۲۶ متغیر بزرگ مقیاس به عنوان پیش‌بینی‌کننده انتخاب شدند. این ۲۶ متغیر که در (جدول ۱) ارایه شده‌اند، به صورت روزانه و در سطوح مختلف زمین موجود می‌باشند. با توجه به اینکه هدف اصلی مطالعه پیش‌رو، ارزیابی اثرات روش‌های مختلف انتخاب متغیر ورودی در ریزمقیاس نمایی آماری بارش روزانه می‌باشد، در ادامه توضیحات مربوط به ۴ روش SRA، PCA، CA و ParCA ارایه می‌شود.

### روش SRA

این روش می‌تواند به دو صورت اضافه کردن متغیرهای وابسته (پیش‌رو) و یا حذف آن‌ها (پس‌رو) از معادله رگرسیون انجام شود. برای شروع ابتدا یک مدل بر متغیر مستقل برازش داده می‌شود. در ادامه برای انتخاب متغیرهای ورودی به مدل لازم است تا یک فرآیند تکراری انجام شود. تمامی متغیرها لازم است تا یک مدل بر متغیر وابسته برازش دهند و مقدار آماره  $\rho - value$  برای ضریب رگرسیونی تخمین زده توسط آن‌ها تعیین گردد. در اولین گام متغیری وارد مدل خواهد شد که مقدار  $\rho - value$  آن از حد ورودی کمتر بوده و ضمناً کمترین مقدار  $\rho - value$  را در بین متغیرهای مستقل دارا باشد. در گام‌های بعدی نیز نحوه ورود متغیرها نیز به همین شکل خواهد بود. لکن در هر گام چنانچه مقدار  $\rho - value$  متغیری از حد خروجی بیشتر باشد از مدل خارج خواهد شد (۷). همچنین در هر گام مقدار ضریب اختصاص داده شده به هر متغیر، و مقدار خطای برآورد مشخص می‌شود.

### روش PCA

رویکرد PCA نوعی از تجزیه و تحلیل آماری است که تعداد کمتری از مجموعه اولیه را به نام مؤلفه‌های اصلی از میان متغیرهای اولیه گزینش می‌کند، به‌طوری‌که بیشترین (ضروری‌ترین) اطلاعات مجموعه اولیه حفظ شده و از مابقی اطلاعات غیر ضروری صرفه‌نظر می‌شود. در این روش با استفاده از  $n$  متغیر  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  مجموعه اولیه‌ی داده‌ها ( $X$ ) تعداد  $p$  متغیر مستقل به صورت  $PC_1, PC_2, PC_3, \dots, PC_p$  ایجاد می‌شود. رابطه (۱) چگونگی تشکیل متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد:

$$PC_j = \sum_{i=1}^n W_{i,j} x_i \rightarrow j = 1 : p \quad (1)$$

پیش‌بینی‌کننده. متغیرهای پیش‌بینی شونده همان مؤلفه‌های اقلیم می‌باشند که در ایستگاه‌های هواشناسی و در مقیاس محلی ثبت می‌شوند. داده‌های پیش‌بینی‌کننده، متغیرهای مستقلی می‌باشند که توصیف‌کننده وضعیت رطوبت، چرخش هوا و دمای اتمسفر در سطوح مختلف ارتفاعی می‌باشند. مقیاس داده‌های پیش‌بینی‌کننده بسیار بزرگ بوده و عموماً به آن‌ها داده‌های بزرگ مقیاس اطلاق می‌شود. همچنین باید توجه نمود که به‌منظور ارزیابی توانمندی مدل‌های GCMs، خروجی این مدل‌ها همواره برای ۲ دوره تاریخی و آینده ارایه می‌شود. دوره تاریخی شامل مقادیر متغیرهای پیش‌بینی در ۳۰ سال گذشته می‌باشد. طبق توصیه IPCC دوره تاریخی بین سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰ می‌باشد. اما به دلیل اینکه در این بازه زمانی ممکن است که برخی از ایستگاه‌های هواشناسی فعال نبوده و ثبت داده صورت نمی‌گرفته است، لذا خروجی مدل‌های GCMs تا سال ۲۰۰۵ برای دوره تاریخی در نظر گرفته می‌شود. دوره آینده نیز از ابتدای سال ۲۰۰۶ تا انتهای سال ۲۰۹۹ می‌باشد. در این پژوهش ابتدا داده‌های مشاهداتی بارش روزانه حداث سال‌های ۱۹۷۷ تا انتهای سال ۲۰۰۴ در ۲ ایستگاه سینوپتیک بیرجند و اردبیل به عنوان دوره تاریخی و مدل Canadian Earth System Model (CanESM2) (Canadian Climate Data and Model) به عنوان مدل GCMs در نظر گرفته شد. این مدل که محصول مرکز اقلیم‌شناسی (www.ccds-dscc.ec.gc.ca) می‌باشد، کل سطح زمین را به‌منظور شبیه‌سازی مقادیر اقلیمی به ۱۲۸ گره افقی و ۶۴ گره عمودی تقسیم نموده است. از این رو فاصله افقی و عمودی هر گره حدوداً ۲/۸۱۲۵ درجه می‌باشد. در حال حاضر این پایگاه در کنار مقادیر روزانه مدل CanESM2، شبیه‌سازی‌های ماهانه کلیه مدل‌های GCMs را برای بارندگی، متوسط درجه حرارت، سرعت باد و غیره در اختیار کاربران قرار می‌دهد. بدین ترتیب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس برای حداث سال‌های ۱۹۷۷ الی ۲۰۰۴ میلادی از این پایگاه استخراج گردید و سال‌های ۱۹۷۷ الی ۱۹۹۵، ۱۹۹۶ الی ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ الی ۲۰۰۴ میلادی به‌ترتیب به عنوان دوره آموزش، صحت‌سنجی و آزمون فرض شد.

### انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها

در ریزمقیاس نمایی آماری به روش توابع انتقال، بین متغیرهای بزرگ مقیاس پیش‌بینی‌کننده و مؤلفه‌های اقلیمی مشاهداتی یک ارتباط ایجاد می‌شود. اینکه تمام و یا بخشی از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برای ایجاد ارتباط با داده‌های مشاهداتی استفاده شود، تحت عنوان انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و یا متغیرهای ورودی شناخته می‌شود. انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها اولین گام ریزمقیاس نمایی آماری محسوب می‌شود. در حالت کلی باید اهتمام داشت انتخاب متغیرهای

جدول ۱- جزئیات متغیرهای پیش‌بینی کننده

Table 1- Details of predictor variables utilized

| ارتفاع<br>Level (hPa) | چرخش<br>Circulation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | رطوبت<br>Humidity                                                                                                              | دما<br>Temperature                           |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| سطح زمین<br>Surface   | X1- میانگین فشار سطح دریا<br>Mean sea level pressure (mslp)<br>X2- سرعت جریان هوای زمین گرد<br>Geostrophic air flow velocity (p1_f)<br>X3- سرعت نصف‌النهاری-عرض<br>Meridional velocity component (p1_v)<br>X4- سرعت ناحیه‌ای-طول<br>Zonal velocity component (p1_u)<br>X5- چرخش هوا<br>Vorticity (p1_z)<br>X6- جهت باد<br>Wind direction (p1th)<br>X7- دیوژانس<br>Divergence (p1zh) | X22- رطوبت نسبی<br>Near surface relative humidity (rhum)<br>X25- رطوبت ویژه نزدیک سطح<br>Near surface specific humidity (shum) | X26- دمای میانگین<br>Mean temperature (temp) |
| 500 hPa               | X8- سرعت جریان هوای زمین گرد<br>Geostrophic air flow velocity (p5_f)<br>X9- سرعت نصف‌النهاری-عرض<br>Meridional velocity component (p5_v)<br>X10- سرعت ناحیه‌ای-طول<br>Zonal velocity component (p5_u)<br>X11- چرخش هوا<br>Vorticity (p5_z)<br>X12- جهت باد<br>Wind direction (p5th)<br>X13- دیوژانس<br>Divergence (p5zh)<br>X20- ارتفاع ژئوپتانسیل<br>Geopotential height (p500)    | X23- رطوبت ویژه<br>Specific humidity (s500)                                                                                    |                                              |
| 850 hPa               | X14- سرعت جریان هوای زمین گرد<br>Geostrophic air flow velocity (p8_f)<br>X15- سرعت نصف‌النهاری-عرض<br>Meridional velocity component (p8_v)<br>X16- سرعت ناحیه‌ای-طول<br>Zonal velocity component (p8_u)<br>X17- چرخش هوا<br>Vorticity (p8_z)<br>X18- جهت باد<br>Wind direction (p8th)<br>X19- دیوژانس<br>Divergence (p8zh)<br>X21- ارتفاع ژئوپتانسیل<br>Geopotential height (p850)  | X24- رطوبت ویژه<br>Specific humidity (s850)                                                                                    |                                              |

\*انتخاب شده از (۲۲).

(تغییر پذیری) مربوط به مجموعه اولیه را در برداشته باشد و مولفه‌ی اصلی دوم ( $PC_2$ ) نیز بیشترین واریانس در نظر گرفته نشده توسط مولفه اول را شامل شود. این روند تا انتها برای کلیه مؤلفه‌های اصلی

در رابطه (۱)،  $x_i$ : معرف اُمین متغیر اولیه و  $W_{ij}$ : ضریب  $i$  اُمین متغیر اولیه در اُمین مؤلفه اصلی ( $PC_j$ ) می‌باشد. ضرایب  $W$  به نحوی تعیین می‌شوند که اولین مولفه‌ی اصلی ( $PC_1$ ) بیشترین واریانس

### ریزمقیاس نمایی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

معرفی شبکه عصبی توسط توسط مک کولاک و پیتس در سال ۱۹۴۳ انجام شد (۲۳). اما توسعه این روش و کاربردهای گسترده آن از ابتدای سال ۱۹۸۶ توسط راملهارت و همکاران انجام شد (۲۹). شبکه‌های عصبی با اقتباس از عملکرد مغز انسان پیاده‌سازی شده‌اند. در این شبکه‌ها، نرون‌ها به عنوان دریافت کننده اطلاعات عمل می‌کنند. هر نرون به عنوان کوچکترین واحد عملیاتی شبکه عصبی، با استفاده از ضرایبی که به هر کدام از اطلاعات ورودی اختصاص می‌دهد بخشی از اطلاعات ورودی به شبکه عصبی را دریافت نموده و مجموعه نرون‌ها در کنار یکدیگر، یک تحلیل از واقعیت پیرامون خود را ایجاد می‌کنند. این تحلیل از اطلاعات منجر به یک خروجی (داده‌های مشاهداتی) می‌شود و عموماً با یک خطا همراه می‌باشد که از آن تحت عنوان خطای شبیه‌سازی شبکه عصبی یاد می‌شود. اطلاعات ورودی، نرون‌ها و خروجی هر کدام در یک لایه قرار دارند. یک شبکه عصبی یا می‌تواند به صورت ساده شامل یک لایه برای ورود اطلاعات، یک لایه برای نرون‌ها و یک لایه برای شبیه‌سازی خروجی باشد؛ و یا اینکه به صورت ترکیبی از چندین لایه شبکه عصبی تنظیم شود (۱۰).

در صورتی که یک شبکه عصبی به صورت ترکیبی از چندین لایه باشد، تخمین لایه اول با یک تابع انتقال به عنوان ورودی لایه دوم اعمال می‌شود. نرون‌های موجود در لایه دوم اطلاعات ورودی به این لایه را همراه با خطای مشخصی تخمین خواهند زد. خروجی لایه دوم نیز از طریق یک تابع انتقال و به عنوان ورودی به لایه بعدی معرفی می‌گردد. بدین ترتیب به تعداد لایه‌های موجود در شبکه عصبی، اطلاعات ورودی به شبکه عصبی مورد تحلیل واقع می‌شود و در آخرین لایه شبیه‌سازی شبکه عصبی با خروجی واقعی مقایسه می‌شود (۲۰). عموماً در مطالعات مربوط به کاربرد شبکه عصبی لایه‌های میانی شبکه عصبی را لایه‌های پنهان نام‌گذاری می‌کنند و مجموعه لایه‌های پنهان، نرون‌ها و توابع انتقال و آموزش را تحت عنوان معماری شبکه عصبی بیان می‌کنند. لازم به ذکر است که مطالعات بسیار زیادی وجود دارد که جهت رسیدن به جواب‌های بهتر در شبکه عصبی، از معماری‌های سنگین استفاده نموده‌اند. درعین حال مطالعات زیادی نیز وجود دارند که برای رسیدن به یک جواب مطلوب در شبکه‌های عصبی از معماری‌های سبک استفاده نموده‌اند (۱). آنچه برای عملکرد یک شبکه عصبی حایز اهمیت است، تخمین دقیقی خروجی می‌باشد. تخمین شبکه عصبی تابعی از دو مقوله می‌باشد: نخست اطلاعاتی است که از داده‌های ورودی دریافت نموده و دیگر تحلیل دقیق نرون‌ها به نحوی که خطای شبیه‌سازی حداقل شود. تخمین شبکه عصبی به طور کاملاً مستقیم به ضرایب نرون‌ها در هر لایه مربوط می‌شود. به منظور بهینه‌یابی این ضرایب از یک تابع

در نظر گرفته می‌شود. به منظور تعیین ضرایب هر کدام از مؤلفه‌های اصلی مراحل زیر انجام شد:

۱- استانداردسازی داده‌ها به نحوی که میانگین و انحراف معیار داده‌ها به ترتیب به صفر و یک متمایل شود. ۲- ماتریس همبستگی (کوواریانس): میزان همبستگی بین متغیرهای اولیه در این ماتریس مشخص می‌شود. با تعیین مقادیر ویژه این ماتریس می‌توان ضرایب مؤلفه‌های اصلی را برآورد نمود. ۳- در نهایت با بررسی این که هر کدام از مؤلفه‌های اصلی چه میزان از واریانس مجموعه اصلی را دربر گرفته است، می‌توان تعداد مؤلفه‌های اصلی را مشخص نمود. در این مطالعه حد ۹۰ درصد از واریانس متغیرهای پیش‌بینی کننده به عنوان آستانه انتخاب تعداد مؤلفه‌های اصلی انتخاب شد.

### CA

این آزمون براساس ضریب همبستگی بین داده‌های بزرگ مقیاس و مشاهداتی انجام می‌شود. در این پژوهش بر اساس ضریب همبستگی پیرسون (Pearson) میزان همبستگی بین متغیرها و بارندگی مشاهداتی اندازه‌گیری می‌شود. فرض صفر مبنی بر عدم وجود همبستگی می‌باشد و سطح معنی‌داری ۹۵ درصد مورد نظر می‌باشد. رابطه (۲) ضریب همبستگی پیرسون را نشان می‌دهد (۲۷):

$$R_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x} \right) \cdot \left( \frac{y_i - \mu_y}{\sigma_y} \right) \right] \quad (2)$$

در رابطه (۲)  $x$ : متغیر پیش‌بینی کننده و  $y$ : بارندگی مشاهداتی،  $n$ : تعداد داده‌ها،  $\sigma$ : انحراف از معیار و  $\mu$ : میانگین داده‌ها می‌باشد. همچنین منظور از  $Cov$  کوواریانس بین ۲ متغیر  $x$  و  $y$  می‌باشد.

### روش ParCA

در این روش انتخاب متغیر بر اساس ضرایب همبستگی جزئی بیان می‌شود. این آزمون همبستگی بین دو متغیر را با برداشتن اثر سایر متغیرها، بیان می‌کند. سطح معنی‌داری و کیفیت فرض صفر مشابه آزمون همبستگی می‌باشد. همبستگی بین دو متغیر پیش‌بینی کننده ( $y$ ) و بارندگی مشاهداتی ( $x$ ) درحالی که اثر سایر متغیرهای پیش‌بینی کننده برداشته شده باشد، طبق رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz} \cdot R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2) \cdot (1 - R_{yz}^2)}} \quad (3)$$

در رابطه فوق  $R$  ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد. در این مطالعه از میان متغیرهایی که همبستگی معنی‌داری با بارش روزانه داشته باشند، متغیرهایی که بیشترین ضریب همبستگی و همبستگی جزئی را دارا باشند، انتخاب شدند. در واقع متغیرهایی انتخاب می‌شوند که دارای بیشترین معنی‌داری با مقادیر بارش روزانه می‌باشند.

متعددی استفاده شد. در ابتدا میزان دقت ریزمقیاس نمایی تحت تأثیر هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر با شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفت. این شاخص‌ها که از جمله پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی در مطالعات تغییر اقلیم می‌باشند در روابط (۴) تا (۶) ارائه شده‌اند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$R = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \times (Y_i - \bar{Y}) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (6)$$

در روابط فوق  $X$  و  $Y$  به ترتیب مقادیر بارندگی روزانه مشاهداتی و ریزمقیاس شده،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  به ترتیب میانگین این مقادیر و  $n$  تعداد داده‌های باشد. پژوهش‌های همایی و همکاران (۱۱)، یانگ و همکاران (۳۷)، هارفام و ویلیام (۱۲) و ناصری و همکاران (۲۶) از جمله پژوهش‌هایی می‌باشند که در مطالعه خود از این شاخص‌ها بهره گرفته‌اند. بعد از محاسبه شاخص‌های ارزیابی از چند آزمون مقایسه‌ای جهت تعیین برتری روش‌های مختلف انتخاب متغیر استفاده شد. مقایسه مشخصه‌های آماری، مقایسه نمودار چگالی و توزیع فراوانی با استفاده از Violin Plot و بررسی توانمندی روش‌ها در تشخیص سری‌های تر و خشک با استفاده از Contingency Table Event از جمله این آزمون‌های باشد.

لازم به ذکر است که جهت تخمین روزهای تر و خشک با استفاده از Contingency Table Event، حد آستانه روز تر و خشک معادل ۱ میلی‌متر در روز در نظر گرفته شد (۲۸). در واقع این جدول مقایسه روزهای تر و خشک مشاهداتی و شبیه‌سازی را به صورت متقابل نشان می‌دهد (۳). به منظور کمی کردن دقت روش‌های مختلف انتخاب متغیر از شاخص  $CSI^4$  استفاده شد (۲۸):

$$CSI = \frac{Hit}{Hit + Miss + False\ alarm} \quad (7)$$

در رابطه فوق، Hit: تعداد تشخیص صحیح روز تر، Miss: تشخیص اشتباه در روز تر و False alarm: تشخیص اشتباه در روز خشک می‌باشد. این شاخص نسبت تعداد تشخیص‌های درست روزهای تر را نشان می‌دهد و چنانچه روزهای تر به درستی تشخیص داده شوند، روزهای خشک مشاهداتی نیز به درستی شبیه‌سازی خواهند شد. در واقع اگر تعداد تشخیص‌های اشتباه به سمت صفر میل

آموزش استفاده می‌شود. توابع آموزش ضرایب نرون‌ها را در یک بهینه‌سازی خطی به نحوی تعیین می‌کند تا شبکه عصبی دارای کمترین خطای تخمین شود. در کنار توابع آموزش، یکی دیگر از مهم‌ترین اقداماتی که سبب توسعه شبکه عصبی شده است، کاربست الگوریتم پس انتشار خطا<sup>۱</sup> BPA می‌باشد. الگوریتم BPA بدین مفهوم می‌باشد که شبکه عصبی پس از یک بار تخمین مقدار خروجی، خطای شبیه‌سازی را بهبود بخشد. فرآیند بهبود خطای شبیه‌سازی از طریق انتشار خطا در لایه‌های مختلف شبکه عصبی می‌باشد. در این روش درصدهای مختلف خطای شبیه‌سازی به نحوی در لایه‌های مختلف پخش (انتشار) می‌شود که مقدار کل خطا در شبیه‌سازی بعدی به حداقل برسد. اگر فرآیند انتشار خطا از لایه نخست به سمت انتهایی‌ترین لایه باشد، به آن پیش‌رو و چنانچه از انتهایی‌ترین لایه به سمت اول صورت پذیرد به آن پس‌رو اطلاق می‌شود (۲۹).

در این مطالعه معماری شبکه عصبی بدین صورت پیاده‌سازی شد که: داده‌های بزرگ مقیاس انتخاب شده توسط هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر به عنوان ورودی، بارندگی روزانه به عنوان خروجی، تعداد سه لایه‌ی پنهان، تعداد سه نرون در هر لایه‌ی پنهان، تابع لونیگ‌مارکوارت<sup>۲</sup> جهت آموزش نرون‌ها در تخمین ضرایب، تابع محرکه تانژانت سیگموئید<sup>۳</sup> به عنوان تابع انتقال لایه‌های پنهان، تابع محرکه خطی به عنوان تابع انتقال در لایه خروجی (آخرین لایه) و تعداد تکرارهای شبیه‌سازی شبکه عصبی ۵۰۰ مرتبه در نظر گرفته شد. همچنین به منظور جلوگیری از اتلاف وقت و با توجه به احتمال قرارگیری الگوریتم آموزش در بهینه‌های محلی تعیین مقادیر بهینه ضرایب، سعی شد تا از شرایط خاتمه استفاده شود. شرط خاتمه در این مطالعه تعداد ۲۰ مرتبه عدم بهبود در تکرارهای شبکه عصبی می‌باشد. بدین ترتیب چنانچه الگوریتم شبکه عصبی در ۲۰ تکرار متوالی بهبود خاصی در عملکرد شبکه عصبی نداشت، خاتمه خواهد یافت. همچنین انتخاب معماری سه لایه پنهان همراه با ۳ نرون بدین جهت می‌باشد که با سعی و خطاهای مختلف در اجرای کد شبکه عصبی مشخص شد که افزایش تعداد لایه‌های پنهان و تعداد نرون‌ها، موجب بهبود معنی‌دار عملکرد شبکه عصبی نمی‌شود.

### ارزیابی عملکرد

پس از مشخص شدن متغیرهای ورودی به شبکه عصبی جهت ریزمقیاس نمایی کردن بارش روزانه، به منظور تشخیص تأثیر هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر بر فرآیند ریزمقیاس نمایی از آزمون‌های

- 1-Back Propagation Algorithm
- 2-Levenberg-Marquardt
- 3-Hyperbolic tangent sigmoid

4-Critical Success Index



کند، شاخص CSI به بیشترین مقدار خود خواهد رسید.

## نتایج و بحث

در ابتدا به بررسی متغیرهای انتخاب شده در هر کدام از روش‌های انتخاب متغیر پرداخته می‌شود. طبق روش SRA، تعداد ۱۳ متغیر در ایستگاه بیرجند و تعداد ۸ متغیر در ایستگاه اردبیل به عنوان ورودی مدل انتخاب شدند. ضرایب هر کدام از متغیرها، عرض از مبدأ معادله رگرسیونی و مقادیر خطای این روش در (جدول ۲) ارائه شده است. با استناد به مقدار خطای RMSE مشخص می‌شود که معادله رگرسیون در ایستگاه بیرجند با اتکا به متغیرهای انتخاب شده دارای دقت بهتری نسبت به ایستگاه اردبیل می‌باشد. همچنین به لحاظ تعداد متغیر، معادله رگرسیونی ایستگاه اردبیل دارای متغیرهای کمتری نسبت به ایستگاه بیرجند می‌باشد.

در مطالعه خاشعی و همکاران (۲۱) نیز مقدار جذر مربعات خطای معادله رگرسیونی متغیرهای انتخاب شده پس از ۱۸ گام پیاپی با ۱۷ متغیر انتخاب شده به  $1/83$  میلی‌متر رسید (۲۱). در روش PCA تعداد ۲۶ متغیر پیش‌بینی کننده به ترتیب به ۱۳ و ۱۶ مؤلفه اصلی در ایستگاه بیرجند و اردبیل کاهش پیدا کرد. نمودار ScreePlot به طور هم‌زمان درصد واریانس هر کدام از مؤلفه‌های اصلی، مقدار واریانس پوشش داده شده توسط هر کدام و درصد تجمعی واریانس را نشان

می‌دهد. با استناد (شکل ۱) مشخص می‌شود که چنانچه ۹۰ درصد از واریانس متغیرهای پیش‌بینی کننده مورد نظر باشد، در ایستگاه اردبیل ۱۶ مؤلفه‌ی اول و در ایستگاه بیرجند ۱۳ مؤلفه اول این میزان از تغییرپذیری مجموعه اول را به طور کامل پوشش می‌دهند (قسمت هاشور خورده‌ی شکل ۱). البته باید توجه داشت که اولین مؤلفه‌ی اصلی در بیرجند و اردبیل به ترتیب حدود ۵۰ و ۴۶/۵ درصد از کل واریانس مجموعه اول را دربر گرفته است.

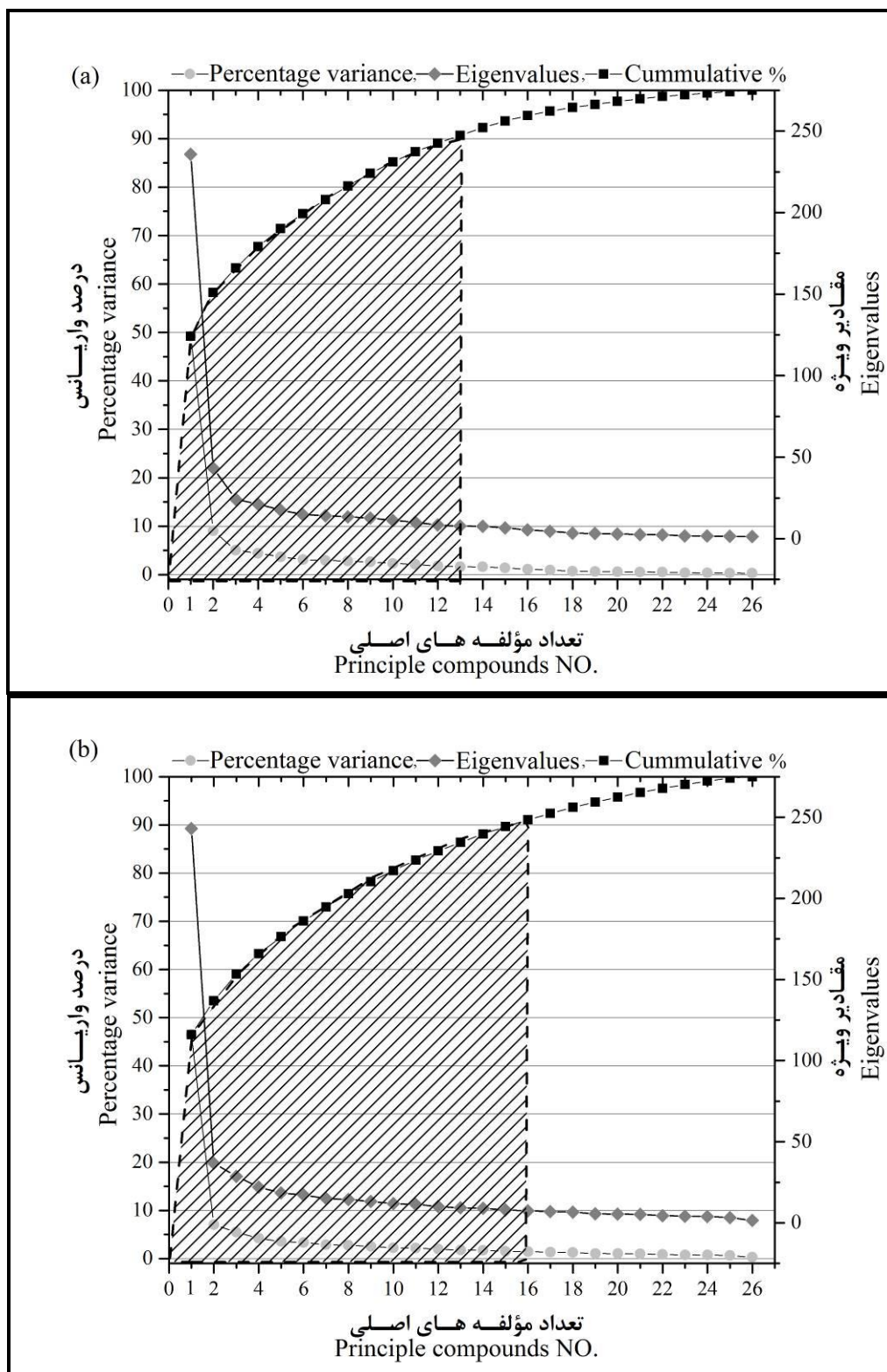
در انتخاب پیش‌بینی کننده به روش CA، بر اساس مقدار سطح معنی‌داری ۰/۰۵ تعداد متغیرهای ورودی در هر ایستگاه همراه با ضریب همبستگی پیرسون در (جدول ۳) مشخص شده است. همان‌طور که از اعداد مندرج در (جدول ۳) مشخص می‌شود، همبستگی متغیرهای پیش‌بینی کننده در ایستگاه اردبیل با مقادیر بارش روزانه کمتر از ۰/۱ و بسیار ضعیف می‌باشد. این درحالی است که در ایستگاه بیرجند ضریب همبستگی بین بارش روزانه و متغیرهای رطوبت و دیوژانس بسیار بهتر و به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۲۷- می‌باشد.

در نهایت متغیرهایی که به روش ParCA برای ریزمقیاس نمایی انتخاب شده‌اند در (جدول ۴) نمایش داده شده‌اند. آزمون ParCA به لحاظ عملکرد شبیه آزمون همبستگی می‌باشد؛ با این تفاوت که برای محاسبه ضریب همبستگی اثر سایر مؤلفه‌ها را خنثی می‌کند. به همین جهت انتظار می‌رود که در این آزمون تعداد متغیر کمتری شرایط سطح معنی‌داری را داشته باشد.

جدول ۲- متغیرهای پیش‌بینی کننده انتخاب شده در روش SRA

Table 2- Selected predictor variables in SRA

| ایستگاه اردبیل<br>Ardebil |                   | ایستگاه بیرجند<br>Birjand |                   |
|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| ضریب                      | متغیر             | ضریب                      | متغیر             |
| Coefficient               | Variable          | Coefficient               | Variable          |
| -0.7175                   | X1                | -0.0005                   | X6                |
| -0.059                    | X3                | 0.0778                    | X7                |
| -0.1529                   | X5                | 0.301                     | X8                |
| -0.1178                   | X15               | -0.3801                   | X9                |
| 0.0736                    | X17               | 0.2754                    | X10               |
| 0.5173                    | X21               | -0.0012                   | X12               |
| 0.0595                    | X22               | -0.0532                   | X13               |
| -0.6069                   | X26               | 0.1088                    | X17               |
|                           |                   | -0.0004                   | X18               |
|                           |                   | -0.2421                   | X20               |
|                           |                   | 0.8435                    | X22               |
|                           |                   | 0.1195                    | X23               |
|                           |                   | 0.0469                    | X25               |
| 0.76                      | مقدار عرض از مبدأ | 0.4                       | مقدار عرض از مبدأ |
| 2.3484                    | RMSE (mm)         | 1.4309                    | RMSE (mm)         |



شکل ۱- نمودار Scree Plot مقادیر ویژه در مقابل مؤلفه های اصلی در کنار درصد واریانس در مقابل مؤلفه های اصلی ایستگاه بیرجند (a) و ایستگاه اردبیل (b)

Figure 1- Scree plot of Eigenvalues vs. components along with percentage variances vs. components for Birjand (a) & Ardebil (b)

جدول ۳- متغیرهای دارای همبستگی معنی‌دار

Table 3- Predictors with significant correlation

| ایستگاه اردبیل<br>Ardebil station |                                         | ایستگاه بیرجند<br>Birjand station |                                         |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|
| متغیر<br>Variable                 | ضریب همبستگی<br>Correlation Coefficient | متغیر<br>Variable                 | ضریب همبستگی<br>Correlation Coefficient |
| X20                               | -0.076                                  | X10                               | 0.0324                                  |
| X25                               | -0.074                                  | X19                               | -0.277                                  |
| X26                               | -0.091                                  | X22                               | 0.546                                   |

جدول ۴- متغیرهای دارای همبستگی جزئی معنی‌دار

Table 4- Predictors with significant partial correlation

| ایستگاه اردبیل<br>Ardebil station |                                                      | ایستگاه بیرجند<br>Birjand station |                                                      |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| متغیر<br>Variable                 | ضریب همبستگی جزئی<br>Partial Correlation Coefficient | متغیر<br>Variable                 | ضریب همبستگی جزئی<br>Partial Correlation Coefficient |
| X1                                | -0.041                                               | X9                                | -0.088                                               |
| X5                                | -0.042                                               | X10                               | 0.088                                                |
| X26                               | -0.062                                               | X22                               | 0.373                                                |

مندرج در (جدول ۵) مشخص می‌شود که در ایستگاه بیرجند روش‌های CA دارای عملکرد بهتری نسبت به SRA می‌باشد. به عبارت دیگر به کارگیری روش‌های مبتنی بر همبستگی باعث ارتقای بیشتر فرایند ریزمقیاس نمایی بارش در مناطق خشک- کویری خواهد شد. لکن در مناطقی نظیر اردبیل (سرد- نیمه‌خشک)، ریزمقیاس نمایی بر اساس روش‌های انتخاب متغیر مبتنی بر رگرسیون توصیه می‌شود. این موضوع با یافته‌های پژوهش یانگ (۳۷) کاملاً مطابقت دارد. نتایج مطالعه وی که به‌منظور بررسی اثر روش‌های مختلف انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش در شمال چین انجام شده است، نشان می‌دهد که ریزمقیاس نمایی با استفاده از روش‌های انتخاب متغیر مبتنی بر رگرسیون دارای عملکرد بهتری نسبت به روش‌های مبتنی بر همبستگی می‌باشد (۳۷).

نمودار Violin در واقع نشان دهنده شکل توزیع آماری یک نمونه و پراکنش داده‌ها می‌باشد. (شکل ۳) نمودار Violin بارندگی مشاهداتی و ریزمقیاس شده را همراه با مقدار میانگین (دایره قرمز رنگ) برای دو ایستگاه بیرجند و اردبیل نشان می‌دهد. مقایسه شکل توزیع بارندگی مشاهداتی و ریزمقیاس شده (شکل ۳) نشان می‌دهد که پراکنش مقادیر بارش روزانه در تمام روش‌های انتخاب متغیر در ایستگاه اردبیل زیاد مطلوب نمی‌باشد. این در حالی است که شکل توزیع‌های آماری مشاهداتی و ریزمقیاس شده در ایستگاه بیرجند از تشابه بیشتری برخوردار می‌باشد.

(جدول ۶ و ۷) مقایسه رخدادهای تر و خشک مشاهداتی و ریزمقیاس شده را برای ایستگاه‌های بیرجند و اردبیل نشان می‌دهند. با مقایسه تعداد روزهای تر و خشک مشاهداتی ایستگاه بیرجند در

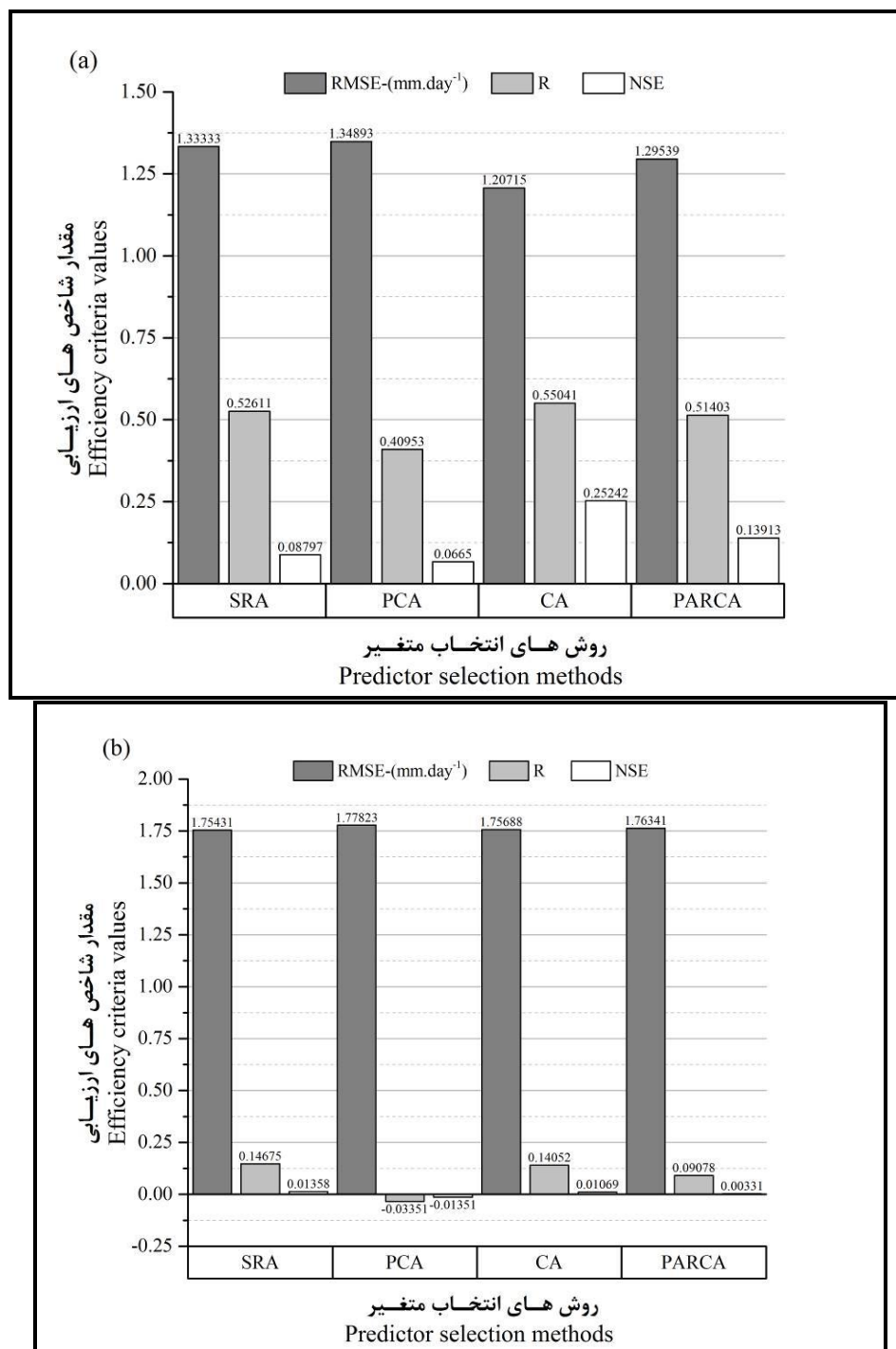
با درنظر گرفتن نتایج روش‌های انتخاب پیش‌بینی کننده مشخص می‌شود که در ایستگاه بیرجند متغیرهای سرعت ناحیه‌ای و رطوبت نسبی و در ایستگاه اردبیل متغیرهای میانگین فشار سطح دریا، چرخش هوا و دمای میانگین جزء متغیرهای غالب و ورودی به شمار می‌روند. از این حیث نتایج پژوهش پیش‌رو با نتایج مطالعه ناصری و همکاران (۲۶) کاملاً یکسان می‌باشد. نتایج مطالعه ناصری و همکاران (۲۶) که از روش ParCA جهت انتخاب متغیرهای ورودی ریزمقیاس نمایی استفاده شده بود، نشان داد که متغیرهای رطوبت نسبی و سرعت ناحیه‌ای در سطوح مختلف فشار به عنوان متغیر ورودی برگزیده شدند (۲۶).

در ادامه نتایج مربوط به آزمون‌های مقایسه‌ای ارائه می‌گردد. ابتدا شاخص‌های ارزیابی مربوط به تأثیر هر کدام از روش‌ها در عملکرد شبکه عصبی در ریزمقیاس نمایی و مربوط به دوره آزمون (۲۰۰۴-۲۰۰۱) در (شکل ۲) ارائه شده است. با استناد به مقادیر شاخص‌های ارزیابی در دو ایستگاه می‌توان بیان نمود که ریزمقیاس نمایی بارش روزانه با استفاده از روش CA دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. همچنین (شکل ۲) نشان می‌دهد که در هر دو ایستگاه مقدار شاخص‌های ارزیابی در روش PCA به‌طور کاملاً مشخص دارای مقادیر با ارزش کمتر می‌باشد. لذا در آزمون‌های بعدی اثر سایر روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی مورد مقایسه قرار گرفت.

در (جدول ۵) مقایسه مشخصه‌های آماری بین روش‌های انتخاب متغیر انجام شده است. در هر کدام از مشخصه‌های آماری مقادیر با ارزش بالاتر با رنگ خاکستری مشخص شده اند. با استناد به مقادیر

تشخیص درست بودند. لکن مقایسه شاخص‌های دقت روش‌های مختلف در تشخیص سری‌های تر و خشک، نشان می‌دهد که روش ParCA دارای عملکرد بهتری نسبت به دو روش دیگر (CA و ParCA) می‌باشد.

مقابل تعداد روزهای تر و خشک ریزمقیاس شده تحت تأثیر روش‌های مختلف انتخاب متغیر، مشخص می‌شود که عملکرد CA در تشخیص درست روزهای تر مناسب نمی‌باشد و عملکرد دو روش SRA و ParCA بسیار مطلوب می‌باشد. به‌طوری که از ۷۸ روز تر موجود در آمار مشاهداتی، روش‌های SRA و ParCA به ترتیب دارای ۶۰ و ۶۴



شکل ۲- وضعیت شاخص‌های ارزیابی در ایستگاه بیرجند (a) و ایستگاه اردبیل (b)

Figure 2- Efficiency criteria in Birjand (a) & Ardebil (b) stations

جدول ۵- مقادیر آماره‌های توصیفی در سری داده‌های مشاهداتی و ریزمقیاس شده

Table 5- Measured and downscaled descriptive statistics

| آماره<br>Statistic                      | ایستگاه<br>Station | Observation | Downscaled |         |        |
|-----------------------------------------|--------------------|-------------|------------|---------|--------|
|                                         |                    |             | SRA        | CA      | ParCA  |
| میانگین (میلی‌متر)<br>Mean              | اردبیل<br>Ardebil  | 0.59        | 0.415      | 0.445   | 0.41   |
|                                         | بیرجند<br>Birjand  | 0.254       | 0.624      | 0.068   | 0.599  |
| میانه (میلی‌متر)<br>Median              | اردبیل<br>Ardebil  | 0           | 0.43       | 0.473   | 0.48   |
|                                         | بیرجند<br>Birjand  | 0.000       | 0.155      | 0.003   | 0.121  |
| انحراف از معیار (میلی‌متر)<br>Std. Div. | اردبیل<br>Ardebil  | 1.766       | 0.148      | 0.094   | 0.163  |
|                                         | بیرجند<br>Birjand  | 1.396       | 1.078      | 0.306   | 1.220  |
| چولگی (میلی‌متر)<br>Skewness            | اردبیل<br>Ardebil  | 3.998       | -0.342     | -1.709  | -1.220 |
|                                         | بیرجند<br>Birjand  | 7.807       | 2.547      | 11.898  | 3.289  |
| کشیدگی (میلی‌متر)<br>Kurtosis           | اردبیل<br>Ardebil  | 17.217      | -0.197     | 3.291   | 0.193  |
|                                         | بیرجند<br>Birjand  | 69.575      | 6.523      | 172.873 | 11.434 |

جدول ۶- مقایسه رخدادهای تر و خشک در ایستگاه بیرجند

Table 6- comparison of dry and wet events in Birjand

| ریزمقیاس شده<br>Downscaled | مشاهداتی<br>Observation | مجموع<br>Summation |                    | CSI  |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------|
|                            |                         | روز تر<br>Wet day  | روز خشک<br>Dry day |      |
|                            |                         |                    |                    |      |
| ParCA                      | روز تر<br>Wet day       | 60                 | 169                | 0.24 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 18                 | 1214               |      |
| CA                         | روز خشک<br>Dry day      | 13                 | 5                  | 0.15 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 65                 | 1378               |      |
| SRA                        | روز خشک<br>Dry day      | 64                 | 214                | 0.22 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 14                 | 1169               |      |
| مجموع<br>Summation         |                         | 78                 | 1383               | -    |

روش‌های مختلف در تشخیص روزهای تر در ایستگاه بیرجند بسیار بهتر از اردبیل می‌باشد. این امر با مقایسه شاخص عملکرد CSI مشخص می‌شود. مطالعه هارفام و ویلیبی (۱۲) که از شاخص‌های CSI جهت ارزیابی دقت روش‌های مختلف ریزمقیاس نمایی در

از ۲۰۰ روز تر ثبت شده در آمار مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک اردبیل، روش SRA ۱۱ روز، روش CA ۱۸ روز و روش ParCA ۹ روز را تر تشخیص داده‌اند. در مقایسه با عملکرد روش‌های مختلف و اثر آن‌ها در ریزمقیاس نمایی، می‌توان بیان نمود که عملکرد

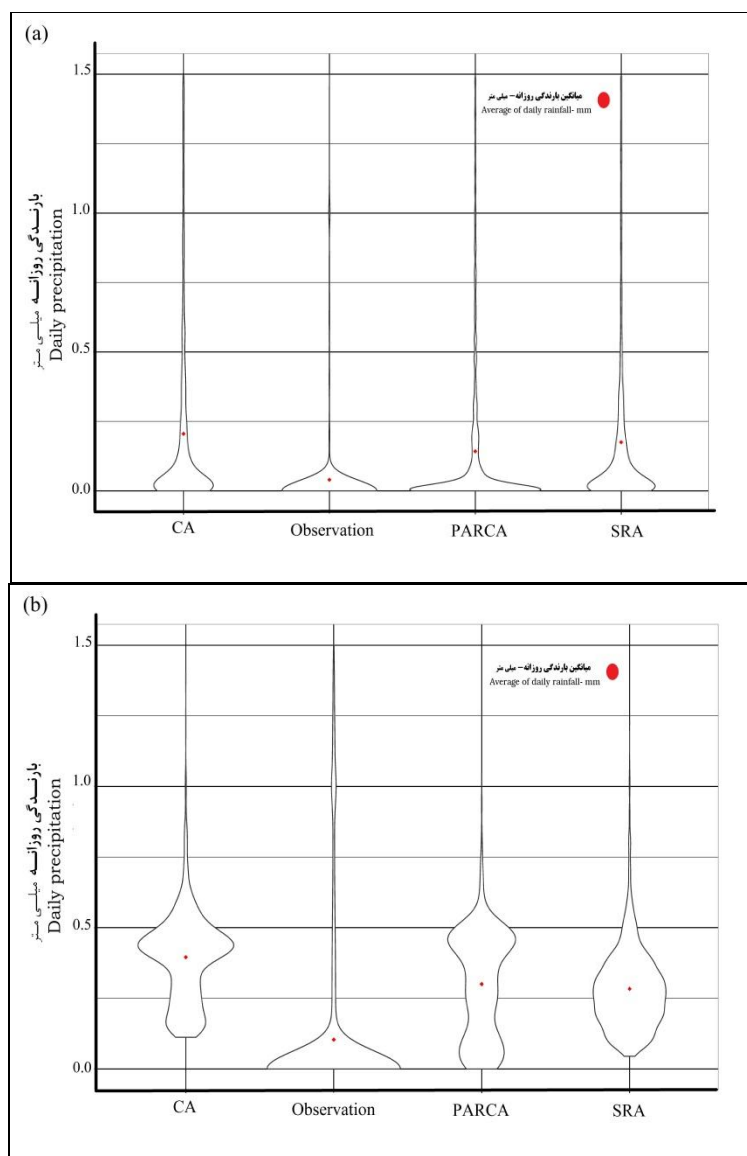
روش‌های انتخاب متغیر ریزمقیاس نمایی بارش در ایستگاه بیرجند مطلوبیت بیشتری نسبت به اردبیل داشت.

### نتیجه‌گیری

مطالعات زیادی در ریزمقیاس نمایی آماری و دینامیکی انجام شده است که هدف آن‌ها ارتقای دقت خروجی مدل‌های GCMs می‌باشند تا از این طریق تخمین‌های مربوط به تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم بهبود پیدا نماید.

شبیه‌سازی بارش‌های سنگین کشور انگلستان انجام شده است، نیز با نتایج مطالعه هم‌خوانی دارد (۱۲).

با توجه به مقدار ضریب تغییرات بارش روزانه در دو ایستگاه بیرجند و اردبیل (به ترتیب ۱۸ و ۳۳ درصد) می‌توان بیان نمود که به دلیل اینکه تغییرات مقادیر بارش روزانه در مناطق نیمه‌خشک و سرد بسیار بیشتر از مناطق خشک می‌باشد، انتظار می‌رود که خطای دینامیک داده‌های این مناطق بیشتر از مناطق خشک می‌باشد. به طور مستقیم بالا بودن میزان خطای دینامیک داده‌ها موجب افزایش خطای سیستماتیک (مدل‌سازی یا در این مطالعه ریزمقیاس نمایی) خواهد شد (۲۲). از این رو در آزمون‌های به کار رفته در این مطالعه عملکرد



شکل ۳- نمودار Violin بارندگی مشاهداتی و ریزمقیاس شده در ایستگاه بیرجند (a) و ایستگاه اردبیل (b)

Table 3- Measured and downscaled violin plot in Birjand (a) and Ardebil (b)

جدول ۷- مقایسه احتمالاتی شاخص‌های رخداد در ایستگاه اردبیل

Table 7- comparison of dry and wet events in Ardebil

| ریزمقیاس شده<br>Downscaled | مشاهداتی<br>Observation | مجموع<br>Summation |                    | CSI  |
|----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|------|
|                            |                         | روز تر<br>Wet day  | روز خشک<br>Dry day |      |
|                            |                         | روز تر<br>Wet day  | روز خشک<br>Dry day |      |
| ParCA                      | روز تر<br>Wet day       | 9                  | 191                | 0.06 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 37                 | 1244               |      |
| CA                         | روز خشک<br>Dry day      | 18                 | 182                | 0.07 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 57                 | 1204               |      |
| SRA                        | روز خشک<br>Dry day      | 11                 | 189                | 0.05 |
|                            | روز خشک<br>Dry day      | 19                 | 1242               |      |
| مجموع<br>Summation         |                         | 200                | 1261               | -    |

به‌طوری‌که مقایسه مقدار شاخص‌های ارزیابی و مقایسه مشخصه‌های آماری بارندگی مشاهداتی و ریزمقیاس شده نشان داد که در ایستگاه بیرجند روش CA بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد. اما مقایسه سری‌های تر و خشک نشان داد که دقت روش SRA بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد. بررسی نتایج در ایستگاه اردبیل نشان داد که به دلیل دینامیک بیشتر داده‌های بارش روزانه نسبت به ایستگاه بیرجند، عملکرد روش‌های انتخاب متغیر در ایستگاه اردبیل از مطلوبیت کمتری برخوردار می‌باشد. نتایج مقایسه شکل توزیع آماری (پراکنش داده‌ها) و مقایسه سری‌های خشک و تر مشاهداتی و ریزمقیاس شده حاکی از عملکرد نامطلوب روش‌های انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه اردبیل بود. در آزمون‌های مقایسه شاخص‌های ارزیابی و مشخصه‌های آماری نشان داد که روش‌های CA و SRA ضمن تشابه به یکدیگر، عملکرد بهتری نسبت به روش ParCA دارد.

در این پژوهش‌ها انتخاب متغیر ورودی به عنوان یکی از ابتدایی‌ترین گام ریزمقیاس نمایی، نقش بسیار مهمی در دقت شبیه‌سازی‌های اقلیمی دارد. در این مطالعه عملکرد روش‌های مختلف انتخاب متغیر در ریزمقیاس نمایی بارش روزانه در دو اقلیم متفاوت خشک- کویری (بیرجند) و سرد- نیمه‌خشک (اردبیل) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم از خروجی مدل CanESM2 تحت ریزمقیاس نمایی ANN استفاده شد.

پس از ارزیابی نتایج آزمون‌های متعدد مشخص شد که ریزمقیاس نمایی بارش روزانه در اقلیم‌های خشک- کویری عملکرد بهتری نسبت اقلیم‌های سرد- نیمه‌خشک می‌باشد. به‌طوری‌که در تمامی آزمون‌های به کار رفته شده، دقت روش‌های انتخاب متغیر در بیرجند دارای مطلوبیت بیشتری می‌باشد. همچنین آزمون‌های مختلف نتایج متفاوتی را درخصوص عملکرد روش‌های انتخاب متغیر ارائه داد.

## منابع

1. Bengio Y. and LeCun Y., 2007. Scaling learning algorithms towards AI1-41. In Bottou L., Chapelle O., DeCoste D., Weston J. Large-scale kernel machines. MIT Press.
2. Camici S., Palazzi E., Pier, A., Brocca L., Moramarco T., and Provenzale A. 2015. Comparison between dynamical and stochastic downscaling methods in central Italy. In EGU General Assembly Conference Abstracts, 10270.. 10270.
3. Chanda K., and Maity R. 2018. Global Climate Pattern Behind Hydrological Extremes in Central India. In Climate Change Impacts (pp. 71-89). Springer, Singapore.
4. Chen H., CY X., and Guo S.L. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. Journal of hydrology, 434, 36-45.
5. Chen J., Brissette F.P., and Leconte R. 2011. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. Journal of Hydrology. 401:190-202.
6. Devak M., Dhanya C.T., and Gosain A.K. 2015. Dynamic coupling of support vector machine and K-nearest neighbour for downscaling daily rainfall. Journal of Hydrology, 525:286-301.

7. Draper N.R., Smith H., and Pownell E. 1966. Applied regression analysis. 3: 217-220. New York: Wiley.
8. Fisher R.A. 1958. Statistical Methods for Research Workers, 13th Ed., Hafner.
9. Fistikoglu O., and Okkan U. 2011. Statistical Downscaling of Monthly Precipitation Using NCEP / NCAR Reanalysis Data for Tahtali River Basin in Turkey, Journal of Hydrologic Engineering, 16, 157-164.
10. Gaitan C. F., Hsieh W. W., and Cannon A. J. 2014. Comparison of statistically downscaled precipitation in terms of future climate indices and daily variability for southern Ontario and Quebec, Canada. Climate Dynamics, 43(12):3201-3217.
11. Hammami D., Lee T.S., Ouarda T.B. M.J., and Le J. 2012. Predictor selection for downscaling GCMs data with LASSO. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 117(17):1-11.
12. Harpham C., and Wilby R.L. 2005. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. Journal of Hydrology, 312(1):235-255.
13. Hassan Z., Shamsudin S., and Harun S. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. Theoretical and Applied Climatology. 116:243-257.
14. Hessami M., Gachon P., Ouarda T., and St-Hilaire A. 2008. Automated regression-based statistical downscaling tool. Environmental Modelling & Software, 23:813-834.
15. Huth R. 1999. Statistical downscaling in central Europe: evaluation of methods and potential predictors. Climate Research, 13:91-101.
16. IPCC (2001) Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability. In: McCarthy JJ., Canziani oF, Leary NA., Dokken DJ., White KS (eds) Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge
17. IPCC (2007) Summary for policymakers. Climate change 2007: the physical science basis. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 1-18
18. Jafarzadeh A., Pourreza-Bilondi M., Khashei-Siuki A., Aghakhani A., and Yaghoobzadeh M. 2017. Reliability estimation of rainwater catchment system using future GCMs output data (case study: Birjand City). In 10th World Congress On Water Resources And Environment (pp. 536-541).
19. Kaviani M., and MirRokni S.M. 2014. Application of principal component analysis to meteorological data in ANN input selection. Geophysics Journal of IRAN, 9(1):71-84.
20. Khan M.S., Coulibaly P., and Dibike Y. 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. Journal of Hydrology, 319(1-4):357-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.035>.
21. Khashei-Siuki A., Shahidi A., Pourreza-Bilondi M., Amirabdizadeh M., and Jafarzadeh A. 2018. Performance Assessment of ANN and SVM for downscaling of daily rainfall in dry regions. Iranian journal of Soil and Water Research. (in Persian)
22. Krause P., Boyle D.P., and Båse F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Advances in Geosciences, 5:89-97.
23. McCulloch W.S., and Pitts W. 1943. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of Mathematical Biophysics, 5(4):115-133.
24. Meenu R., Rehana S., and Mujumdar P.P. 2013. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tungabhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. Hydrological Processes, 27(11):1572-1589.
25. Najafi M.R., Moradkhani H., and Wherry S.A. 2011. Statistical Downscaling of Precipitation Using Machine Learning with Optimal Predictor Selection. Journal of Hydrologic Engineering, 16(8): 650-664.
26. Nasserli M., and Zahraie B. 2013. Performance Assessment of Different Data Mining Methods in Statistical Downscaling of Daily Precipitation. Journal of Hydrology, 492, 1-14.
27. Pervez M.S., Henebry G.M. 2014. Projections of the Ganges-Brahmaputra precipitation downscaled from GCMs predictors. Journal of Hydrology 517:120-134.
28. Raje D., Mujumdar P.P. 2011. A comparison of three methods for downscaling daily precipitation in the Punjab region. Hydrology Process, 25(23):3575-3589.
29. Rumelhart D.E., Hinton G.E., and Williams R.J. 1986. Learning representations by back-propagating errors. Nature, 323(6088):533-536.
30. Salathe E.P., Mote P.W., and Wiley M.W. 2007. Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States Pacific Northwest. International Journal of Climatology, 27(12):1611-1621.
31. Semenov M. 2002. LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. In *Version 3*, ed. R. Research.
32. Vousoughi F., Dinpashoh Y., and Aalami M. 2010. Effect of Drought on Groundwater Level in the Past Two



- Decades (Case study: Ardebil Plain). *Water and Soil Science*, 21(4):165-179. (in Persian)
33. Wilby R.L., and Wigley T.M.L. 2000. Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, 20(6):641-661.
34. Wilby R.L., Dawson C.W., and Barrow E.M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2):145-157.
35. Wilks D.S., 1995. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, San Diego, California
36. Wood A.W., Leung L.R., Sridhar V., and Lettenmaier D.P. 2004. Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change* 62: 189–216.
37. Yang C. 2016. Performance comparison of three predictor selection methods for statistical downscaling of daily precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*. 131(1-2):43-54.



## Examination of Feature Selection Methods for Downscaling of Daily Precipitation in Two Different Climates

J.RamezaniMoghadam<sup>1\*</sup> - M.Yaghoubzadeh<sup>2</sup> - A. Jafarzadeh<sup>3</sup>

Received: 22-05-2018

Accepted: 29-07-2018

**Introduction & Background:** Assessment of climate change impacts on hydrology is relied on the information of climate changes in adequate scale. Due to outputs of GCMs (General Circulation Models) that are the most confident tools for simulating climate change impacts but are available in coarse resolution. Downscaling process which is classified to several methods such as transfer function, weather generator and weather typing is performed for improving of GCMs projection and using them in local scale. Meanwhile feature selection is the main essential step in downscaling with transfer function. Because the main goal of downscaling is the improvement of GCMs projections, several researches examined vary approaches for feature selection. This study aims to assess performance of downscaling daily precipitation under four different selection methods such as PCA, CA, SRA and ParCA using comprehensive comparison tests.

**Materials and Methods:** Measured daily rainfall for Ardebil (with cold semi-arid climate) and Birjand (arid climates) were collected for the period from 1977 to 2004. The CanESM2 (Canadian Earth System Model) outputs were used as GCM for simulating of climate change impacts on precipitation pattern. So of CanESM2 outputs (large scale predictors) and measured daily precipitation (local scale predictants) were considered as input and target for downscaling respectively. The Artificial Neural Network (ANN) which widely has been used in climate change researches was selected as downscaling method. Despite of the most of literature have used only efficiency criteria for distinguishing from different approaches in downscaling, this study reveals performance of feature selection methods based on either them or statistical tests. The comparison tests between measured and downscaled rainfall such as assessment criteria, statistics characteristics comparison, contingency table event for wet and dry series diagnostics and Violin plot were used as tools for skill assessment of feature selection approaches.

**Results and Discussion:** Results showed that although different methods of predictor selection had includes various subsets, predictors such as relative humidity at surface and zonal velocity component at 500-hPa pressure levels in Birjand and mean temperature at 2m, mean sea level pressure and rotation of the air in Ardebil are the most descriptive features which have more relationship with measured daily precipitation. The efficiency criteria of comparing measured and downscaled precipitation indicated that CA method is superior to other in Birjand station and SRA's results were better than those of other in Ardebil station. Value of RMSE, R and NSE was achieved 1.2 mm/day, 0.55 and 0.25 in Birjand and 1.75 mm/day, 0.14 and 0.013 in Ardebil respectively. The examination of measured and downscaled statistical characteristics reveals that CA has the better influence on downscaling than those of others in Birjand station. In this comparative test most of downscaled statistical components such as mean, median and skewness under CA have more similarity to measured values. But in Ardebil, with cold and arid climate, performance of SRA to downscale was the same as performance of CA to it. Also both SRA and CA were better than ParCA. The skill assessment of different methods to fit measured and downscaled variability by violin plot showed that generally ParCA outperformed other method in Birjand station. The comparison of violin plots, in Ardebil, revealed that no one of predictor selection methods has acceptable accuracy for fitting measured variability. Outcomes of contingency table event showed although all feature selection methods have not remarkable capability for distinguishing from the measured wet and dry series in Ardebil station, performance of ParCA and SRA were acceptable in Birjand station. The values of CSI for ParCA and SRA were calculated 0.25 and 0.22 in Birjand and it shows that more of 20 percent of ParCA and

1- Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

(\*-Corresponding Author Email: j\_ramezani@uma.ac.ir)

2 and 3- Assistant Professor and PhD Student of Water Resource Engineering, Department of Science and Water Engineering, University of Birjand

SRA's diagnostics was correct.

**Conclusions:** By assessing of results, it can be inferred that generally downscaling of daily rainfall in Birjand station is outperforming Ardebil. In other expression daily downscaling of precipitation in arid climate has better results than cold and arid climate. Also different tests have various results about feature selection methods. In Ardebil, SRA in efficiency criteria test and both SRA and CA in statistics characteristics have better performance than others. But in this region no methods have remarkable performance in violin and dry and wet tests.

**Keywords:** CanESM2, Partial Correlation, PCA, Reduction Dimensions, Wet and Dry Spell



## Contents

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Evaluation of Plant Input Coefficient of WOFOST in PRD Condition for Sunflower</b>                                                                    | 660 |
| S.F. Hashemi-A. Shahnazai- M. Raeini- A. Ghadami Firouzabadi- E. Amiri                                                                                   |     |
| <b>The Effect of Surface and Subsurface Irrigation with Saline Water and Mulch on Corn Yield, Water Productivity and Solute Distribution in the Soil</b> | 674 |
| A. Liaghat – M. Pourgholam Amiji – P. Mashhouri Nejad                                                                                                    |     |
| <b>The Effect of Partial Root-Zone Drying and Zeolite on Water Use Efficiency and Physiological Characteristics of Sweet Pepper</b>                      | 690 |
| P. Daneshpazhoh - A. R. Ghasemi- M. R. Noori- R. Barzegar                                                                                                |     |
| <b>Simulation of Changes in Soil and Plant Nitrogen by CERES-Wheat Model</b>                                                                             | 707 |
| F. Mondani - B. Gholami- A.R. Bagheri- Gh.R. Mohammadi                                                                                                   |     |
| <b>Effect of Pruning Waste Biochar and Compost and Microbial Inoculation on Phosphorus Availability</b>                                                  | 722 |
| M.H. Rasouli-Sadaghiani - R. Vahedi- M. Barin                                                                                                            |     |
| <b>Grain Size and Mineralogy Variations along the Climatic Gradient on the Surface Loess-Derived Soils in Northern Iran</b>                              | 736 |
| J. Sharifi Garmdareh - F. Khormali - M. Kehl - C. Rolf - A. Shahriari - M. Frechen                                                                       |     |
| <b>Digital Mapping of Soil Organic Carbon (Case Study: Marivan, Kurdistan Province)</b>                                                                  | 750 |
| Sh. Eskandari - K. Nabiollahi - R. Taghizadeh-Mehrjardi                                                                                                  |     |
| <b>The Effects of Livestock Grazing Intensity on Soil Physicochemical Properties in Moghan Rangelands</b>                                                | 762 |
| S. Jafari - A. Ghorbani- K. Hashemimajd- S. Ghafari                                                                                                      |     |
| <b>The Effect of Zeolite, Manure and Vermicompost on Growth and Micronutrients Uptake by Corn.</b>                                                       | 778 |
| S.Z. Taghdisi Heydarian – R. Khorassani - H. Emami                                                                                                       |     |
| <b>Effect of Biochars Produced at Different Temperatures on the Availability of Zinc and Maize (<i>Zea mays</i> L.) Responses in a Contaminated Soil</b> | 793 |
| P. Kabiri - H.R. Motaghian- A.R. Hosseinpour                                                                                                             |     |
| <b>Geostatistical Assessment of Aggregates Stability and Sodium Adsorption Ratio in Salt-Affected Soils Around Urmia Lake</b>                            | 807 |
| Sh. Asghari - M. Shahabi                                                                                                                                 |     |
| <b>Effects of Mycorrhizal Symbiosis on Nutrient Uptake and Water Use Efficiency of Tomato under Drought Stress</b>                                       | 820 |
| M. Pouzesh Shirazi - H. Haghighatnia - R. Khademi                                                                                                        |     |
| <b>Relationship between Soil Moisture Changes and Climatic Indices in the Mele-Siah Forest Site of Ilam Province</b>                                     | 830 |
| J. Hosseinzadeh - A. Tongo- A. Najafifar- A. Hosseini                                                                                                    |     |
| <b>Examination of Feature Selection Methods for Downscaling of Daily Precipitation in Two Different Climates</b>                                         | 848 |
| J.Ramezani Moghadam - M.Yaghoubzadeh - A. Jafarzadeh                                                                                                     |     |

# WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

**Vol . 32**

**No. 4**

**2018**

**Published by:** Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

**Manager in Charge:** Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

**Editor in Chief:** Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

## **Editorial Board:**

|                    |                           |                                                                            |
|--------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Alizadeh, A.       | Irrigation and Drainage   | Prof., Ferdowsi University of Mashhad                                      |
| Astaraei, A. R.    | Soil Science              | Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad                               |
| Fotovat, A.        | Soil Science              | Prof., Ferdowsi University of Mashhad                                      |
| Ghaemi, A.A.       | Irrigation and Drainage   | Assoc. Prof., Shiraz University                                            |
| Kamali, Gh.        | Agricultural Meteorology  | Assoc. Prof., Islamic Azad University, Tehran                              |
| Khormali, F.       | Soil Science              | Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan      |
| Kiani, A.R.        | Irrigation and Drainage   | Prof., Agricultural and Natural Resources Res. Center of Golestan Province |
| Lakzian, A.        | Soil Science              | Prof., Ferdowsi University of Mashhad                                      |
| Mahdian, M.H.      | Irrigation and Drainage   | Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute       |
| Mosaedi, A.        | Irrigation and Civil Eng. | Prof., Ferdowsi University of Mashhad                                      |
| Mousavi Baygi, M   | Agricultural Meteorology  | Prof., Ferdowsi University of Mashhad                                      |
| Oustan, Sh.        | Soil Science              | Assoc. Prof., Tabrzi University                                            |
| Sanaei-Nejad, S.H. | Agricultural Meteorology  | Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad                               |

**Publisher:** Ferdowsi University of Mashhad

**Printed by:** Ferdowsi University of Mashhad, Press.

**Address:** Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

**P.O. Box:** 91775- 1163

**Fax:** +98 511 8787430

**E-Mail:** jswa3@um.ac.ir

**Web Site:** <http://jm.um.ac.ir>

**Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).**