

عنوان مقالات

- ۲..... بر آورد تبخیر تفرق در فضاهای سبز با روش‌های WUCOLS, PF و IPOS (کرج).....
زینب سجودی - هادی شوکتی - یاسر سجودی - محمود مشعل
- ۱۹..... ارزیابی عملکرد مدل IHACRES با روش‌های خطی ARMAX و EXPUH
(مطالعه موردی: حوضه رودخانه شور در قانن).....
محمد فولادی نصرآباد - مهدی امیرآبادی زاده - محسن پوررضا ییلندی - مصطفی یعقوب زاده
- ۳۳..... شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT
(مطالعه موردی: دشت مهاباد).....
امید رجا - مسعود پارسی نژاد - مسعود تجریشی
- ۵۵..... تأثیر سورفکتانت باکتریایی همراه با کاربرد کلات کننده‌ها بر کادمیم محلول در یک خاک آهکی
سحر عرب تیموری - اکرم حلاج نیا - امیر لکریان - فهیمه نیک بین
- ۶۷..... اثرات متقابل سرب نیترات، سالیسیلیک اسید و بیوجار بر ویژگی‌های رشدی گیاه آویشن
(*Thymus vulgaris* L.)
بهاره رضایی - علی اشرف امیری نژاد - مختار قبادی
- ۸۳..... تأثیر همزیستی میکوریزی بر میزان عناصر غذایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی
محمود محمدی
- ۹۷..... ارزیابی نقش سامانه‌های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول
(مطالعه موردی: دشت نیشابور).....
فرشته مقامی مقیم - علی رضا کریمی - محسن باقری بداغ آبادی - حجت امامی
- ۱۱۵..... تأثیر اصلاح کننده آلی و شیمیایی بر پایداری ساختمان خاک، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی
گیاه گندم در خاک‌های شور
اکرم نصرتی میاندوآب - حجت امامی - علیرضا آستارایی - محمدرضا مصدقی - حسین عسگرزاده
- ۱۲۹..... پیش‌آگاهی سرمازدگی بهاره باغات سیب با استفاده از مدل WRF.....
سیده محبوبه ابن حجازی - حجت اله یزدان پناه - سعید موحدی - محمدعلی نصر اصفهانی - مینا مرادی زاده
- ۱۴۷..... بر آورد زمانی - فضایی بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM در حوضه‌ی آبریز جازموریان.....
کوهزاد رئیس پور - برومند صلاحی - بهروز آباد

Contents

- Evapotranspiration Estimation at Landscape Scale by WUCOLS, PF and IPOS Methods
(Karaj)..... 1
Z. Sojoodi, H. Shokati, Y. Sojoodi, M. Mashal
- Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear
Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen)..... 17
M. Fouladi Nasrabad- M. Amirabadizadeh- M. Pourreza Bilondi- M. Yaghoobzadeh
- Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater
SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain)..... 31
O. Raja, M. Parsinejad, M. Tajrishy
- Effect of Bacterial Surfactant along with Application of Chelators on Soluble
Cadmium in a Calcareous Soil..... 53
S. Arabteymori, A. Halajnia, A. Lakzian, F. Nikbin
- Interactive Effects of Pb (NO), Biochar and Salicylic acid on Growth Characteristics
of Thyme (*Thymus vulgaris* L.) 67
B. Rezaei, A.A. Amirinejad, M. Ghobadi
- The Effect of Mycorrhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond
(*Prunus dulcis* Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition..... 81
M. Mohammadi
- Evaluating the Role of Different Management Systems on Soil Quality Index Using Crop
Yield (Case Study: Neyshabour Plain, Iran)..... 95
F. Maghami Moghim, A. Karimi*, M. Bagheri Bodaghabadi, H. Emami
- Effect of Organic and Chemical Conditioners on Aggregate Stability, Least Limiting
Water Range and Integral Water Capacity under Wheat Cultivation in Saline Soils..... 113
A. Nosrati Miandoab, H. Emami, A.R. Astaraei, M.R. Mosaddeghi, H. Asgarzadeh
- Spring Frost Early Warning for Apple Orchards Using WRF Model..... 127
S.M. Ebnehejazi, H. Yazdanpanah, S. Movahedi, M.A. Nasr-Esfahani, M. Moradizadeh
- Spatiotemporal Estimation of Precipitation Using GPM Satellite Data in Jazmourian
Catchment..... 145
K. Raispour, B. Salahi, B. Abad

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 3 برآورد تبخیر تفرق در فضاهای سبز با روش‌های WUCOLS، PF و IPOS (کرج)
زینب سجودی - هادی شوکتی - یاسر سجودی - محمود مشعل
- 19 ارزیابی عملکرد مدل IHACRES با روش‌های خطی ARMAX و EXPUH
(مطالعه موردی: حوضه رودخانه شور در قائن)
محمد فولادی نصرآباد - مهدی امیرآبادی زاده - محسن پوررضا بیلندی - مصطفی یعقوب زاده
- 33 شبیه‌سازی بیلان آب زیرزمینی با استفاده از مدل تلفیقی و جامع آب سطحی و زیرزمینی SWAT-MODFLOW-NWT
(مطالعه موردی: دشت مهاباد)
امید رجا - مسعود پارسی‌نژاد - مسعود تجریشی
- 55 تأثیر سورفکتانت باکتریایی همراه با کاربرد کلات‌کننده‌ها بر کادمیم محلول در یک خاک آهکی
سحر عرب تیموری - اکرم حلاج‌نیا - امیر لکزیان - فهیمه نیک بین
- 67 اثرات متقابل سرب نترات، سالیسیلیک اسید و بیوجار بر ویژگی‌های رشدی گیاه آویشن (*Thymus vulgaris L.*)
بهاره رضایی - علی اشرف امیری نژاد - مختار قبادی
- 83 تأثیر همزیستی میکوریزی بر میزان عناصر غذایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی
محمود محمدی
- 97 ارزیابی نقش سامانه‌های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول (مطالعه موردی: دشت نیشابور)
فرشته مقامی مقیم - علی رضا کریمی - محسن باقری بداغ آبادی - حجت امامی
- 115 تأثیر اصلاح‌کننده آلی و شیمیایی بر پایداری ساختمان خاک، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی گیاه گندم در خاک‌های شور
اکرم نصرتی میاندوآب - حجت امامی - علیرضا آستارایی - محمدرضا مصدقی - حسین عسگرزاده
- 129 پیش‌آگاهی سرمازدگی بهاره باغات سیب با استفاده از مدل WRF
سیده محبوبه ابن حجازی - حجت اله یزدان پناه - سعید موحدی - محمدعلی نصر اصفهانی - مینا مرادی زاده
- 147 برآورد زمانی - فضایی بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM در حوضه‌ی آبریز جازموریان
کوهزاد رئیس پور - برومند صلاحی - بهروز آباد

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی - پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 36 شماره 1 فروردین - اردیبهشت سال 1401

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سردبیر:

امیر فتوت

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

بذرافشان، جواد

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

تقوئیان، صالح

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)

خراسانی، رضا

دانشیار - علوم خاک (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)

قدیری، حسین

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

لکزیان، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

لیاقت، عبدالمجید

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

مساعدی، ابوالفضل

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص. پ. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

مقاله‌های این شماره در سایت <https://jsw.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

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



Evapotranspiration Estimation at Landscape Scale by WUCOLS, PF and IPOS Methods (Karaj)

Z. Sojoodi¹, H. Shokati², Y. Sojoodi³, M. Mashal^{4*}

Received: 29-12-2020

Revised: 02-02-2022

Accepted: 08-03-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Sojoodi Z., Shokati H., Sojoodi Y., and Mashal M. 2022. Evapotranspiration Estimation at Landscape Scale by WUCOLS, PF and IPOS Methods (Karaj). Journal of Water and Soil 36(1): 1-15. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.73984.1119](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.73984.1119)

Introduction

The constructive effects of green spaces on the quality and livability of the urban environment have been reported in many studies. Therefore, using methods that can accurately estimate the evaporation of transpiration in green space can help to reduce water loss. The purpose of estimating water demand for urban green space is also different from the purpose of determining water demand for an agricultural farm. In urban green space, the goal is to maintain good growth, appearance and acceptable plant health, while biomass production is the main goal on agricultural farms. Therefore, urban green space can typically be managed using an irrigation area that is less than the amount of water needed to produce agricultural products. Due to the limited water resources in arid areas, the use of less irrigation in urban green space can be desirable to save water consumption.

Materials and Methods

The Wucols method for estimating Water requirements in green space was developed by Castello et al. (4). They developed the Wucols water taxonomy guidelines for planting green space in California. The Wucols method estimates evapotranspiration in green space using reference evapotranspiration and a set of coefficients (Species factor, density factor and microclimate factor). PF method is the minimum acceptable irrigation for green space plants that emphasizes maintaining the beauty of the plant. In this method, the water required by green space plants is considered as a percentage of ET_0 so as not to reduce their appearance and performance. In this approach, PF is a regulatory factor that is actually considered instead of K_c and multiplied by ET_0 , except that the emphasis is on the appearance of the plant and not on its optimal growth and yield. The IPOS method has been developed by the Government of South Australia for planning and managing water needs in public open spaces, especially sports lawns and amusement parks. In this method, the water requirement of grass in urban open space is calculated. In this method, plant transpiration evaporation (ET_L) is calculated by multiplying reference transpiration evaporation factors (ET_0) by grass vegetation coefficient (K_c) by plant stress factor (K_{st}).

Results and Discussion

The results showed that the highest rate of evapotranspiration obtained by Wucols method was 83.38 mm during 21 Jun-21 Jul. Also, the rate of transpiration evaporation during one year of the experimental period was estimated to be 556.5 mm. The results of estimation of transpiration evaporation by PF method also show the maximum amount of transpiration evaporation during 21 Jun-21 Jul and is 75.55 mm. The evapotranspiration rate during one year was estimated to be 505.9 mm. For the Ipos method, the highest rate of transpiration evaporation was estimated to be 36.38 mm during 21 Jun-21 Jul and 242.9 mm during the experimental period. Gross irrigation requirement is estimated by considering 70% irrigation efficiency for each month using all three methods. For the Wucols method, the gross irrigation need during one year was estimated to be 794.8 mm. For the PF method was

1- Ph.D. Student in Water Science and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Ph.D. Student in Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Graduated with a Master's Degree in Energy Systems Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Abu Reihan College, University of Tehran, Tehran, Iran

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

722.7 mm and for the IPOS method was 346.9 mm. According to the reported irrigation records for the study area, which is 900 mm per year, the Wucols method had the closest result to the irrigation records.

Conclusion

The results showed that the Wucols method has the best and closest estimate according to the irrigation records of the study area. The gross irrigation requirement calculated by the Wucols method during a year is 794.8 mm, which is 12% less than the gross annual irrigation requirement of the studied green space. While PF and IPOS methods determined the amount of gross demand 20 and 62% less than the annual irrigation rate in the region, respectively. The results of this study show that the Wucols method for estimating the water requirement of plants in urban green space where there is a combination of different plant species is more reliable than the PF and IPOS methods due to the diversity of species, vegetation density and different climates.

Keywords: Agriculture, Climate, Vegetation, Water Requirements

برآورد تبخیر تعرق در فضاهای سبز با روش‌های WUCOLS، PF و IPOS (کرج)

زینب سجودی^۱ - هادی شوکتی^۲ - یاسر سجودی^۳ - محمود مشعل^{۴*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷

چکیده

فضاهای سبز شهری در افزایش رطوبت نسبی، کاهش دما و تلطیف هوای کلان شهرها، کنترل تشعشعات خورشید و جلوگیری از بازتاب نورهایی مزاحم موثر هستند. با توجه به اهمیت توسعه و حفظ فضاهای سبز در شهرها مصرف آب جهت آبیاری آن‌ها افزایش پیدا می‌کند از طرفی دیگر با توجه به منابع محدود آب، تخمین مناسب نیاز آبی فضای سبز نیازمند توجه ویژه است. در فضاهای سبز گونه‌های گیاهی متفاوت با نیاز آبی مختلف در کنار هم و به صورت مختلط کشت می‌شوند و عدم توجه به این موضوع باعث هدر رفت آب خواهد گردید. بنابراین با استفاده از روش‌هایی که بتوانند تبخیر-تعرق را در فضای سبز به درستی و با دقت بیشتر برآورد نمایند می‌توان به کاهش اتلاف آب کمک کرد. در این مطالعه میزان آب مورد نیاز برای آبیاری فضای سبز پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران با استفاده از سه روش Wucols، Pf و Ipos به مدت یک سال از فروردین تا اسفند ۱۳۹۹ برآورد گردید. میزان نیاز ناخالص آبیاری با روش‌های Wucols، Pf و Ipos به ترتیب برابر با ۷۹۴/۸، ۷۲۲/۷ و ۳۴۶/۹ میلی‌متر محاسبه شد. نتایج نشان داد که روش Wucols به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای بیشتر نظیر گونه گیاهی، تراکم پوشش گیاهی و ریزاقلیم دقت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های برآورد نیاز آبی دارد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، پوشش گیاهی، کشاورزی، نیاز آبی

مقدمه

افزایش (Petralli et al., 2014) و آلودگی هوا را کاهش دهد (Edem et al., 2014). به طور کلی، در یک محیط شهری کمبود فضای سبز اغلب منجر به آلودگی (در صد بازتاب نور)، وزش باد شدید و طوفان یا گرد و غبار مکرر می‌شود (Pearlmutter et al., 2007). بنابراین ایجاد، حفاظت و مدیریت فضای سبز شهری به ویژه در مناطق خشک به منظور اصلاح تعادل انرژی شهری ضروری است (Shojaei et al., 2018). تبخیر تعرق عامل مهمی است که بر شادابی و عملکرد فضاهای سبز شهری تأثیر می‌گذارد (Marasco et al., 2015). برنامه‌ریزی صحیح مصرف آب در بخش فضای سبز بسیار مهم است، خصوصاً فضاهای سبز در مناطق خشک و نیمه خشک که دارای مشکل کمبود آب هستند. برخلاف محصولات کشاورزی، فضای سبز ترکیبی از گونه‌های مختلف گیاهی است که

رشد سریع جمعیت جهان و متناسب با آن افزایش نیاز آبی اعم از مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و توسعه شهری، ضرورت برنامه‌ریزی در جهت استفاده بهینه از آن را ایجاد می‌کند. از طرفی تأثیرات سازنده فضاهای سبز بر کیفیت و زیست‌پذیری محیط شهری در بسیاری از مطالعات گزارش شده است (Robitu et al., 2006; Petralli et al., 2014; Ozdogan et al., 2010; Kjelgren et al., 2000). در یک محیط خشک شهری این تأثیرات می‌تواند بیشتر آشکار شوند زیرا در آن سطح بالای آلودگی، میزان بارندگی پایین و الگوی گرمایی روزانه برجسته‌تری وجود دارد (Pearlmutter et al., 2007, Rosenfeld, 2000). فضای سبز شهری می‌تواند اثر جزیره گرمایی شهری را کاهش (Corporation-IPOS Consulting, 2008)، آسایش حرارتی را

۱- دانشجوی دکتری علوم مهندسی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳- کارشناسی ارشد در رشته مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: mmashal@ut.ac.ir)

میرزایی (Sojoodi and Mirzaei, 2020) در پژوهشی تبخیر- تعرق فضای سبز شهری در شهر کرج را با استفاده از دو روش Wucols و بیلان آب تخمین زدند. نتایج تحقیق نشان داد که روش Wucols میزان تبخیر- تعرق را کمتر از روش بیلان آب برآورد کرده و سلامت و زیبایی ظاهری گیاهان حفظ و از هدررفت آب جلوگیری می‌شود. در تحقیق دیگری سجودی و میرزایی (Sojoodi and Mirzaei, 2020) نیاز آبی و ضرایب گیاهی گیاه همیشه بهار را در دو ریزاقلیم متفاوت با استفاده از دو روش Wucols و بیلان آب برآورد کردند. سعیدی‌نیا و همکاران (Saedinia et al., 2018) تبخیر- تعرق دو گونه بابونه و زیره سبز را با استفاده از لایسیمتر برآورد کردند. نوری و همکاران (Nouri et al., 2016) روش‌های مختلف از جمله روش‌های سنجش از دور، روش Wucols و روش بیلان آب را برای تعیین تبخیر- تعرق در فضای سبز شهری مورد بررسی قرار دادند. در تحقیقات انجام شده نیاز آبی گیاهان در فضای سبز برای یک یا چند گونه گیاهی به طور مجزا و با یک روش برآورد شده است. هدف از این پژوهش تعیین تبخیر- تعرق با استفاده از سه روش برای سطح بزرگتری از فضای سبز است که شامل انواع گونه‌های گیاهی می‌باشد.

تبخیر- تعرق محصولات کشاورزی

میزان تقاضای آب گیاه مستقیماً به مقدار آبی که از طریق فرآیند تبخیر- تعرق از بین می‌رود ارتباط دارد. مقدار کل آب از دست رفته در طی مراحل رشد گیاه شامل آبی است که به عنوان بخار از طریق تبخیر از خاک به همراه تعرق از گیاه به هوا باز می‌گردد (Doorenbos et al., 1977). پارامترهای هواشناسی، عوامل گیاهی، مدیریت زراعی و محیطی از جمله عوامل مؤثر بر هر یک از اجزای تبخیر تعرق می‌باشند (Allen et al., 1998). تبخیر- تعرق مرجع اغلب به عنوان یک پارامتر اساسی برای محاسبه نیاز آبی گیاهان فضای سبز و کشاورزی استفاده می‌شود تبخیر- تعرق یک محصول خاص با تعیین ضریب گیاهی و تبخیر- تعرق مرجع محاسبه می‌شود. دما، رطوبت، سرعت باد و تابش پارامترهای مهم آب و هوایی مؤثر بر میزان تبخیر- تعرق هستند (Hama et al., 2011). به منظور در نظر گرفتن این داده‌های آب و هوایی، تبخیر- تعرق مرجع معرفی شده تا نشان دهنده تبخیر- تعرق از یک سطح محصول استاندارد باشد. نوع محصول، اندازه، مرحله رشد، سیستم ریشه زایی، پوشش گیاهی و ارتفاع بوته برای پیش‌بینی میزان تبخیر- تعرق محصول مورد نیاز است. رابطه بین داده‌های آب و هوایی و ویژگی‌های محصول با معادله (۱) بیان می‌شود:

هر یک از آن‌ها نیاز آبی متفاوتی دارند (Wolf and Lundholm, 2008). برآورد تبخیر- تعرق فضای سبز شهری در مقایسه با یک مزرعه کشاورزی به دلیل ناهمگن بودن گیاهان، فضای سبز کوچک و جداگانه و وجود اقلیم‌های مختلف دشوار است (Litvak and Pataki, 2016). هدف از برآورد نیاز آبی برای فضای سبز شهری نیز با هدف از تعیین نیاز آبی برای یک مزرعه کشاورزی متفاوت است. در فضای سبز شهری هدف حفظ رشد خوب، شکل ظاهری و سلامتی قابل قبول گیاهان است، در حالی که تولید بیومس هدف اصلی در مزارع کشاورزی است. بنابراین، فضای سبز شهری را می‌توان به طور معمول با استفاده از سطحی از آبیاری که کمتر از مقدار آب مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی است، مدیریت کرد (Costello et al., 2000; Allen et al., 2011). با توجه به محدودیت منابع آب در مناطق خشک، استفاده از میزان آبیاری کمتر در فضای سبز شهری می‌تواند برای صرفه جویی در مصرف آب مطلوب باشد (Nouri et al., 2013). روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر- تعرق در فضای سبز شهری توسط نوری و همکاران (Nouri et al., 2013) مورد بحث قرار گرفته است و مزایا و معایب هر روش به طور جامع بررسی شده است.

برخی از روش‌های مبتنی بر فاکتور یا عامل وجود دارند که انواع مختلفی از ضرایب را تولید می‌کنند تا تمام این تأثیرات را در تعیین نیاز آبی فضای سبز شهری منعکس نمایند، مانند طبقه‌بندی استفاده از آب در فضای سبز (Wucols) (Costello et al., 2000)، برنامه مدیریت آبیاری فضای سبز (Limp) (Snyder and Eching, 2010; Snyder, 2010)، روش Ipos^۳ (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008) و روش عامل گیاه (Pf)^۴ (Hilaire et al., 2018; Pittenger et al., 2001; Pittenger et al., 2008; Shaw and Pittenger, 2004). شجاعی و همکاران (Shojaei et al., 2018) در مطالعه‌ای دو روش مبتنی بر عامل، Wucols و Limp را برای اندازه‌گیری تقاضای آب در دو فضای سبز ناهمگن شهری (یک باغ گیاهشناسی و یک پارک جنگلی) در اصفهان را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، روش Wucols میزان آب مورد نیاز باغ گیاه شناسی و پارک جنگلی را به ترتیب ۵ و ۴۴ درصد کمتر از روش Limp تخمین زد. نوری و همکاران (Nouri et al., 2013) تبخیر- تعرق را در پارک‌لند^۵های استرالیای جنوبی با استفاده از سه روش Wucols، Ipos و Pf برآورد کردند. نتایج نشان داد که روش Ipos تبخیر- تعرق را کمتر از روش Wucols تخمین می‌زند و روش Wucols بالاترین برآورد نیاز آبی را دارد. سجودی و

4- Plant factor

5- Parkland

1- Water Use classification of landscape species

2- Landscape irrigation management program

3- Irrigated Public Open Space

همچنین می‌توان از روش فاکتور گیاه (Pf) یا "فاکتور استفاده از آب توسط گیاه" (آب مصرفی گیاه) استفاده کرد. Pf به عنوان مقدار آبی تعریف می‌شود که به عنوان درصدی از ET_0 نشان داده شده که برای حفظ حداقل عملکرد گیاه و حداقل عملکرد زیبایی قابل قبول به جای تأمین رشد و نمو مطلوب مورد نیاز است. روش (Ipos) از یک عامل تنش گیاه (Kst) استفاده می‌کند. Ipos توسط دولت استرالیای جنوبی به عنوان بخشی از استراتژی مورد تایید آب آدلاید برای تعیین چارچوبی برای اطمینان از مصرف آب به طور کارآمد در آبیاری فضای سبز شهری پشتیبانی می‌شود. این روش بیشتر به چمنزارها می‌پردازد تا به درختان و بوته‌ها (South Australian Water Corporation- IPOS Consulting, 2008). روش دیگر یک روش کمی با عنوان برنامه مدیریت آبیاری فضای سبز (Limp) است که برای برآورد تبخیر- تعرق فضای سبز توسط اسنایدر و اسپینگ (Snyder and Eching, 2005) پیشنهاد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

این پژوهش در فضای سبز دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران در کرج انجام شده است. شهر کرج (عرض جغرافیایی: $35^{\circ} 48' 45''$ شمال شرقی، طول جغرافیایی: $51^{\circ} 30' 0''$) در ارتفاع ۱۲۹۷ متر از سطح دریا در شمال غربی ایران واقع شده است. متوسط بارندگی سالانه در کرج ۲۵۱ میلی‌متر است. فصل زمستان با 42.3% درصد و فصل تابستان با $1/5$ درصد بیشترین و کمترین سهم را در بارش سالانه بر عهده دارند. حداقل و حداکثر مطلق دما به ترتیب 20° - و 42° درجه و میانگین سالانه نیز $14/1$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. گونه‌های گیاهی موجود در فضای سبز دانشکده شامل افرای سیاه، پنیرک آفریقایی، زرشک زینتی، شمشاد ژاپنی، همیشه بهار، دانه مرغ، شیپوری بنفش، سرو شیراز، میخک، سنجد زینتی، یاس زرد، زبان گنجشک و چمن می‌باشند. شکل ۱ منطقه مطالعه را نشان می‌دهد.

$$ET_{crop} = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

در این معادله ET_c تبخیر- تعرق گیاه، ET_0 تبخیر تعرق مرجع و K_c ضریب گیاهی می‌باشد. بیشترین تأثیر اقلیم، در تبخیر- تعرق گیاه مرجع گنجانده شده است. بنابراین، همان طور که تبخیر- تعرق مرجع نمایه‌ای از تقاضای تبخیر در اقلیم مشخص است، ضریب گیاهی، به طور عمده، به ویژگی‌های گیاه و به طور محدودتر، به اقلیم بستگی دارد (Allen et al., 1998).

تبخیر- تعرق گیاهان فضای سبز

برآورد نیاز آبی در فضای سبز به سه دلیل مهم است: ۱. آب یک منبع طبیعی محدود است. استفاده کارآمد از آب در فضای سبز شهری به میزان قابل توجهی به حفاظت از این منبع کمک می‌کند. راندمان استفاده از آب تنها با تأمین مقدار آب کافی برای تأمین نیازهای گیاه قابل دستیابی است. ۲. هزینه‌های تأمین آب در حال افزایش است. لذا فقط با استفاده از آن مقدار آب مورد نیاز فضاهای سبز، و جلوگیری از استفاده زیاد، می‌توان از نظر اقتصادی نیز هزینه‌ها را کاهش داد. ۳. با شناسایی و تأمین نیازهای گیاه می‌توان صدمه به گیاه را که ناشی از کمبود آب یا مازاد آن است، کاهش داد (Costello et al., 2000). کاستلو و جونز (Costello and Jones, 1994) برای دستیابی به رشد مطلوب گیاه در فضای سبز، روشی عملی را ایجاد کردند که به عنوان طبقه‌بندی استفاده از آب در فضای سبز (Wucols) شناخته می‌شود. روش Wucols مبتنی بر رویکرد مورد استفاده در تخمین آب مورد نیاز گیاهان زراعی (FAO-56) است و این روش یک ضریب فضای سبز، متشکل از یک عامل گونه، یک عامل تراکم و یک عامل مربوط به اقلیم را در نظر می‌گیرد. یک کمیته متخصص گونه‌های مختلف گیاهی را در دسته‌های مختلف از نظر نیاز آبی که مربوط به ضرایب گیاهی آن‌ها است، طبقه‌بندی نمودند. این گیاهان به صورت تجربی براساس ارزیابی مزرعه‌ای تعیین شدند. در این روش تراکم پوشش گیاهی و ریزاقلیم نیز از طریق مشاهدات میدانی ارزیابی می‌شوند.



شکل ۱- تصویر هوایی از دانشکده کشاورزی کرج

Figure 1- Aerial photo of Karaj Department of Agriculture and Natural Resources

روش Wucols

روش Wucols برای تخمین نیاز آبی در فضای سبز توسط کاستلو و همکاران (Costello et al., 2000) ایجاد شده است. آن‌ها دستورالعمل طبقه بندی استفاده از آب گونه‌های فضای سبز (Wucols) را برای کاشت فضای سبز در کالیفرنیا تهیه کردند. روش wucols با استفاده از تبخیر- تعرق مرجع و مجموعه‌ای از ضرایب، تبخیر-تعرق را در فضای سبز برآورد می‌کند که با معادله (۲) نشان داده شده است.

$$ET_L = ET_0 \times K_L \quad (2)$$

در این معادله ET_L تبخیر- تعرق در فضای سبز، ET_0 تبخیر- تعرق مرجع و K_L ضریب گیاهی در فضای سبز می‌باشد.

ضریب فضای سبز از سه عامل گونه، عامل تراکم و عامل ریزاقلیم تشکیل می‌شود. از فاکتور گونه (K_s) برای محاسبه تفاوت در نیاز آبی گونه گیاه استفاده می‌شود. معمولاً مجموعه‌های فضای سبز دارای گونه‌های متفاوت می‌باشند که در داخل یک منطقه و به صورت مشترک آبیاری می‌شوند. این گونه‌های مختلف هرکدام دارای نیاز آبی متفاوتی هستند. دامنه عامل گونه از ۰/۱ تا ۰/۹ متغیر بوده و در ۴ گروه گونه‌های با نیاز آبی خیلی کم (K_s کمتر از ۰/۱)، کم (۰/۱-۰/۳)، متوسط (۰/۴-۰/۶) و زیاد (۰/۷-۰/۹) طبقه‌بندی می‌شود. از میان ۱۸۰۰ گونه فضای سبز که برآورد ضرایب روش Wucols برای آن‌ها انجام شده است، ۶ گونه به عنوان نمونه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول مناطق از نظر آب و هوایی به ۶ منطقه شامل مناطق ساحلی و شمالی با آب و هوای معتدل و مرطوب، مناطق مرکزی با آب و هوای معتدل، مناطق ساحلی و جنوبی با رطوبت و میانگین دمای بالا تقسیم شده‌اند. همچنین علائم نیاز آبی در این جدول به صورت: H: نیاز آبی بالا، M: متوسط، L: کم، /: نامناسب برای منطقه مورد نظر و VI: بسیار کم طبقه‌بندی شده است. انواع گیاهان نیز به این صورت نشانه‌گذاری شده‌اند: T: درخت، S: بوته، V: تاک، GC: گیاه پوششی، P: چندساله و Bi: دوساله (Costello et al., 2000). هنگامی که فقط یک گونه در سطح فضای سبز و ناحیه مورد نظر جهت آبیاری وجود دارد (کشت تک گونه‌ای)، مقدار K_s با استفاده از فهرست Wucols III به دست می‌آید. در کشت چند گونه‌ای به‌طور کلی اگر گونه‌ها دارای نیاز آبی مشابه باشند به این صورت عمل می‌شود که معمولاً در مناطق پر آب یا مناطق خشک، گونه‌هایی کشت می‌شوند که از نظر نیاز آبی بسیار مشابه یکدیگر بوده و دارای نیاز آبی زیاد و یا نیاز آبی کم می‌باشند. در این گونه موارد

انتخاب یک مقدار K_s به‌سادگی صورت می‌گیرد. به این صورت که طبقه‌ای را که همه گونه‌ها در آن قرار دارند انتخاب نموده و مقدار مناسب با توجه به دامنه عامل گونه که گفته شد استخراج می‌گردد. اگر گونه‌های کشت شده دارای نیاز آبی مشابه نباشند آنگاه گونه‌ای که بالاترین طبقه نیاز آبی را دارد مقدار ضریب K_s را مشخص خواهد کرد. این تصمیم برای جلوگیری از هرگونه صدمه تنش آب به گونه‌های دارای نیاز آبی بالا صورت می‌پذیرد (Costello et al., 2000). پس در حد امکان باید گیاهان کشت شده در فضاهای سبز واقع در یک منطقه دارای نیاز آبیاری مشابهی باشند. از عامل تراکم (K_d) در رابطه تعیین ضریب فضای سبز استفاده می‌شود تا تفاوت در تراکم پوشش گیاهی در بین کاشت‌های فضای سبز در نظر گرفته شود. در اینجا از تراکم پوشش گیاهی برای اشاره به سطح برگ جمعی همه گیاهان در فضای سبز استفاده می‌شود. تفاوت در تراکم پوشش گیاهی یا سطح برگ منجر به تفاوت در از دست دادن آب توسط پوشش گیاهی می‌شود. بعضی از کشت‌های فضای سبز سطح برگ بیشتر دارند. افزایش تراکم و سطح برگ معمولاً به معنای افزایش تبخیر تعرق برای آن منطقه از کشت گیاهان فضای سبز است. به‌طور خلاصه یک فضای سبز با الگوی کشت متراکم آب بیشتری از یک فضای سبز غیر متراکم مصرف می‌کند. ضریب تراکم بین ۰/۵ تا ۱/۳ تغییر کرده و به سه طبقه پایین (۰/۵ - ۰/۹)، متوسط (۱) و بالا (۱/۱ - ۱/۳) گروه‌بندی می‌شود. ریزاقلیم‌ها در هر فضای سبزی وجود داشته و باید در تخمین آب مصرفی گیاه مورد توجه قرار گیرند. خصوصیات فضاهای شهری مانند ساختمان‌ها، ارتفاع ساختمان، جهت‌گیری و توزیع ساختمان‌ها و سنگفرش (Erell and Williamson, 2007; Edussuriya, 2000) بر دما، سرعت باد، شدت نور و رطوبت تأثیر می‌گذارند (Shojaei et al., 2018; Costello et al., 2000). ممکن است در یک فضای سبز قسمتی از گیاهان در سایه و قسمتی در آفتاب، قسمتی دارای رطوبت هوای زیاد و گیاهانی در قسمت‌های بادگیر باشند. مناطقی که بیشتر طول روز در معرض تابش نور خورشید و همچنین وزش باد می‌باشند در طبقه ریزاقلیم بالا قرار می‌گیرند. مناطقی که در سایه‌انداز گیاهان هستند و یا دارای رطوبت بیشتری هستند در طبقه ریزاقلیم پایین قرار می‌گیرند. این تنوع در ریزاقلیم روی نیاز آبی گیاهان تأثیرگذار است. مقادیر ریزاقلیم (K_{mc}) از ۰/۵ تا ۱/۴ متغیر است و در سه دسته کم (۰/۵ - ۰/۹)، متوسط (۱) و زیاد (۱/۴ - ۱/۱) طبقه بندی می‌شود. (Costello et al., 2000). ضریب فضای سبز از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$K_L = K_s \times K_d \times K_{mc} \quad (3)$$

جدول ۱- برآورد ضریب گیاهی با روش wucols (Costello et al., 2000)
Table 1- Plant coefficient estimation by Wucols method (Costello et al., 2000)

Type (نوع)	Scientific name (نام علمی)	Climatic zone (منطقه اقلیمی)					
		1	2	3	4	5	6
SCG	Berberis thunbergii	L	L	L	L	L	M
T	Acer nigrum	M	M	M	M	/	/
S	Forsythia	L	L	M	M	M	M
T	Eucalyptus	L	L	L	L	M	M
P	Syzygium aromaticum	M	M	M	M	M	M
V	Calla lily	M	M	M	M	/	M

روش عامل گیاه (PF)

کم‌آبیاری یک راهبرد برای تولید پایدار در شرایط کمبود آب است. گرچه با اعمال کم‌آبیاری تا حدودی گیاه تحت تنش آبی قرار می‌گیرد ولی با تنظیم مراحل آبیاری و بهینه‌سازی می‌توان از واحد حجم آب حداکثر استفاده را به عمل آورد. تحقیقات متعددی برای گیاهان زراعی و اثر کم‌آبیاری بر آن‌ها انجام شده است در صورتی که برای گیاهان فضای سبز تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. PF یا عامل گیاهی، حداقل آبیاری قابل قبول برای گیاهان فضای سبز است که تاکید بر حفظ زیبایی گیاه دارد. اکثر گیاهان فضای سبز شهری بدون چمن می‌توانند عملکرد و زیبایی قابل قبول را حتی در برخی از سطوح کم آبیاری حفظ کنند (Glenn et al., 2013; Kjellgren et al., 2000; Montague et al., 2007). به دلیل ناکافی بودن ضرایب گیاهی برای تعریف نیازهای آبیاری گیاهان فضای سبز به منظور تأمین حداقل رشد و شکل ظاهری قابل قبول گیاهان، مفهوم عامل گیاه (PF) ایجاد شد. در این روش آب مورد نیاز گیاهان فضای سبز به عنوان درصدی از ET_0 محسوب می‌شود بطوری که موجب کاهش زیبایی ظاهری و عملکرد آن‌ها نشود. در این رویکرد PF یک عامل تنظیم است که در حقیقت به جای K_c در نظر گرفته می‌شود و در ET_0 ضرب می‌شود با این تفاوت که تأکید آن بر ظاهر گیاه است و نه رشد و عملکرد مطلوب آن. پیتینگر و همکاران (Pittenger et al., 2008) نیاز آبی را برای برخی از گونه‌های گیاهی فضای سبز در شش منطقه مختلف که در روش Wucols ذکر شد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که رایج‌ترین گیاهان در فضای سبز توسعه و عملکرد قابل قبولی را با میزان کاربرد آبیاری ۲۰ - ۸۰ درصد تبخیر تعرق مرجع ($Pf = 0.2-0.8$) حفظ می‌کنند. در یک فضای سبز با اکثر گیاهان در محدوده $Pf = ۲۰ - ۵۰$ درصد برای گونه‌های گیاهی که Pf برای آن‌ها ناشناخته است، مقدار اولیه ۰/۵ توصیه می‌شود و بسته به عملکرد مشاهده شده گیاه می‌توان این مقدار را تنظیم کرد. پیتینگر و همکاران (Pittenger et al., 2008) Pf را برای چند گونه از گیاهان تعیین نمودند. این گیاهان شامل hibiscus که از تیره گیاهان گل‌دار از خانواده مالوآسه است، pittosporum که گیاه گل‌دار از خانواده پیتوسپوراسه است و Prunus که نوعی درخت و درختچه شامل

میوه‌های زردآلو، گیلاس و بادام است می‌باشند و میزان Pf آن‌ها به میزان ۴۰ - ۶۰ درصد تبخیر تعرق مرجع تعیین گردید. همچنین Pf برای گیاه Lantana ۲۰ - ۳۰ درصد تبخیر تعرق مرجع تعیین شد.

روش IPOS

معمولاً برای حفظ ظاهر و زیبایی فضای سبز اغلب از گیاهانی استفاده می‌شود که نیاز آبی نسبتاً بالایی دارند و با توجه به محدودیت‌های موجود نمی‌توان در زمان کوتاه این گیاهان را جایگزین گیاهان کم مصرف و مقاوم به خشکی کرد، در این شرایط لازم است برای جلوگیری از اتلاف آب، نیاز آبی دقیق این گیاهان را برآورد کرد. چمن به‌عنوان یکی از گیاهان اصلی و ضروری اغلب باغ‌ها و پارک‌ها نقش مهمی را در طراحی و ایجاد فضای سبز ایفا می‌کند. از آنجایی که سطح وسیعی از ایران دارای آب و هوای خشک و نیمه خشک است، در چنین اقلیمی ایجاد فضای سبز و چمن کاری بهتر است با در نظر گرفتن نوع چمن باشد. چمن‌های گرمسیری که به درجه حرارت زیاد مقاوم‌اند، در سرما قهوه‌ای می‌شوند و به خواب می‌روند، رشد بهینه آن‌ها در نور کامل خورشید و درجه حرارت ۲۵ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد است. چمن‌های سردسیری که در آب و هوای خنک به خوبی رشد می‌کنند، به گرمای زیاد مقاوم نیستند و درجه حرارت مناسب برای رشد آن‌ها ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد است (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008). این روش توسط دولت استرالیای جنوبی برای برنامه‌ریزی و مدیریت نیاز آبی در فضاهای باز عمومی و به خصوص چمن‌های ورزشی و پارک‌های تفریحی توسعه یافته است. در این روش نیاز آبی چمن در فضای باز شهری محاسبه می‌شود. در این روش، تبخیر تعرق گیاه (ET_L) با ضرب سه عامل تبخیر تعرق مرجع (ET_0) و ضریب گیاهی چمن (K_c) و یک عامل تنش مربوط به گیاه (K_{st}) محاسبه می‌شود. نحوه برآورد تبخیر تعرق با روش Ipos با رابطه ۴ نشان داده شده است.

$$ET_L = ET_0 \times K_c \times K_{st} \quad (۴)$$

جدول ۲- ضریب گیاهی انواع چمن (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008)

Type of grass (نوع چمن)	Cold grass (چمن سردسیری)	Tropical grass (چمن گرمسیری)
(K _c) Plant coefficient ضریب گیاهی	0.8 - 0.95	0.6 - 0.8

جدول ۳- فاکتورهای تنش چمن

Table 3- Turf grass crop stress factors (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008)

Classification TQVS (طبقه‌بندی)	TQVS1	TQVS2	TQVS3	TQVS4
شاخص استاندارد بصری کیفیت				
Description (توصیف)	Elite sports turf (چمن ورزشی درجه یک)	Premier sports turf (چمن ورزشی خوب)	Local sports turf (چمن ورزشی متوسط)	Passive recreational turf (چمن تفریحی ضعیف)
(K _{st}) stress factor (عامل تنش)	1	0.6	0.5	0.4

را بر مبنای داده‌های هواشناسی محاسبه کرد (Allen et al., 1998). تبخیر - تعرق مرجع را با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی (میانگین دمای حداکثر، میانگین دمای حداقل، درصد رطوبت نسبی، میانگین ساعات آفتابی و میانگین سرعت باد) و با روش فائو- پنمن-مانیت طبق رابطه (۵) می‌توان برآورد نمود.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (5)$$

در این رابطه ET₀ تبخیر تعرق مرجع (mm/day)، R_n تابش خالص در سطح گیاه است (MJ m⁻² day⁻¹)، G تراکم شار حرارت خاک است (MJ m⁻² day⁻¹)، T میانگین دمای روزانه هوا در ارتفاع ۲ متر است (°C)، U₂ سرعت باد در ارتفاع ۲ متر است (m/s)، e_s فشار بخار اشباع است (Kpa)، e_a فشار بخار واقعی است (Kpa)، Δ شیب منحنی فشار بخار است (KPa °C⁻¹) و γ ضریب رطوبتی است (KPa °C⁻¹).

نیاز آبیاری ناخالص

نیاز آبی گیاه تحت آبیاری برای تبخیر- تعرق با بارش موثر (Pe) و آبیاری خالص (IN) تأمین می‌شود. بخشی از بارش که برای رفع تبخیر- تعرق گیاه استفاده می‌شود، شامل رواناب سطحی و نفوذ عمقی نیست و بارش موثر نامیده می‌شود. این مقدار به قسمتی از بارش که در خاک نفوذ می‌کند و ذخیره می‌شود و برای گیاه در دسترس است اشاره دارد (Nouri et al., 2013). نیاز آبی خالص از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$I_N = ET_L - P_E \quad (6)$$

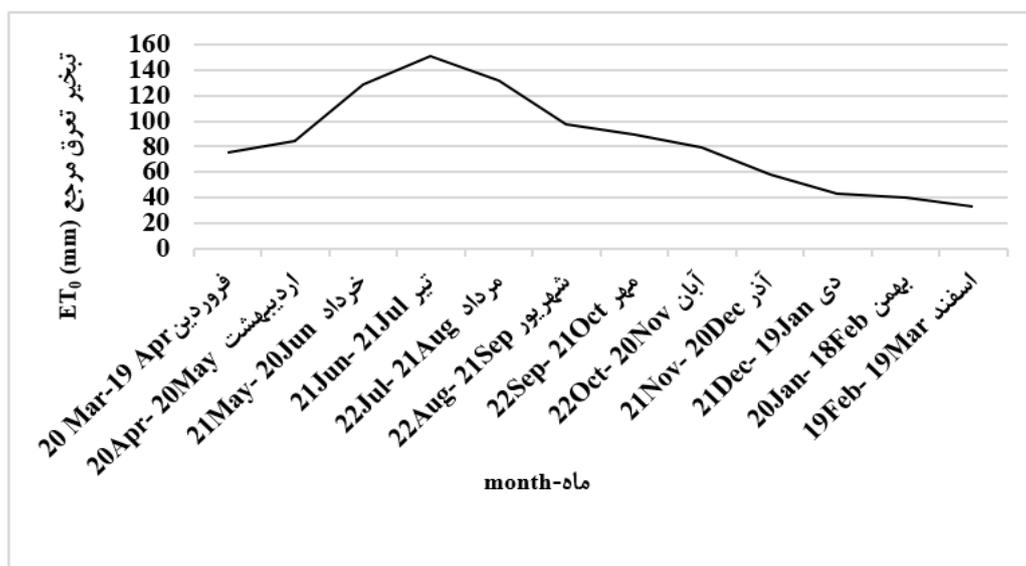
در این رابطه I_N نیاز خالص آبیاری (میلی‌متر)، ET_L تبخیر- تعرق فضای سبز (میلی‌متر) و P_E بارندگی موثر (میلی‌متر) می‌باشند.

ضریب گیاه چمن (K_c) برای انواع مختلف و اندازه‌های متفاوت چمن‌ها از ۰/۶ برای چمن‌های فصل گرم، مانند Kikuyu و Couch تا ۰/۹۵ برای چمن‌های فصل خنک، مانند چمن چاودار متفاوت است. چمن‌های گرمسیری ۳۰ تا ۵۰ درصد آب کمتری نسبت به چمن‌های سردسیری مصرف می‌کنند و باید دقت شود چمنی که انتخاب می‌شود به کم‌ترین میزان آبیاری نیاز داشته باشد. در این روش گیاه چمن به دو دسته گرمسیری و سردسیری دسته‌بندی شده است و بر اساس نوع چمن K_c آن مشخص شده است. جدول ۲ ضرایب K_c را نشان می‌دهد (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008).

عامل تنش گیاه (K_{st}) بیشتر برای نشان اطمینان از عملکرد مناسب زیبایی و سلامت چمن به‌خصوص هنگامی که اقدامات حفاظت از آب و کاهش مصرف آب اعمال می‌شود، به کار می‌رود. بسته به عملکرد و استاندارد مورد نیاز سطح چمن، فضای سبز آبیاری شده به چهار شاخص استاندارد بصری کیفیت چمن یا TQVS طبق جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008).

تبخیر- تعرق مرجع (ET₀)

تبخیر- تعرق یک سطح بدون کمبود آب، تبخیر-تعرق گیاه (سطح) مرجع یا تبخیر-تعرق مرجع نامیده می‌شود و با ET₀ نشان داده می‌شود. سطح مرجع، یک گیاه مرجع فرضی با ویژگی‌های مشخص می‌باشد. مفهوم تبخیر- تعرق مرجع برای بررسی تقاضای تبخیر در اتمسفر صرف نظر از نوع گیاه، مرحله رشد آن و عملیات مدیریت زراعی توصیف شد. هنگام کافی بودن آب خاک، تبخیر تعرق مرجع به عوامل مرتبط با خاک بستگی ندارد. پارامترهای هواشناسی تنها عوامل مؤثر بر تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشند. بنابراین، تبخیر- تعرق گیاه مرجع یک نمایه وابسته به اقلیم است و می‌توان آن



شکل ۲- منحنی تبخیر تعرق مرجع
Figure 2- Reference evapotranspiration curve

میزان ۳۳ میلی‌متر است و مجموع آن در طول مدت یک سال ۱۰۱۱/۸ میلی‌متر می‌باشد

برآورد تبخیر- تعرق با روش Wucols

برای تعیین تبخیر- تعرق فضای سبز مورد مطالعه ابتدا باید ضریب فضای سبز (K_L) برآورد گردد. برای این منظور ضریب فضای سبز با استفاده از سه عامل گونه، تراکم و ریزاقلیم برآورد شد. با توجه به نوع پوشش گیاهی و میزان تقاضای آب آن‌ها فاکتور گونه ۰/۵، عامل تراکم ۱ و عامل ریزاقلیم ۱/۱ از طبقه ریزاقلیم بالا انتخاب شد و ضریب فضای سبز ۰/۵۵ برآورد گردید که حاصل ضرب سه عامل می‌باشد و با ضریب فضای سبز به دست آمده در مطالعه نوری و همکاران (Nouri et al., 2013) و سالوادور و همکاران (Salvador et al., 2011) به ترتیب به میزان ۰/۵۵ و ۰/۵۶ سازگاری دارد. نتایج نشان داد که بیشترین میزان تبخیر- تعرق به دست آمده با روش wucols، در تیر ماه به میزان ۸۳/۳۸ میلی‌متر است. همچنین میزان تبخیر- تعرق در طول یک سال دوره آزمایش ۵۵۶/۵ میلی‌متر برآورد گردید. روند صعودی و نزولی نمودار تبخیر- تعرق به دلیل افزایش و کاهش رشد و تبخیر- تعرق گیاهان با توجه به شرایط اقلیمی می‌باشد. پوشش گیاهی در فصل زمستان نیاز آبی کمتری دارد و برخی گونه‌های گیاهی در خواب زمستانه هستند پس تقاضای آب در این فصل کاهش پیدا می‌کند. برخلاف زمستان در فصل تابستان نیاز آبی گیاهان بیشتر است و در این مطالعه در تیر ماه تقاضای آب به حداکثر رسیده است. در یک مطالعه نوری و همکاران (Nouri et al., 2016) تبخیر- تعرق فضای سبز را در آدلاید استرالیای جنوبی با استفاده از

در هر دوره که مقدار بارندگی موثر از تبخیر- تعرق گیاه بیشتر باشد میزان نیاز آبیاری خالص صفر در نظر گرفته می‌شود. آبیاری خالص و بارش موثر کل نیازهای آب واقعی گیاهان را تامین نمی‌کنند. بنابراین مقدار آبی که در واقع با در نظر گرفتن تلفات آب به کار رفته و به آن نیاز ناخالص آبیاری گفته می‌شود باید تعیین شود. با توجه به کارایی اکثر سیستم‌های آبیاری، آب اضافی به جز تبخیر- تعرق باید برای گیاهان فراهم شود تا تلفات آب را جبران کند. نیاز ناخالص آبیاری از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در این رابطه I_G نیاز ناخالص، ET_L تبخیر- تعرق فضای سبز و E_a راندمان آبیاری می‌باشند. فضای سبز منطقه مطالعه به روش بارانی کلاسیک آبیاری می‌شود و راندمان آبیاری در فضای سبز مورد مطالعه ۷۰ درصد تعیین شده است.

$$I_G = \frac{ET_L}{E_a} \quad (7)$$

نتایج و بحث

محاسبه تبخیر تعرق مرجع (ET_0)

برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع از داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه هواشناسی کرج در بازه ۲۰ سال (۱۳۷۸-۱۳۹۸) استفاده شد. تبخیر- تعرق مرجع برای هرماه محاسبه گردید و منحنی آن در شکل ۲ رسم شده است. همانطور که در شکل مشخص است بیشترین میزان تبخیر- تعرق در تیر به میزان ۱۵۱/۶ میلی‌متر رخ داده است. از فروردین تا تیر روند منحنی صعودی است و از مرداد تا اسفند روند آن نزولی می‌شود. کمترین میزان تبخیر- تعرق نیز متعلق به اسفند به

عامل تنش گیاه (K_{st}) بسته به عملکرد و کیفیت سطح چمن، در فضای سبز موجود از جدول ۳ و به میزان ۰/۴ انتخاب گردید. سپس ضریب فضای سبز با ضرب K_c در K_{st} به میزان ۰/۲۴ محاسبه شد. بنابراین برای تعیین میزان تبخیر-تعرق، ضریب فضای سبز محاسبه شده در تبخیر-تعرق مرجع ضرب گردید. بیشترین میزان تبخیر-تعرق در تیر ماه به میزان ۳۶/۳۸ میلی‌متر و در طول دوره آزمایش ۲۴۲/۹ میلی‌متر برآورد گردید. در مطالعه‌ای توسط نوری و همکاران (Nouri et al., 2013) به برآورد تبخیر-تعرق در استرالیا جنوبی با استفاده از سه روش Wucols، Ipos و Pf پرداخته شد. نتایج نشان داد که روش Ipos نیاز آبی را کمتر از روش Wucols تخمین می‌زند و روش Wucols بالاترین برآورد تقاضای آب را در بین سه روش دارد. از آنجا که با استفاده سالانه ۷۷۰ میلی‌متر آب آبیاری، سطوح زیبایی پذیرفتنی برای فضای سبز به دست آمد، نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که روش Wucols بهترین تخمین آب مورد نیاز پوشش گیاهی شهری را برای منطقه مورد مطالعه تولید کرده است. بر اساس نتایج به دست آمده از این تحقیق روش‌های مناسب برای تخمین نیاز آبی گیاهان فضای سبز، روش‌های Wucols سپس Pf و در آخر روش Ipos می‌باشند. که نتایج تحقیق حاضر نیز با این نتایج سازگاری دارد. از آنجایی که روش Ipos فقط نیاز آبی چمن را محاسبه می‌کند جهت استفاده از این روش پیشنهاد می‌شود در نواحی که دارای پوشش سطحی چمن به صورت غالب نسبت به سایر ترکیب‌های گیاهی می‌باشند، آبیاری طبق نیاز آبی تخمین زده شده با این روش تنظیم گردد و برای سایر گیاهان در صورت لزوم با توجه به نیاز آبی آن‌ها آبیاری تکمیلی انجام شود. در شکل ۳ میزان تبخیر-تعرق برآورد شده از سه روش و تبخیر-تعرق مرجع مقایسه شده‌اند.

در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ میزان نیاز خالص آبیاری به دست آمده با استفاده از تفاضل تبخیر-تعرق محاسبه شده توسط روش‌های Wucols، Ipos و Pf و میزان بارش موثر نشان داده شده است. با استفاده از روش Wucols و Ipos آبیاری از ماه دی تا اسفند می‌تواند متوقف شود زیرا میزان بارندگی موثر از تبخیر-تعرق بیشتر است و با استفاده از روش Ipos آبیاری از آبان تا فروردین می‌تواند متوقف شود. در شکل ۷ نیاز ناخالص آبیاری با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۷۰ درصد برای هر ماه با استفاده از هر سه روش برآورد و رسم شده است. در روش Wucols میزان نیاز ناخالص آبیاری در طول یک سال ۷۹۴/۸ میلی‌متر، در روش Ipos ۷۲۲/۷ میلی‌متر و در روش Wucols ۳۴۶/۹ میلی‌متر برآورد گردید. که با توجه به میزان آبیاری برای منطقه مورد مطالعه که به میزان ۹۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد روش Wucols نزدیک‌ترین نتیجه را به میزان آبیاری دارد. در جدول ۴ آبیاری ناخالص فصلی برای سه روش محاسبه شده است.

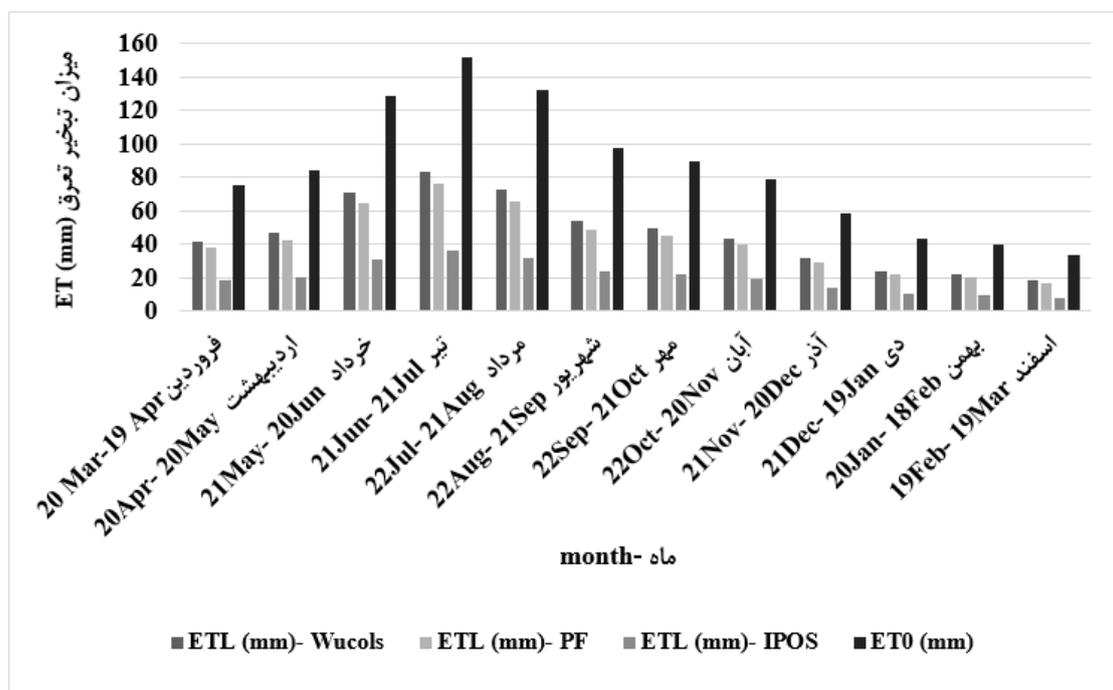
روش‌های Wucols و موازنه آب خاک برآورد کردند. نتایج نشان داد که میزان نیاز آبی تعیین شده با روش موازنه آب خاک ۱۰۸۴ میلی‌متر در سال است. در حالی که میزان آب مورد نیاز با استفاده از روش Wucols تنها ۸۰۲ میلی‌متر تعیین شد. یعنی روش Wucols میزان آب مورد نیاز را ۲۶ درصد کمتر برآورد کرده است. در تحقیق دیگری توسط سجودی و میرزایی (Sojoodi and Mirzaei, 2020) تبخیر-تعرق فضای سبز با استفاده از دو روش Wucols و بیلان آب مورد بررسی قرار گرفت. تبخیر-تعرق برآورد شده به صورت میانگین در طول دوره آزمایش مقدار ۷۵۷ میلی‌متر در روش بیلان آبی و ۶۴۱ میلی‌متر در روش Wucols برآورد شد. میزان تبخیر-تعرق با استفاده از روش Wucols ۱۵/۳ درصد کمتر از روش بیلان آب به دست آمد. متوسط ضریب گیاهی نیز از روش بیلان آب و Wucols به ترتیب ۰/۳۶ و ۰/۳ محاسبه گردید. نتایج تحقیق نشان داد که روش Wucols دارای دقت بیشتری بوده و در مصرف آب نیز صرفه‌جویی می‌کند و گیاهان نیز دچار تنش آبی نمی‌شوند و ظاهر و رشد مناسب و قابل قبولی دارند. در مطالعه دیگری توسط سجودی و میرزایی (Sojoodi and Mirzaei, 2020) نیاز آبی برای گیاه همیشه‌بهار برآورد گردید. نتایج تبخیر-تعرق برآورد شده برای گیاه همیشه‌بهار در این مطالعه به صورت میانگین مقدار ۷۷۶ میلی‌متر در روش بیلان آب و مقدار ۶۰۷ میلی‌متر در روش Wucols را در کل دوره آزمایش نشان می‌دهد. در این تحقیق روش Wucols تبخیر-تعرق را به میزان ۲۱ درصد کمتر از روش بیلان آب برآورد کرده است.

برآورد تبخیر-تعرق با روش PF

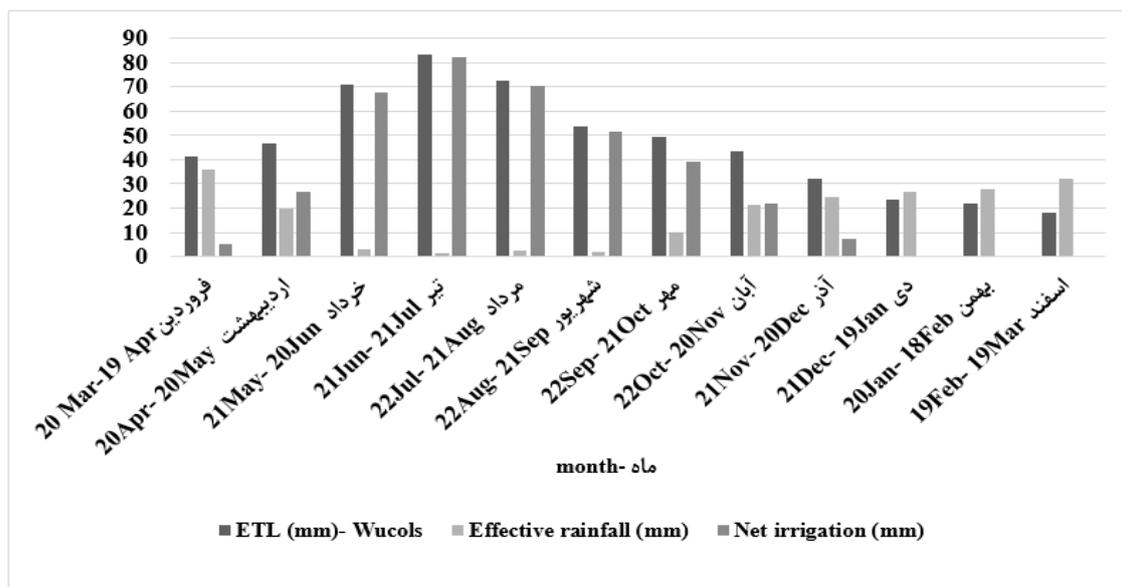
برای برآورد تبخیر-تعرق فضای سبز با استفاده از روش PF همان‌طور که در بخش سوم مقاله توضیح داده شد برای گونه‌های گیاهی که PF برای آن‌ها ناشناخته است، مقدار اولیه ۰/۵ توصیه می‌شود بنابراین ضریب فضای سبز ۰/۵ تعیین گردید و در تبخیر-تعرق مرجع برای هر ماه ضرب شد. نتایج برآورد تبخیر-تعرق با روش PF نیز نشان دهنده حداکثر میزان تبخیر-تعرق در تیر ماه و به میزان ۷۵/۵۵ میلی‌متر می‌باشد. میزان تبخیر-تعرق در طول یک سال نیز ۵۰۵/۹ میلی‌متر برآورد گردید.

برآورد تبخیر-تعرق با روش IPOS

چمن Kikuyu که یک نوع فصل گرم است در فضای سبز مورد مطالعه استفاده شده است. ضریب گیاه چمن (K_c) برای این نوع چمن از جدول (۲) به میزان ۰/۶ انتخاب گردید که توسط شرکت مشاوره آب استرالیا جنوبی (South Australian Water Corporation-IPOS Consulting, 2008) و کاستلو و همکاران (Costello et al., 2000) نیز برای این نوع چمن توصیه شده است.



شکل ۳- نمودار تبخیر تعرق مرجع (ET₀) و تبخیر تعرق فضای سبز از سه روش
Figure 3- Reference Evapotranspiration Curve (ET₀) and Landscape Evapotranspiration (ET_L)

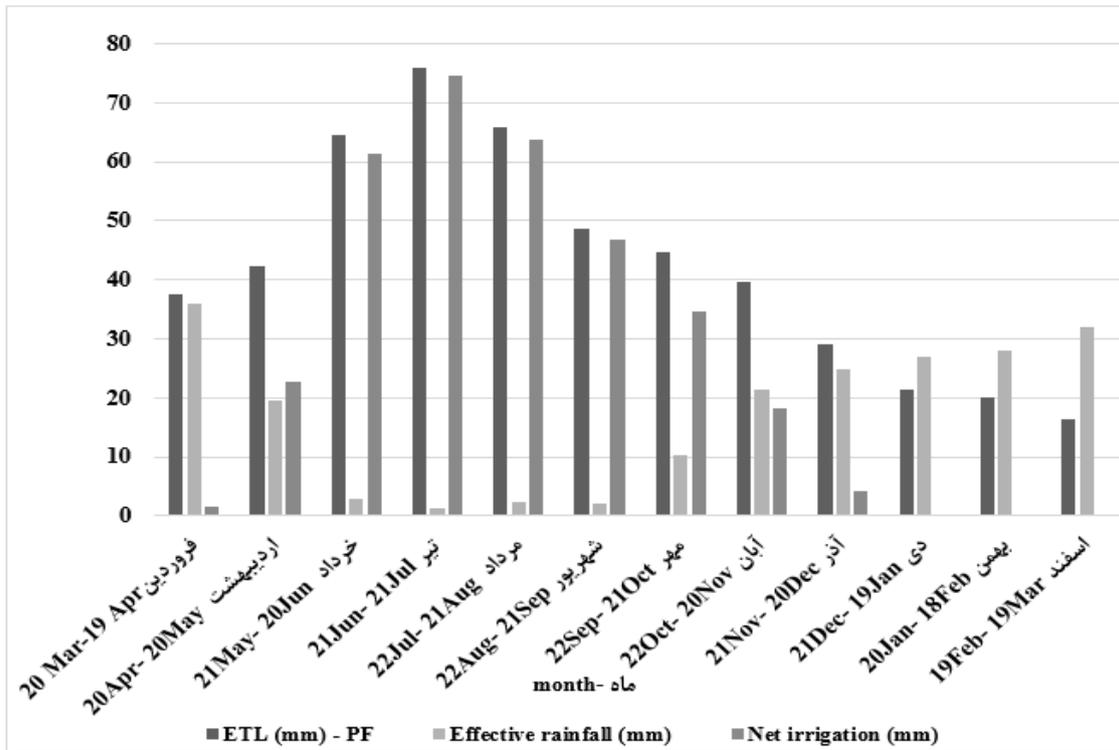


شکل ۴- نمودار نیاز آبی خالص با استفاده از روش wucols
Figure 4- Net irrigation rate using wucols method

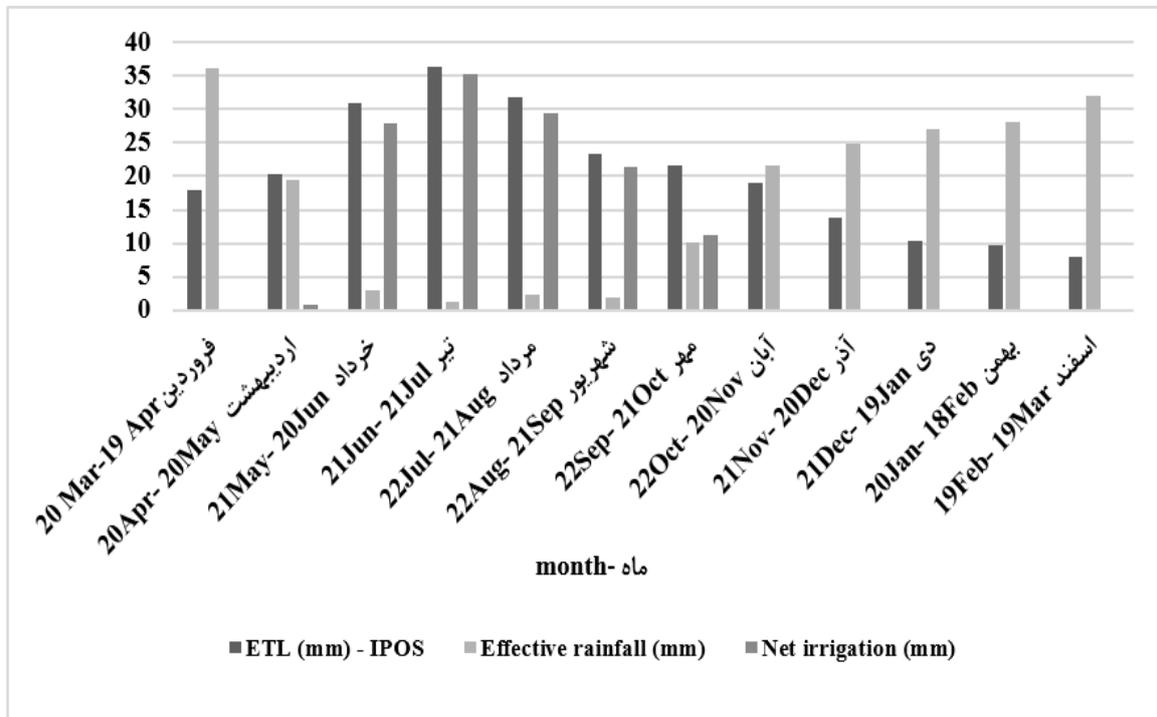
جدول ۴- نیاز آبی ناخالص برای هر فصل

Table 4- Gross irrigation requirements for each season

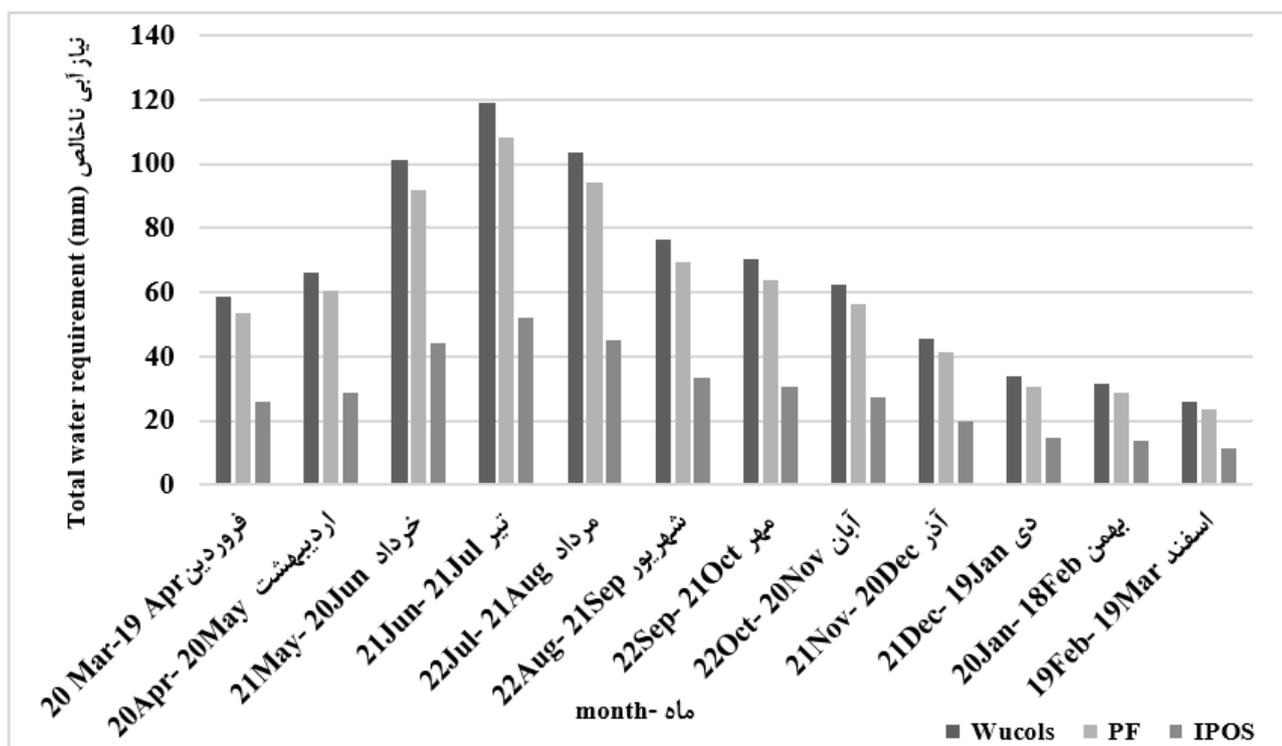
Method (روش)	Spring (بهار)	Summer (تابستان)	Autumn (پاییز)	Winter (زمستان)
Wucols	226.5 mm	299.2 mm	178 mm	91 mm
PF	205.92 mm	272 mm	161.9 mm	82.9 mm
Ipos	98.82 mm	130.67 mm	77.65 mm	39.75 mm



شکل ۵- نمودار نیاز آبی خالص با استفاده از روش PF
Figure 5- Net irrigation rate using PF method



شکل ۶- نمودار نیاز آبی خالص با استفاده از روش Ipos
Figure 6- Net irrigation rate using IPOS method



شکل ۷- مقایسه نیاز آبی ناخالص برآورد شده با روش‌های Wucols، PF، Ipos
 Figure 7- Comparison of gross irrigation needs with methods wucols, Pf and Ipos

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه منابع آب ایران محدود می‌باشد و نیاز به مصرف بیشتر آب در اثر افزایش جمعیت، ایجاب می‌کند تا استفاده از این منبع ارزشمند در تمام زمینه‌های مصرف به صورت بهینه انجام گیرد و از آنجایی که در فضاهای سبز شهری تنها شادابی، سلامت و حفظ ظاهر گیاهان دارای اهمیت می‌باشد و به‌علاوه گیاهان فضای سبز جنبه‌ی تزئینی و زیبایی دارند و عملکرد آن‌ها مطرح نیست، در نتیجه می‌توان با استفاده از روش Wucols نیاز آبی گیاهان را به صورتی که سلامت و ظاهر آن‌ها حفظ گردد تخمین زد، در این صورت علاوه بر تأمین نیاز آبی در سطح مناسب و حفظ سلامت و شادابی فضای سبز در مصرف آب نیز صرفه‌جویی به عمل آمده است. در این تحقیق نیاز آبی در فضای سبز با استفاده از سه روش Wucols، Pf و Ipos برآورد گردید. نتایج نشان داد روش Wucols بهترین و نزدیک‌ترین برآورد را با توجه به میزان آبیاری منطقه مورد مطالعه دارد. میزان نیاز ناخالص آبیاری محاسبه شده توسط روش Wucols در طول یک سال ۷۹۴/۸

منابع

میلی‌متر می‌باشد که ۱۲ درصد کمتر از نیاز ناخالص آبیاری سالانه فضای سبز مورد مطالعه است. در حالی که روش‌های Pf و Ipos میزان نیاز ناخالص را به ترتیب ۲۰ و ۶۲ درصد کمتر از میزان نیاز ناخالص آبیاری سالانه منطقه تعیین نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که آبیاری ناخالص برآورد شده توسط روش Ipos بسیار پایین است که ممکن است به برخی گیاهان آسیب برساند. روش Ipos بر اساس نیاز آبی چمن است و ناهمگنی پوشش گیاهی مخلوط و نیازهای آبی مختلف آن‌ها را پوشش نمی‌دهد. این روش می‌تواند برای مناطقی که تنها چمن کشت شده باشد مانند زمین‌های گلف و زمین‌های چمن ورزشی مناسب باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش Wucols برای تخمین نیاز آبی گیاهان در فضای سبز شهری که ترکیبی از گونه‌های گیاهی مختلف وجود دارد با توجه به تنوع گونه‌ها، تراکم پوشش گیاهی و اقلیم‌های متفاوت، نسبت به روش‌های Pf و Ipos قابل اطمینان‌تر است.

1. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop

- Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage (No-56). *Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome*.
2. Allen R.G., Howell T.A., and Snyder R.L. 2011. In: Irrigation Water Requirements, Irrigation, sixth ed. Irrigation Association, Falls Church, VA, 93–172.
 3. Costello L.R., and Jones K.S. 1994. WUCOLS project—water use classification of landscape species: a guide to the water needs of landscape plants. *University of California, Cooperative Extension*.
 4. Costello L.R., Matheny N.P., Clark J.R., and Jones K.S. 2000. A Guide to Estimating Irrigation Water Needs of Landscape Plantings in California. The Landscape Coefficient Method and WUCOLS III. University of California Cooperative Extension. *California Department of Water Resource*.
 5. Doorenbos J., Pruitt W.O., and Aboukhaled A. 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements (rev. ed.). *Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome*.
 6. Erell E., Williamson T. 2007. Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal Climatology* 27: 1243–1255. <https://doi.org/10.1002/joc.1469>.
 7. Edussuriya P.S. 2000. Impact of urban physical design attributes on urban air quality and microclimate: towards formulation of urban design guidelines for Mong Kok, HKU Theses Online, The University of Hong Kong (pokfulam, Hong Kong), Faculty of architecture.
 8. Edem E., Anthony A., and Greening U. 2014. The impact of greenery on the urban microclimate and environmental quality of Uyo metropolis, Akwa Ibom state, Nigeria 3: 22–27.
 9. Glenn, E.P., Mexicano, L., Garcia-Hernandez, J., Nagler, P.L., Gomez-Sapiens M.M., Tang D., Lomeli M.A., Ramirez-Hernandez J., and Zamora-Arroyo F. 2013. Evapotranspiration and water balance of an anthropogenic coastal desert wetland: Responses to fire, inflows and salinities. *Ecological Engineering* 59: 176-184. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.06.043>.
 10. Hama T., Nakamura K., Kawashima S., Kaneki R., and Mitsuno T. 2011. Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field. *Ecological Engineering* 37: 1563-1566. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.03.032>.
 11. Hilaire R.S., Arnold M.A., Wilkerson D.C., Devitt D.A., Hurd B.H., Lesikar B.J., Lohr V.I., Martin C.A., and McDonald G.V. 2008. Efficient water use in residential urban landscapes. *Horticulture Science* 43: 2081–2092. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.2081>.
 12. Kottmeier C., Biegert C., and Corsmeier U. 2007. Effects of urban land use on surface temperature in Berlin: case study. *Journal Urban Plan* 133: 128–137.
 13. Kjelgren R., Rupp L., and Kilgren D. 2000. In: *Water Conservation in Urban Landscapes* 3: 1037–1040.
 14. Litvak E., Pataki D.E. 2016. Evapotranspiration of urban lawns in a semi-arid environment: An in situ evaluation of microclimatic conditions and watering recommendations. *Journal of Arid Environments* 134: 87-96.
 15. Marasco D.E., Culligan P.J., and McGillis W.R. 2015. Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. *Ecological Engineering* 84: 451–462.
 16. Montague T., McKenney C., and Maurer M. 2007. Influence of irrigation volume and mulch on establishment of selected shrub species. *Arboriculture Urban Forest* 33: 202–209.
 17. Nouri H., Beecham S., Hassanli A.M., and Kazemi F. 2013. Water requirements of urban landscape plants: A comparison of three factor-based approaches. *Ecological Engineering* 57: 276-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.025>.
 18. Nouri H., Glenn E.P., Beecham S., Chavoshi Boroujeni S., Sutton P., Alaghmand S., Noori B., and Nagler P. 2016. Comparing three approaches of evapotranspiration estimation in mixed urban vegetation: Field-based, remote sensing-based and observational-based methods. *Remote Sensing* 8: 492. <https://doi.org/10.3390/rs8060492>.
 19. Ozdogan M., Rodell M., Beaudoin H.K., and Toll D.L. 2010. Simulating the effects of irrigation over the United States in a land surface model based on satellite-derived agricultural data. *Hydrometeorol* 11: 171–184.
 20. Petralli M., Massetti L., Brandani G., and Orlandini S. 2014. Urban planning indicators: useful tools to measure the effect of urbanization and vegetation on summer air temperatures. *International Journal of Climatology* 34: 1236-1244. <https://doi.org/10.1002/joc.3760>.
 21. Pearlmutter D., Berliner P., and Shaviv E. 2007. Urban climatology in arid regions: current research in the Negev desert. *Int. Climatology* 27: 1875–1886.
 22. Pittenger D.R., Shaw D.A., Hodel D.R., and Holt D.B. 2001. Responses of landscape groundcovers to minimum irrigation. *Environment Horticulture* 19 : 78–84.
 23. Pittenger D., Henry M., and Shaw D. 2008. Water needs of landscape plants. In: *UCR Turfgrass and Landscape Research Field Day. University of California, Riverside*.
 24. Rosenfeld D. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science* 287 : 1793–1796.
 25. Robitu M., Musy M., Inard C., and Groleau D. 2006. Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy* 80 : 435–447.
 26. Saeedinia M., Tarnian F., Hosseinian S.H., and Nasrollahi A.H. 2018. Estimation of the evapotranspiration and crop coefficient of Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) and Cumin (*Cuminum cyminum* L.) in Khorram Abad

- region. *Water and Irrigation Management* 8(1) : 165-175. (In Persian with English abstract)
27. Shojaei P., Gheysari M., Nouri H., Myers B., and Esmaeili H. 2018. Water requirements of urban landscape plants in an arid environment: The example of a botanic garden and a forest park. *Ecological Engineering* 123: 43-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.021>.
 28. Shaw D.A., Pittenger D.R. 2004. Performance of landscape ornamentals given irrigation treatments. Based on reference evapotranspiration. *Acta Horticulture* 664: 607–614.
 29. Sojoodi Z., and Mirzaei F. 2020. Determination of water requirement of urban Landscape plants. *Water and Irrigation Management* 10(1) : 131-141. (In Persian with English abstract). [10.22059/JWIM.2020.295397.745](https://doi.org/10.22059/JWIM.2020.295397.745).
 30. Sojoodi Z., and Mirzaei F. 2020. Evaluation of the WUCOLS Method for Estimating Water Requirements of Landscape Plants. *Water Research in Agriculture* 33(4) : 629-643. (In Persian with English abstract). [10.22092/JWRA.2020.121243](https://doi.org/10.22092/JWRA.2020.121243).
 31. Sojoodi Z., and Mirzaei F. 2020. Estimation of Water Requirement and Plant Coefficient of *Calendula Officinalis* in Landscape. *Water Management in Agriculture* 7(1): 1-10. (In Persian with English abstract). [20.1001.1.24764531.1399.7.1.1.8](https://doi.org/10.1001.1.24764531.1399.7.1.1.8).
 32. Snyder R.L., and Eching S.O. 2005. Microclimate corrections for urban landscape evapotranspiration. In *Impacts of Global Climate Change* 1-9.
 33. Snyder R.L. 2010. Landscape Irrigation Scheduling Trends in California – From WUCOLS to LIMP. 5–8.
 34. Salvador R., Bautista-Capetillo C., and Playan E. 2011. Irrigation performance in private urban landscapes: A study case in Zaragoza (Spain). *Landscape Urban Plan* 100: 302–311.
 35. South Australian Water Corporation-IPOS Consulting. 2008. Irrigated public open space: code of practice. In: S. Water (Ed.). IPOS Consulting, South Australia, 46.
 36. Wolf D., and Lundholm J.T. 2008. Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering* 33: 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.008>.



Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen)

M. Fouladi Nasrabad¹- M. Amirabadizadeh^{2*}- M. Pourreza Bilondi³- M. Yaghoobzadeh⁴

Received: 01-01-2022

Revised: 05-01-2022

Accepted: 31-01-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Fooladi M., Amirabadizadeh M., Pourreza Bilondi M., and Yaghoobzadeh M. 2022. Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen). Journal of Water and Soil 36(1): 17-30. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.74115.1122](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74115.1122)

Introduction

The watershed acts as a hydrological unit regulating the quantity and quality of the water cycle, and human beings have incurred high costs due to ignorance of this complex cycle and lack of planning of projects in terms of the relationship between water management and community development.

Knowledge of features such as maximum flood discharge is essential for the design of hydraulic structures, such as dams, spillways, bridges, and culverts, in order to reduce potential damages and predict when peak discharges will be reached in the downstream areas when discussing flood warning. Rainfall-runoff modeling is one of the key tools in hydrology to achieve flood characteristics, such as peak rate and peak time. In current research, the performance of IHACRES model using "Hydromad" R package has been implemented to simulate flow in the Shoor river basin in Ghaen on a monthly scale. The model simulation was done to investigate the effect of selecting "ARMAX" and "EXPUH" methods in the linear part of the target function. Also, the modeling process and the optimized values of the model parameters were investigated.

Materials and Methods

The Shoor river basin with an area of 2412.92 square kilometers located in Ghaen between 59 degrees and 12 minutes to 59 degrees and 14 minutes east longitude and 33 degrees and 42 minutes to 33 degrees and 45 minutes north latitude. The study catchment with an average altitude of 1420 m above sea level and an average long-term annual rainfall of 173 mm has a dry climate. This river is the largest river in Ghaenat city which flows into Khaf Salt field. In this research, the IHACRES model was implemented using the Hydromad R package. To perform the flow simulation, precipitation, flow rate and temperature data on a monthly scale during the years 1998 to 2017 were used. The IHACRES model has two parts: the first part, which converts precipitation into effective precipitation at each time stage and the second part, which converts effective precipitation into modeled flow. These sections are called nonlinear and linear modules, respectively. To implement each of the sections of nonlinear modules and linear modules according to the data and conditions in the study area, methods with different parameters can be used. In this research, in the non-linear module section, the "CWT" method and in the linear module section, "ARMAX" and "EXPUH" methods have been used for proper routing in the "reverse" calibration section. In the validation section of the "ls" method, the performance criteria of KGE, NS and R² were used to evaluate the performance of the model in both calibration and validation process.

Result and Discussion

Comparison of obtained results in this study with previous studies showed that in terms of examining the

1- M.Sc of Water Resources, Department of Water Engineering and Science, University of Birjand, Birjand, Iran

2, 3 and 4- Assistant Professor and Associate Professors, Department of Water Engineering and Science, University of Birjand, Birjand, Iran and Member of Drought and Climate Change Research Group, respectively.

(*- Corresponding Author Email : mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

performance of the model with the EXPUH linear method, the obtained results were consistent with the results of Sadeghi et al. (2015) and Lotfi Rad et al. (2015) and the model with the EXPUH linear method. The NS criteria has shown acceptable performance. According to the results of the model in the calibration section, in terms of evaluation criteria NS, KGE and R^2 , and in terms of simulation of peak flow values and the time to peak using EXPUH method in the linear part showed better performance than ARMAX method. The value of these criteria in EXPUH method is equal to 0.86, 0.93, and 0.86, and in ARMAX method are equal to 0.7, 0.85 and 0.73, respectively. In the validation section, the evaluation criteria in EXPUH method were equal to 0.51, 0.63, and 0.54 and in ARMAX method were equal to 0.55, 0.73 and 0.65, respectively, indicating better performance of the model by ARMAX method. Comparison of the EXPUH method, and also the model with ARMAX method showed more accurate performance in terms of peak discharges, quantity and time of occurrence. The values of NS, KGE and R^2 evaluation criteria in this section were 0.51, 0.63, and 0.54 using EXPUH method and 0.55, 0.73 and 0.65 with ARMAX method, respectively.

Conclusion

According to the results, the IHACRES model using ARMAX method in the linear section resulted in more accurate performance than EXPUH method in simulation of peak flow values and time to peak.

Keywords: Calibration, IHACRES Model, Rainfall-Runoff Simulation, Shoor Ghaen River

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۱۷-۳۰

ارزیابی عملکرد مدل IHACRES با روش‌های خطی ARMAX و EXPUH

(مطالعه موردی: حوضه رودخانه شور در قائن)

محمد فولادی نصرآباد^۱ - مهدی امیرآبادی زاده^{۲*} - محسن پوررضا بیلندی^۳ - مصطفی یعقوب زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱

چکیده

مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از ابزارهای کلیدی در هیدرولوژی برای دستیابی به خصوصیات سیلاب، مانند میزان دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج است. در این تحقیق مدل IHACRES در قالب بسته نرم‌افزاری hydrograd در بستر R، برای شبیه‌سازی جریان حوضه رودخانه شور قائن مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد آن در شبیه‌سازی رواناب با روش‌های ARMAX و EXPUH در بخش خطی مدل، بررسی شد. برای انجام شبیه‌سازی با مدل مذکور، از داده‌های بارش، دبی جریان و دما در مقیاس ماهانه طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۸ استفاده شد. پارامترهای مدل IHACRES با استفاده از تابع هدف KGE، واسنجی شدند. در گام‌های واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج، از معیارهای ارزیابی NS، KGE و R² استفاده گردید. مقدار این معیارها در روش EXPUH به ترتیب برابر ۰/۸۶، ۰/۹۳، ۰/۸۶ و در روش ARMAX برابر ۰/۷، ۰/۸۵، ۰/۷۳ و محاسبه شد که نشان دهنده عملکرد بهتر روش EXPUH نسبت به روش ARMAX می‌باشد. درگام مربوط به صحت‌سنجی نیز، معیارهای ارزیابی در روش‌های EXPUH و ARMAX به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و ۰/۵۵، ۰/۷۳، ۰/۶۵ برآورد شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل با روش ARMAX نسبت به روش EXPUH است و همچنین مدل با روش ARMAX در شناسایی دبی‌های اوج از نظر مقدار و از نظر زمان وقوع عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داد. در مجموع نتایج تحقیق، نشان‌دهنده این مطلب است که مدل IHACRES منطقه مورد مطالعه، با استفاده از روش ARMAX نسبت به روش EXPUH عملکرد دقیق‌تری داشته است.

واژه‌های کلیدی: رودخانه شور قائن، شبیه‌سازی بارش-رواناب، مدل IHACRES، واسنجی

مقدمه

حیات بشر بر روی کره زمین موجب بروز تحولات عظیمی بر سطح زمین شده که از جمله این تحولات می‌توان به تخریب جنگل‌ها و مراتع در سطح وسیع اشاره کرد. این عوامل نقش مهمی را در سیل‌خیزی منطقه ایجاد می‌کند (Baddoo et al., 2020). حوضه آبخیز به‌عنوان واحد هیدرولوژیکی تنظیم‌کننده کمیت و

کیفیت چرخه‌ی آب عمل می‌کند و انسان به دلیل ناآگاهی از این چرخه‌ی پیچیده و نیز نداشتن برنامه‌ریزی در طرح‌ها به لحاظ ارتباط بین مدیریت آب و تحولات جوامع، متحمل هزینه‌های فراوانی شده است.

اطلاع از خصوصیات مانند حداکثر دبی سیل برای طراحی سازه‌های آبی، از قبیل سدها، سرریزها، پل‌ها و زیرگذرها در جهت کاهش خسارات احتمالی و پیش‌بینی زمان رسیدن به دبی اوج در بازه‌های پایین‌دست در بحث هشدار سیل ضروری است. کارشناسان و متخصصان منابع آب همواره در پی آن بوده‌اند که بتوانند معادله بین مقادیر بارندگی و رواناب را در حوضه‌های آبخیز و در شرایط مختلف زمانی و مکانی بیابند. تا امروز مدل‌های بارش - رواناب فراوانی با قابلیت و پیچیدگی‌های متفاوتی جهت پیش‌بینی سیلاب ساخته و به‌کاربرده شده‌اند (Dooge, 1973).

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند
۲، ۳ و ۴- به ترتیب استادیار و دانشیاران، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران و عضو هیئت علمی گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم
(*) نویسنده مسئول: Email: mampirabadizadeh@birjand.ac.ir
DOI: 10.22067/jsw.2022.74115.1122

تحقیقی ضمن بررسی اثر تغییر اقلیم بر رودخانه تراز-هرکش استان خوزستان با استفاده از مجموعه داده^۸ NEX-GDDP، کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی دبی رودخانه مذکور را نیز بررسی کردند و معیار ارزیابی R^2 در دوره واسنجی برابر ۰/۶ و در دوره صحت‌سنجی برابر ۰/۵۱ محاسبه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل IHACRES توانایی مناسبی در شبیه‌سازی دبی رودخانه مذکور دارد. حافظ پرست و مرابی (Hafezparast and Marabi, 2021) در تحقیقی به مقایسه مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و IHACRES در پیش‌بینی تخلیه رودخانه خرم رود به دلیل تغییرات آب و هوایی پرداختند. در این تحقیق مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از کتابخانه Scikit-Learn در محیط نرم‌افزار پایتون^۹ و مدل IHACRES در محیط نرم‌افزار IHACRES اجرا شد. معیارهای ارزیابی NS، MAE، RMSE، R^2 در مدل IHACRES در دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۱ و ۱/۲۹، ۲/۰۸، ۰/۹ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۱/۳۹، ۲/۲۴، ۰/۸۴ و در مدل شبکه عصبی مصنوعی در دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۶ و ۱/۴۶، ۲/۳۳، ۰/۸۲ و در دوره صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۵۱ و ۲/۱۸، ۳/۰۱، ۰/۶۴ محاسبه شد. بنابراین نتایج این تحقیق نشان‌دهنده برتری مدل IHACRES نسبت به مدل شبکه عصبی مصنوعی است.

صراف و قاسمی (Sarraf et al., 2021) در تحقیقی ضمن بررسی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی و عملیات جست‌وجو و نجات، نشان دادند که مدل IHACRES در حوضه رودخانه اعظم هرات واقع در استان یزد عملکرد خوب و قابل قبولی داشته است. در این تحقیق از معیارهای ارزیابی نش - ساتکلیف استفاده شده است و مقدار این معیار برای الگوریتم‌های عنکبوت اجتماعی و عملیات جست‌وجو و نجات به ترتیب برابر ۰/۸۱ و ۰/۶۹ محاسبه شد.

لطفی راد و همکاران (Lotfirad et al., 2018)، در سال ۱۳۹۷ در پژوهشی تحت عنوان تخمین رواناب روزانه به کمک مدل نیمه‌مفهومی IHACRES در حوضه آبریز ناورود گیلان به بررسی پرداختند. در این پژوهش بارش رواناب حوضه ناورود گیلان به کمک مدل IHACRES با استفاده از داده‌های دبی روزانه ایستگاه خرجگیل در خروجی حوضه و نیز داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه خلیان در مرکز ثقل حوضه طی دوره ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ به‌عنوان دوره کالیبراسیون و دوره ۱۳۸۷ تا ۱۳۸۹ نیز به‌عنوان دوره صحت‌سنجی شبیه‌سازی شد. نتایج آن‌ها بر اساس ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف (E) و میانگین خطای کل (BIAS) و میانگین خطای نسبی

مدل‌های بارش-رواناب قابلیت درون‌یابی و برون‌یابی جریان را متناسب با داده‌های ورودی به مدل دارند. مدل IHACRES^۱ دارای ساختار یکپارچه مفهومی متریک در شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که توسط جیکمن^۲ در سال ۱۹۹۰ توسعه یافته است. نتایج تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که این مدل در شناسایی هیدروگراف‌های واحد و مؤلفه‌های جریان حاصل از داده‌های بارش، تبخیر-تعرق و جریان رود، به دلیل دشواری در به دست آوردن داده‌های جامع موردنیاز مدل‌های فیزیکی، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و با داده کم، یک مدل کارآمد و درعین حال اساسی برای شبیه‌سازی فرایندهای بارندگی-رواناب است (Ayele et al., 2017).

ابوشاندی و مرکل (Abushandi and Merkel, 2013) باهدف توسعه چارچوبی برای به‌کارگیری مدل بارش - رواناب در حوضه‌های خشک به دنبال تکمیل داده‌های ماهواره‌ای اصلاح شده بارش برای تعیین محل رگبار بودند. آنها یک رویداد بارش در حوضه‌ی خشک وادی دولیل اردن که اطلاعات آن به‌صورت ساعتی موجود بود را در IHACRES و HEC-HMS مدل‌سازی کردند. مدل IHACRES عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی داده‌های ساعتی نسبت به مدل HEC-HMS نشان داد، به طوری که ضریب کارایی مدل (نش - ساتکلیف) آنها به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۸۸ به دست آمد.

احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2019) از سه مدل ANN^۳، SWAT^۴ و IHACRES برای شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ای در منطقه کن به‌صورت روزانه، ماهانه و سالانه استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان داد کارایی مدل‌های یادشده با در نظر گرفتن کمترین خطا، مدل ANN بهتر از دو مدل دیگر (معیار NS^۵ برابر ۰/۸۶، معیار R^2 برابر ۰/۸۷، معیار RMSE^۶ برابر ۲/۲ و معیار MBE^۷ برابر ۰/۰۸ محاسبه شد) و همچنین، مدل SWAT (معیار NS برابر ۰/۶۵، معیار R^2 برابر ۰/۶۸، معیار RMSE برابر ۳/۳ و معیار MBE برابر ۰/۱۶۸ - محاسبه شد) نیز بهتر از مدل IHACRES (معیار NS برابر ۰/۵۷، معیار R^2 برابر ۰/۵۸، معیار RMSE برابر ۳/۷ و معیار MBE برابر ۰/۰۴۹ محاسبه شد) است و با اینکه مدل IHACRES نسبت به دو مدل دیگر خطای بیشتری دارد، ولی بازهم قابل قبول است.

زید علی نژاد و همکاران (Zeid Ali Nejad et al., 2021) در

1- Identification of unit Hydrograph And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data

2- Jakeman

3- Artificial Neural Networks

4- Soil and Water Assessment Tool

5- Nash-Sutcliffe

6- Root-Mean-Square Error

7- Mean Bias Error

8- NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled

9- Python

برای اجرای مدل IHACRES از داده‌های بارش برحسب میلی‌متر، داده‌های دبی برحسب مترمکعب بر ثانیه و داده‌های دما برحسب درجه سانتی‌گراد، در مقیاس ماهانه استفاده گردید. داده‌های موردنظر از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان جنوبی تهیه گردید. نمودار داده‌های بارش، دبی و دما استفاده‌شده در این تحقیق در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده‌شده است. لازم به توضیح است که داده‌های بارش و دمای استفاده‌شده در این تحقیق در ایستگاه سینوپتیک قائن و ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا ثبت شده است. مشخصات ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا و ایستگاه سینوپتیک قائن در جدول ۱ نشان داده شده است.

ساختار مدل

در این تحقیق مدل IHACRES در نرم‌افزار R و با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد"^۲ اجرا شد. مدل IHACRES دارای دو بخش است: یک بخش که بارش را در هر گام زمانی به بارش مؤثر تبدیل می‌کند و بخش دیگر که بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده تبدیل می‌کند. این بخش‌ها به ترتیب ماژول غیرخطی و ماژول خطی نامیده می‌شوند (Dooge, 1973; Box, 1970).

برای اجرای هر یک از بخش‌های ماژول غیرخطی و ماژول خطی، با توجه به داده‌ها و شرایط موجود در منطقه مورد مطالعه می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد. در این تحقیق برای اجرای مدل، در بخش ماژول غیرخطی از روش "CWI"^۳ و در بخش ماژول خطی از روش "ARMAX"^۴ و "EXPUGH"^۵، برای مسیریابی مناسب در بخش واسنجی از روش "Inverse" و در بخش صحت‌سنجی از روش "Is"^۶ استفاده شد.

تبدیل بارش به بارش مؤثر (بخش غیرخطی)

همان‌طور که گفته شد برای اجرای مدل در بخش غیرخطی از روش (CWI) استفاده شد. در این روش برای محاسبه بارش مؤثر از روابط ۱، ۲ و ۳ استفاده می‌شود:

$$\tau_k = \tau_w^{0.062f(T_r - T_k)} \quad (1)$$

که در آن τ_k ، شدت خشکی خاک است که به‌عنوان تابعی از دماست، τ_w ، مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود، f تابع تعدیل دما (تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات)، T_r دمای مرجع و T_k دما در هر گام زمانی هستند.

پارامتریک (ARPE) ارائه شد که مقدار به‌دست‌آمده در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۶ به دست آمد که با توجه به نتایج پژوهش‌های پیشین قابل‌قبول است.

به‌طور کلی مطالعات انجام‌شده با مدل IHACRES نشان داده است که این مدل در مناطق مرطوب عملکردی قابل‌قبول و در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکردی خوب از خود نشان می‌دهد. همچنین این مدل در مقیاس روزانه و ماهانه عملکرد بهتری نسبت به مقیاس ساعتی دارد و در تحقیقات قبلی از تابع هدف نش-ساتکلیف استفاده‌شده و عملکرد مدل با سایر توابع هدف موردبررسی قرار نگرفته است. به همین منظور، از آنجایی که در نرم‌افزار IHACRES در بخش‌های خطی و غیرخطی و توابع هدف مورداستفاده محدودیت وجود دارد، از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد"^۱ استفاده شد. در این بسته نرم‌افزاری در بخش‌های خطی و غیرخطی مدل، روش‌های متعددی گنجانده شده و امکان استفاده از توابع هدف مختلف علاوه بر توابع هدف موجود در بسته وجود دارد.

با توجه به موارد بیان‌شده، در این تحقیق، با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد" و کد نویسی در محیط R، عملکرد مدل IHACRES، برای شبیه‌سازی جریان در منطقه رودخانه شور قائن در مقیاس ماهانه، مورد ارزیابی قرار گرفت و تأثیر انتخاب روش‌های "ARMAX" و "EXPUGH" در بخش خطی و نیز تأثیر انتخاب تابع هدف KGE بر روند مدل‌سازی و مقادیر پارامترهای مدل، موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

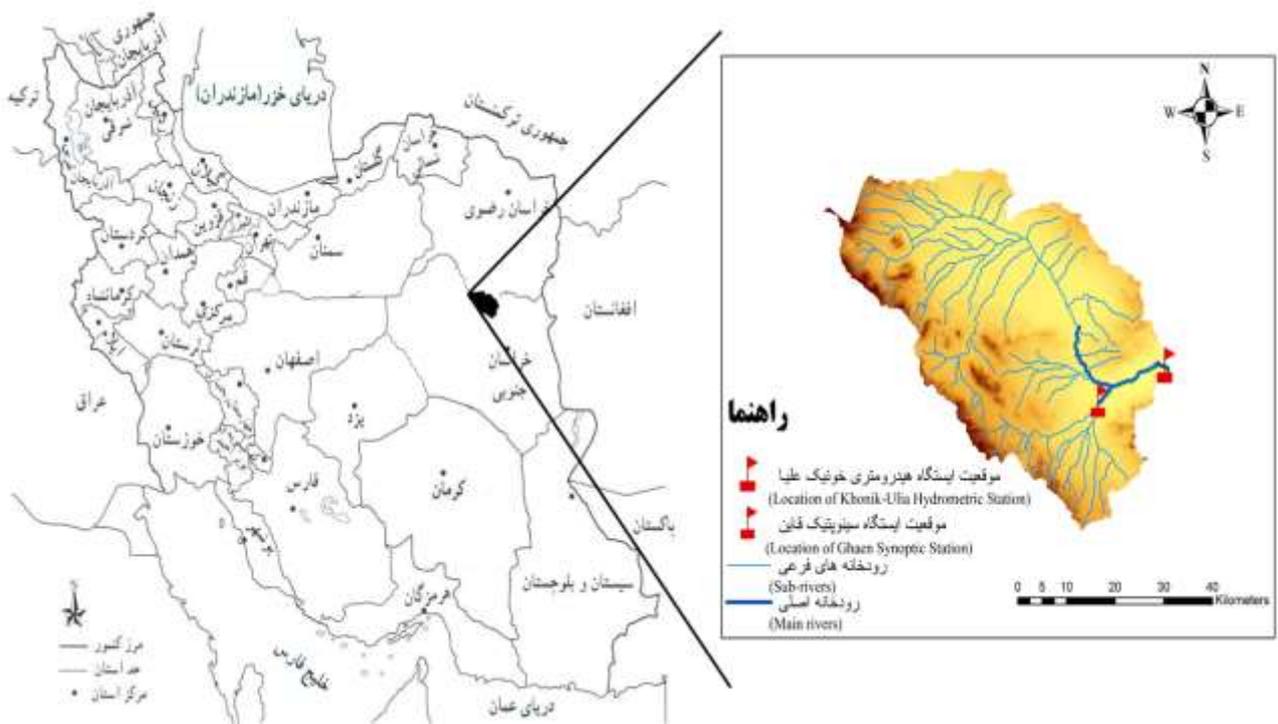
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه مورد مطالعه (رودخانه شور) شامل شهرستان قائنات با وسعت ۲۴۱۲/۹۲ کیلومتر مربع بین ۵۹ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۴ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه ۴۲ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی می‌باشد. شکل ۱ محدوده حوضه آبریز رودخانه شور قائن را نشان می‌دهد.

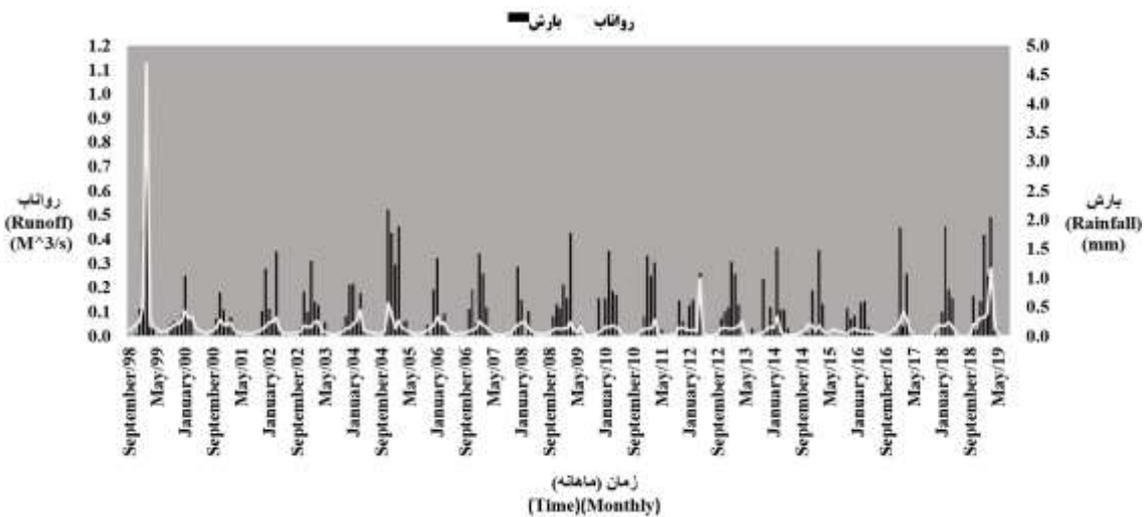
حوضه آبریز مورد مطالعه با متوسط ارتفاع ۱۴۲۰ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی درازمدت سالانه ۱۷۳ میلی‌متر دارای اقلیمی خشک می‌باشد (Akbari Motlagh et al., 2016). رودخانه شور قائن بزرگ‌ترین رود شهرستان قائنات است که به نمکزار خواف می‌ریزد. طول آن ۱۰۰ کیلومتر، ارتفاع سرچشمه آن ۱۴۲۰ متر، ارتفاع ریزشگاه ۶۰۰ متر و مسیر کلی رود، به سمت شمال شرقی می‌باشد. این رودخانه از به هم پیوستن رودهای کوه باز و شاخن در ۲۰۰ کیلومتری جنوب شرقی قائن تشکیل گردیده است.

2- Hydromad
3- Catchment Wetness Index
4- Auto-Regressive and Moving Average coefficients
5- Exponential unit hydrograph
6- Least Squares

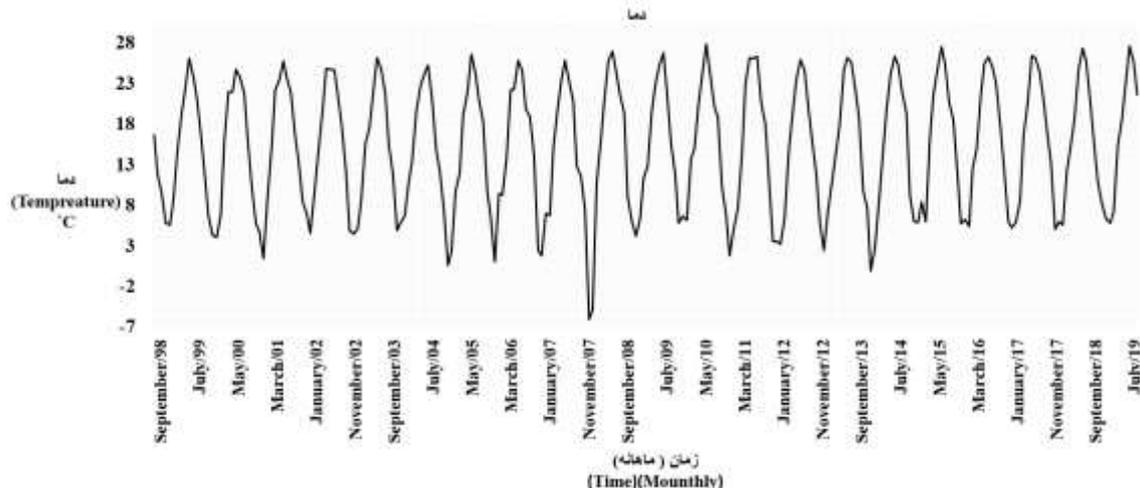
1- Hydromad



شکل ۱- حوزه آبریز رودخانه شور در قائن
Figure 1- The catchment of Shoor river in Ghaen



شکل ۲- مقادیر متوسط بارش ماهانه (میلی متر) و دبی رواناب ماهانه (متر مکعب بر ثانیه) مشاهداتی
Figure 2- The observed mean values of monthly rainfall (mm) and runoff flow (cubic meters per second)



شکل ۳- مقادیر متوسط دمای ماهانه مشاهداتی (درجه سانتی‌گراد)

Figure 3- The observed values of mean monthly temperature (degrees Celsius)

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا و ایستگاه سینوپتیک قائن

Table 1- Characteristics of Khonik-Ulia hydrometric and Ghaen synoptic stations

	عرض جغرافیایی (Latitude)	طول جغرافیایی (Longitude)	Utmy (m)	Utmx (m)	ارتفاع (متر) (Altitude (meters))
ایستگاه هیدرومتری خونیک‌علیا (Khonik-Ulia Hydrometric Station)	33°-47'-19"	59°-20'-41"	3740942	716668	1330
ایستگاه سینوپتیک قائن (Ghaen Synoptic Station)	33°-43'-00"	59°-11'-00"	3734721	702935	1446

تبدیل بارش مؤثر به رواناب (بخش خطی)

روش ARMAX

این روش می‌تواند به‌عنوان یک تابع انتقال برای محاسبه هیدروگراف واحد کلی جریان مورداستفاده قرار گیرد که در قالب مدل اتورگرسیو^۱ و میانگین متحرک^۲ تعریف شده است. در این روش برای محاسبه جریان رواناب در هر گام زمانی از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$X_t = a_1 X_{(t-1)} + b_0 U_{(t-1)} \quad (4)$$

که در آن a_1 ضریب مربوط به اتورگرسیو و b_0 ضریب مربوط به میانگین متحرک است (Jakeman et al., 1990).

از آنجایی که در این بخش برای مسیریابی بهتر از روش "Inverse" استفاده شده، مقادیر ضرایب a_1 و b_0 به ترتیب، ۰/۰۷۰۲۷ و ۰/۹۲۹۷۳ به صورت خودکار توسط مدل محاسبه شد.

روش EXPUH

در این روش، مقدار رواناب از اجتماع جریان آهسته و جریان

پس از محاسبه τ_k ، مقدار شاخص رطوبت حوضه یا ϕ_k از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$\phi_k = r_k + \left[1 - \frac{1}{\tau_k}\right] \phi_{k-1} \quad (2)$$

که در این رابطه r_k بارش مشاهداتی و τ_k شدت خشکی مینا است. پس از محاسبه مقدار شاخص رطوبت حوضه مقدار بارش مؤثر در هر گام زمانی از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$U_k = r_k * c * \phi_k \quad (3)$$

که در این رابطه U_k بارش مؤثر، r_k بارش مشاهداتی، c ضریب تعادل حجم بارش و ϕ_k شاخص رطوبت حوضه است. لازم به ذکر است که پارامتر c در این رابطه به نحوی تعیین می‌شود که حجم بارش مؤثر و رواناب مشاهداتی در دوره واسنجی یکسان شوند (Yaghoubi and Massah Bavani, 2014).

به‌طور کلی در بخش غیرخطی سه پارامتر f ، c و τ_w که به ترتیب مدت‌زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود (برحسب روز)، فاکتور تعدیل دما (برحسب $\frac{1}{C}$) و ضریب تعادل حجم بارش (برحسب میلی‌متر) هستند که در بخش واسنجی مدل بهینه شدند و مقادیر آنها در صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت.

1- Auto-Regressive
2- Moving Average

از روش‌های موجود در پکیج "هایدرومد" روش "fitbyoptim" انتخاب و از تعداد ۵۰۰ نمونه پارامتر که با روش "latin.hypercube" تولید شدند، استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد مدل با روش‌های "ARMAX" و "EXPUH" در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی از معیارهای NS، KGE و R^2 استفاده شد.

نتایج حاصل از اجرای مدل با روش خطی ARMAX

پس از وارد کردن داده‌های ذکر شده به مدل، مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام شد. مقادیر واسنجی شده پارامترها در جدول ۲، مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش واسنجی در جدول ۴، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش صحت‌سنجی در جدول ۵ و نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است.

جدول ۲- مقادیر بهینه پارامترها با روش خطی ARMAX
Table 2- Optimal values of parameters with ARMAX linear method

پارامتر (Parameter)	c	f	tw
مقادیر محاسبه‌شده (Calculated values)	0.040	0	5.715

با توجه به جدول ۲، مقدار محاسبه‌شده پارامتر c بیانگر این است که حوضه موردبررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد که ناشی از عدم و یا کم بودن تراکم پوشش گیاهی است، چراکه کاربری جنگلی و پوشش گیاهی مناسب، باعث نگهداشت جریان می‌شود تا با تأخیر وارد جریان رودخانه شود. همان‌گونه که اشاره گردید، این پارامتر نشان‌دهنده سرعت واکنش حوضه نسبت به بارش می‌باشد به طوری که هرچه مقدار آن بیشتر باشد حوضه واکنش آهسته‌تری نسبت به بارش نشان می‌دهد. مقدار محاسبه‌شده پارامتر f، بیانگر این است که تغییرات دما هیچ تأثیری بر میزان تلفات نداشته است. چراکه این پارامتر نشان‌دهنده تأثیر تغییر یک واحد دما بر میزان تلفات است. پارامتر tw، بیان می‌دارد که چه مدت‌زمان طول می‌کشد تا حوضه خشک شود و بر اساس نتایج حاصل‌شده مدل با روش ARMAX تقریباً ۶ روز موردنیاز می‌باشد تا حوضه موردبررسی خشک شود.

سریع حاصل می‌شود که از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$X_t = (\alpha_s X_{t-1}^{(s)} + \beta_s U_t) + (\alpha_q X_{t-1}^{(q)} + \beta_q U_t) \quad (5)$$

که در این رابطه α_s و β_s پارامترهای ثابت زمانی جریان آهسته و α_q و β_q پارامترهای ثابت زمانی جریان سریع هستند. دو پارامتر در این روش وجود دارد که عبارت‌اند از τ_s که بیانگر مدت زمانی است، که طول می‌کشد جریان آهسته کاهش یابد و V_s حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد که نحوه محاسبه آن‌ها در رابطه‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است (Jakeman and Hornberger, 1993).

$$\tau_s = \frac{-1}{\log(\alpha_s)} \quad (6)$$

$$V_s = \frac{\beta_s}{1-\alpha_s} \quad (7)$$

معیارهای ارزیابی

در این تحقیق به منظور انجام عملیات واسنجی و تعیین پارامترهای بهینه از تابع هدف KGE و برای ارزیابی عملکرد مدل در دو بخش واسنجی و صحت‌سنجی از معیارهای KGE، NS و R^2 استفاده شد. رابطه‌های شماره ۸، ۹ و ۱۰ نحوه محاسبه این معیارها را نشان می‌دهد:

$$KGE = 1 - \sqrt{(cc - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (8)$$

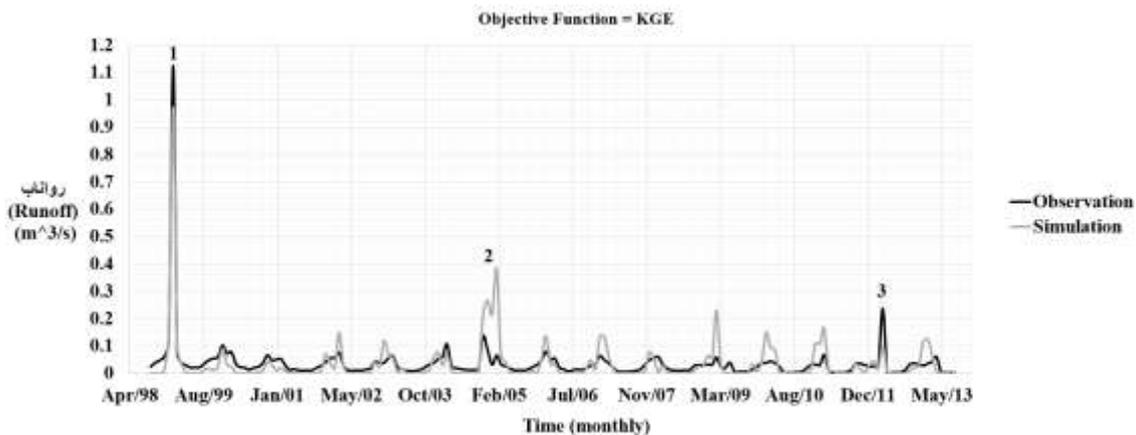
$$NS = 1 - \frac{\sum(Q_s - Q_o)^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2} \quad (9)$$

$$R^2 = \frac{[\sum(Q_s - \bar{Q}_s)(Q_o - \bar{Q}_o)]^2}{\sum(Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum(Q_s - \bar{Q}_s)^2} \quad (10)$$

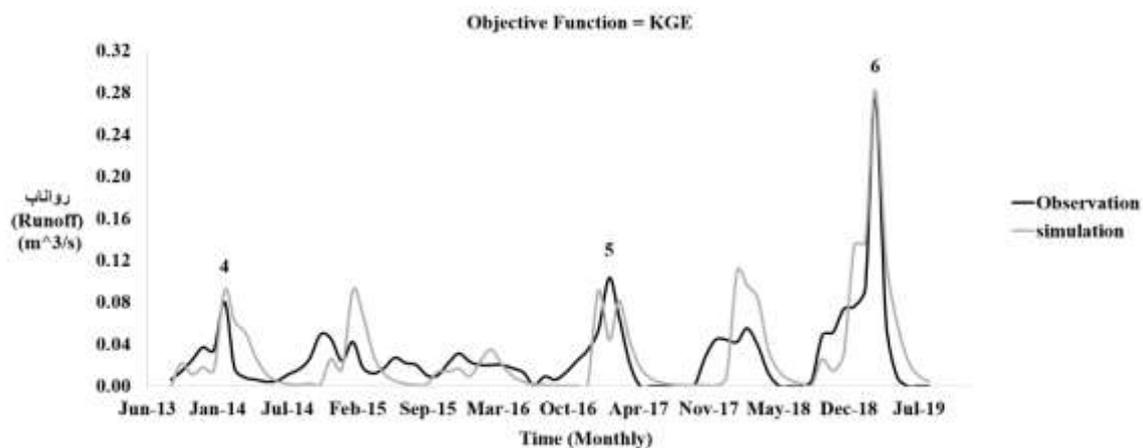
که در آن‌ها cc ضریب همبستگی خطی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، α نسبت انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده بر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و β نسبت میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده به میانگین داده‌های مشاهداتی، Q_s دبی شبیه‌سازی شده، \bar{Q}_s میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، Q_o دبی مشاهداتی و \bar{Q}_o میانگین مقادیر مشاهداتی است و هر چه مقادیر این شاخص‌ها به یک نزدیکتر باشد مطلوبتر خواهد بود.

نتایج و بحث

برای انجام شبیه‌سازی ابتدا داده‌های بارش، دبی رواناب و دما به ترتیب برحسب میلی‌متر، متر مکعب بر ثانیه و درجه سلسیوس از سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۲ در مقیاس ماهانه به منظور واسنجی و از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۸ در مقیاس ماهانه به منظور صحت‌سنجی وارد مدل شد. پس از وارد کردن داده‌های ذکر شده به مدل، برای انجام واسنجی



شکل ۴- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با روش ARMAX در بخش واسنجی
Figure 4- Observed and simulated flow by ARMAX method in calibration section



شکل ۵- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با روش ARMAX در بخش صحت سنجی
Figure 5- Observed and simulated flow by ARMAX method in the validation section

جدول ۳- مقادیر محاسبه شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت سنجی با روش خطی ARMAX
Table 3- Calculated values of evaluation criteria in calibration and validation sections by ARMAX linear method

	NS	KGE	R ²
واسنجی (Calibration)	0.70	0.85	0.73
صحت سنجی (Validation)	0.55	0.73	0.65

با توجه به اینکه پیش‌بینی دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در مطالعات هیدرولوژیکی دارای اهمیت بسزایی می‌باشد، لذا تعداد سه دبی اوج تشخیص داده شد که اطلاعات آنها بترتیب در **جدول ۴** و **۵** به تفکیک مراحل واسنجی و صحت‌سنجی ذکر شده است. همانگونه که در **جدول ۴** نشان داده شده است، مدل برای دبی اوج شماره ۱ که در ماه فوریه سال ۱۹۹۹ با مقدار دبی ۱/۱۲۵ متر مکعب بر ثانیه اتفاق

همچنین مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی در خروجی حوضه شامل NS، KGE و R² در **جدول ۳** آورده شده است. با توجه به **جدول ۳** و نظر موریاسی^۱ و همکاران (Moriassi et al., 2007) آئی ال^۲ (Ayele et al., 2017) و کرمی و بیاتی خطیبی (Karami et al., 2019)، مقدار محاسبه شده این معیارها نشان می‌دهد که مدل با روش خطی ARMAX در بخش واسنجی از نظر معیار NS، عملکردی خوب و از نظر معیار R² و KGE، عملکردی خیلی خوب و در بخش صحت‌سنجی از نظر معیار NS، عملکرد قابل قبول و از نظر معیار R² و KGE، عملکرد خوبی داشته است.

1- Moriassi
2- Ayele

نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف اندک $0/0044$ متر مکعب در ثانیه بیشتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی انجام داده و می‌توان گفت در این دبی اوج مدل عملکرد خوبی از خود نشان داده است.

افتاده است و مهم‌ترین دبی اوج در بخش واسنجی محسوب می‌شود، توانسته از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف $0/155$ متر مکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام دهد. در بخش صحت‌سنجی، مدل از

جدول ۴- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش ARMAX در بخش واسنجی

Table 4- Information about peak flow and time to peak flow by ARMAX method in calibration section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی شده (Simulation)		قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی (درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)		
دبی اوج شماره ۱ (Peak discharge No. 1)	Feb-1999	1.125	Feb-1999	0.97	(%13) 0.155	-
دبی اوج شماره ۲ (Peak discharge No. 2)	Nov-2004	0.135	Dec-1999	0.266	(%97) 0.131	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۳ (Peak discharge No. 3)	Aprl-2012	0.236	Aprl-2012	0.139	(%41.1) 0.139	-

جدول ۵- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش ARMAX در بخش صحت‌سنجی

Table 5- Information about the peak flow and the time to reach the peak flow by ARMAX method in the validation section

	مشاهداتی (Observation)		شبیه‌سازی شده (Simulation)		قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی (درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)	تأخیر (Delay)
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)		
دبی اوج شماره ۴ (Peak discharge No. 4)	Feb-2014	0.08	Feb-2014	0.0912	(%14) 0.0112	-
دبی اوج شماره ۵ (Peak discharge No. 5)	Feb-2017	0.103	Jan-2017	0.09	(%12.62) 0.013	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۶ (Peak discharge No. 6)	Mar-2019	0.278	Mar-2019	0.2824	(%1.58) 0.0044	-

دبی‌های اوج در بخش واسنجی در جدول ۸، اطلاعات مربوط به دبی‌های اوج در بخش صحت‌سنجی در جدول ۹ و نمودار دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ قرار داده شده است.

نتایج حاصل از اجرای مدل با روش خطی EXPUH

برای اجرای بخش واسنجی و صحت‌سنجی از داده‌های اولیه‌ی مورد استفاده در روش ARMAX استفاده شد. مقادیر واسنجی شده پارامترها در جدول ۶ مقادیر محاسبه‌شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۷، اطلاعات مربوط به

جدول ۶- مقادیر بهینه پارامترها با روش خطی EXPUH

Table 6- Optimal values of parameters with EXPUH linear method

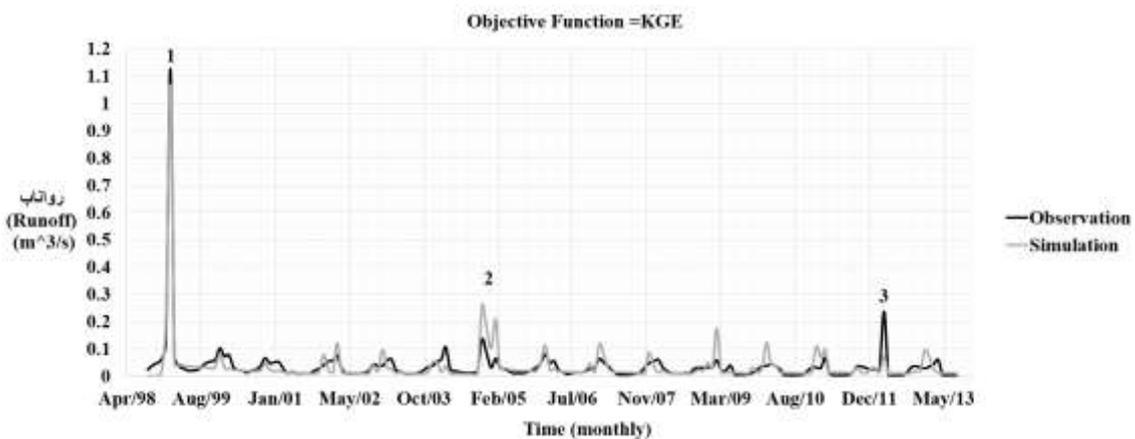
پارامتر (Parameter)	c	f	tw	τ_s	V_s
مقادیر محاسبه‌شده (Calculated values)	0.094	0.434	0.591	17.365	0.405

جریان رودخانه مشارکت دارد. مقادیر محاسبه شده معیارهای ارزیابی در جدول ۷ آورده شده است. مقادیر محاسبه شده این معیارها نشان می‌دهد که مدل با روش خطی EXPUH در بخش واسنجی از نظر معیار NS، KGE و R² عملکردی خیلی خوب و در بخش صحت‌سنجی از نظر معیار NS و R² عملکرد رضایت‌بخش و از نظر معیار KGE، عملکرد خوبی داشته است.

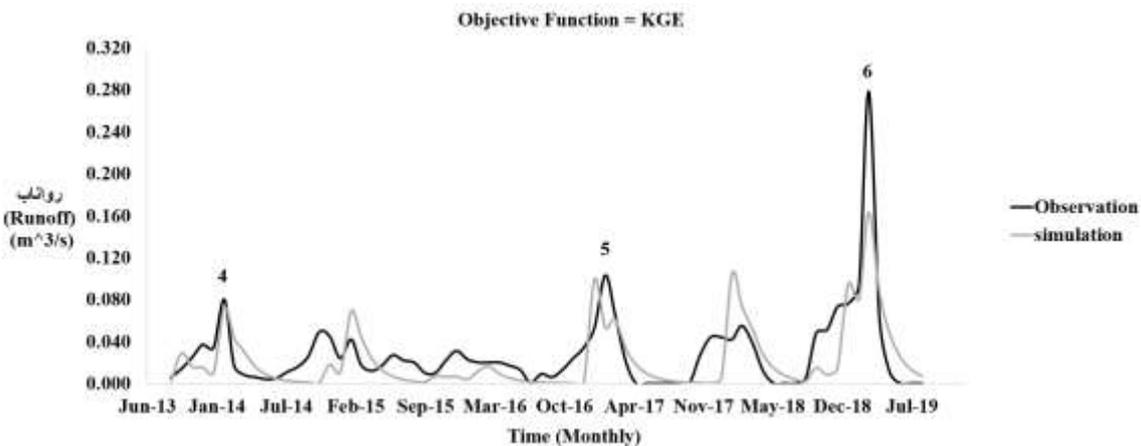
با توجه به جدول ۶ مقدار پارامتر c در این روش مانند روش ARMAX کوچک محاسبه شد و بیانگر این است که حوضه مورد بررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد. مقدار محاسبه شده پارامتر f، بیانگر این است که تغییرات دما تأثیر اندکی بر میزان تلفات داشته است. مقدار محاسبه شده پارامتر tw، بیانگر این مطلب است که تقریباً نصف روز طول می‌کشد تا حوضه مورد بررسی خشک شود. پارامتر T_s، بیانگر مدت‌زمانی است، که طول می‌کشد جریان آهسته کاهش یابد و V_s، حجمی از جریان آهسته که در ایجاد

جدول ۷- مقادیر محاسبه شده معیارهای ارزیابی در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی با روش خطی EXPUH
Table 7- Calculated values of evaluation criteria in calibration and validation sections by EXPUH linear method

	NS	KGE	R ²
واسنجی (Calibration)	0.86	0.93	0.86
صحت‌سنجی (Validation)	0.51	0.63	0.54



شکل ۶- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با روش EXPUH در بخش واسنجی
Figure 6- Observed and simulated flow by EXPUH method in calibration section



شکل ۷- دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با روش EXPUH در بخش صحت‌سنجی
Figure 7- Observed and simulated flow by EXPUH method in the validation section

دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف ۰/۱۱۶ متر مکعب کمتر از مقدار مشاهداتی شبیه‌سازی انجام داده و می‌توان گفت در این دبی اوج مدل عملکرد خوبی از خود نشان نداده است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان گفت به‌طور کلی مدل با روش خطی EXPUH در بخش واسنجی در شناسایی زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و در بخش صحت‌سنجی با دقت نسبتاً خوب و از نظر محاسبه مقدار دبی اوج، در بخش واسنجی مقادیر اندکی کمتر از مقادیر مشاهداتی و در بخش صحت‌سنجی مقادیر کمتری از مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی کرده و عملکرد خوبی در مهم‌ترین دبی اوج بخش صحت‌سنجی از خود نشان نداده است.

پس از بررسی داده‌های مشاهداتی دبی و خروجی حاصل از اجرای مدل، تعداد سه دبی اوج شناسایی شد که اطلاعات مربوط به مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در بخش‌های واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب در **جدول ۸** و **۹** آورده شده است. با توجه به **جدول ۸**، مدل برای دبی اوج شماره ۱ که مهم‌ترین دبی اوج در بخش واسنجی محسوب می‌شود، توانست از نظر زمان رسیدن به دبی اوج با دقت بالا و از نظر مقدار دبی اوج با اختلاف اندک ۰/۰۵۸ مترمکعب بر ثانیه کمتر از مقدار مشاهداتی، شبیه‌سازی انجام دهد. با توجه به **جدول ۹**، در دبی اوج شماره ۶ که مهم‌ترین دبی اوج در بخش صحت‌سنجی محسوب می‌شود، مدل از نظر زمان رسیدن به

جدول ۸- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش EXPUH در بخش واسنجی

Table 8- Information about peak flow and time to reach peak flow by EXPUH method in calibration section

مشاهداتی (Observation)	شبیه‌سازی شده (Simulation)		تأخیر (Delay)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی (درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)		
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)			تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)
دبی اوج شماره ۱ (Peak discharge No. 1)	Feb-1999	1.125	Feb-1999	1.06	(%)0.058 (5.77)	-
دبی اوج شماره ۲ (Peak discharge No. 2)	Nov-2004	0.135	Nov-2004	0.257	(%)0.122 (90.37)	-
دبی اوج شماره ۳ (Peak discharge No. 3)	Apr-2012	0.236	Apr-2012	0.0713	(%)0.164 (69.78)	-

جدول ۹- اطلاعات مربوط به دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با روش EXPUH در بخش صحت‌سنجی

Table 9- Information about the peak flow and the time to reach the peak flow by EXPUH method in the validation section

مشاهداتی (Observation)	شبیه‌سازی شده (Simulation)		تأخیر (Delay)	قدر مطلق اختلاف مقادیر دبی (درصد اختلاف) (Absolute magnitude difference of Discharge values) (Percentage difference)		
	تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)			تاریخ (Date)	دبی ($\frac{m^3}{s}$) (Discharge)
دبی اوج شماره ۴ (Peak discharge No. 4)	Feb-2014	0.08	Feb-2014	0.0717	(%)0.0083 (10.37)	-
دبی اوج شماره ۵ (Peak discharge No. 5)	Feb-2017	0.103	Jan-2017	0.0991	(%)0.0039 (3.78)	۱ ماه 1 month
دبی اوج شماره ۶ (Peak discharge No. 6)	Mar-2019	0.278	Mar-2019	0.162	(%)0.166 (41.72)	-

قاسمی (Sarraf et al., 2021) و حافظ پرست و مرابی (Hafezparast and Marabi, 2021) هم‌خوانی دارد.

با بررسی نتایج حاصل شده در این تحقیق با مطالعات پیشین می‌توان گفت، از نظر بررسی عملکرد مدل با روش خطی EXPUH نتایج به‌دست‌آمده با نتایج صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2015)، لطفی راد و همکاران (Lotfirad et al., 2018)، صراف و

نتیجه گیری

برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و در روش ARMAX به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۳ و ۰/۶۵ برآورد شد که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل با روش ARMAX نسبت به روش EXPUH است. مقدار محاسبه معیارهای ارزیابی KGE، NS و R^2 در شبیه‌سازی دبی اوج و زمان رسیدن به اوج، در روش EXPUH به ترتیب برابر ۰/۵۱، ۰/۶۳، ۰/۵۴ و در روش ARMAX به ترتیب برابر ۰/۵۵، ۰/۷۳، ۰/۶۵ برآورد شد. بنابراین مدل با روش ARMAX در شناسایی دبی‌های اوج از نظر مقدار و زمان وقوع، عملکرد دقیق‌تری از خود نشان داد که این تاثیر انتخاب تابع انتقال مناسب در بخش خطی مدل را تایید می‌نماید. همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که مدل IHACRES در مقیاس ماهانه عملکرد خوبی دارد که با نتایج تحقیقات دایلاری و همکاران (Abushandi and Dailari et al., 2021) و ابوشاندی و مرکل (Merkel, 2011) همخوانی دارد. بنابراین در مجموع می‌توان گفت به علت اینکه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی مقدار دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج از اهمیت بالایی برخوردار است، مدل IHACRES در منطقه مورد مطالعه، با روش ARMAX در بخش خطی عملکرد دقیق‌تری نسبت به روش EXPUH داشته است.

در این تحقیق، عملکرد مدل IHACRES در شبیه‌سازی دبی خروجی حوضه رودخانه شور در قائن در مقیاس ماهانه با استفاده از بسته نرم‌افزاری "هایدرومد" و کد نویسی در محیط R، مورد ارزیابی قرار گرفت. در مقایسه با استفاده از نرم‌افزار IHACRES، در این پکیج امکان تغییر تابع هدف برای تعیین پارامترهای بهینه مدل و نیز تنظیماتی در بخش خطی مدل فراهم می‌باشد که می‌تواند در عملکرد مدل در بازتولید دبی در خروجی حوضه موثر باشد. مدل IHACRES (بسته نرم‌افزاری هایدرومد) دارای دو مازول غیرخطی و خطی است که بخش غیرخطی با هدف تبدیل بارش به بارش مؤثر در هر گام زمانی می‌باشد و بخش دیگر که بارش مؤثر را به جریان مدل‌سازی شده تبدیل می‌کند. در این مطالعه تاثیر انتخاب روش‌های "ARMAX" و "EXPUH" در بخش خطی و نیز تاثیر انتخاب تابع هدف KGE بر تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل، مورد بررسی قرار گرفت. بمنظور بررسی عملکرد مدل در بازتولید مقادیر دبی ماهانه و نیز دبی حداکثر از سه شاخص ارزیابی KGE، NS و R^2 استفاده گردید. مقادیر این شاخص‌های ارزیابی در روش EXPUH به ترتیب

منابع

1. Abushandi E., and Merkel B. 2013. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. *Water Resources Management* 27(7): 2391-2409. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0293-4>.
2. Abushandi E.H., and Merkel B.J. 2011. Application of IHACRES rainfall-runoff model to the Wadi Dhuliel arid catchment, Jordan. *Journal of Water and Climate Change* 2(1): 56-71. <https://doi.org/10.2166/wcc.2011.048>.
3. AkbariMotlagh., Ahmad A., Rezaei M., Rezvani Mahmoudi A., and Mousavi H. 2016. River Flow Prediction Using Artificial Neural Network System (Case Study of Shurqain River), *International Conference on New Research Achievements in Civil Engineering, Architecture and Urban Planning*. (In Persian)
4. Ayele G.T., Teshale E.Z., Yu B., Rutherford I.D., and Jeong J. 2017. Streamflow and sediment yield prediction for watershed prioritization in the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Water*. 9(10): 782. <https://doi.org/10.3390/w9100782>.
5. Ahmadi M., Moeini A., Ahmadi H., Motamedvaziri B., and Zehtabiyani G.R. 2019. Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 111: 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002>.
6. Baddoo T.D., Li Z., Guan Y., Boni K.R.C., and Nooni I.K. 2020. Data-Driven Modeling and the Influence of Objective Function Selection on Model Performance in Limited Data Regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(11): 4132. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114132>.
7. Box G.E. 1970. *GM Jenkins Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco, Holden-Day.
8. Chidaz A., Mohseni Sarvi M., Vafakhah M. 2009. Evaluation of HEC_HMS model for estimating flood hydrograph in Kasilian watershed, *Watershed Management Research*, No. 84. (In Persian with English abstract)
9. Dailari M., Darbandi S., Asadi E., and Samadian M. 2021. Simulation of effective parameters on river flow discharge trend using HACRES rainfall-runoff model in future periods (Case study: Zolachai River). *Echo Hydrology* 8(1): 177-193. (In Persian with English abstract)
10. Dooge J. 1973. *Linear theory of hydrologic systems*. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
11. Hafezparast M., and Marabi S. 2021. Prediction of Discharge Using Artificial Neural Network and IHACRES Models Due to Climate Change. *Journal of Renewable Energy and Environment* 8(3): 75-85. <https://doi.org/10.30501/jree.2021.257941.1162>.
12. Jakeman A., Littlewood I., and Whitehead P. 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and

- identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology* 117(1-4): 275-300. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90097-H](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90097-H).
13. Jakeman A., and Hornberger G. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall- runoff model? *Water Resources Research* 29(8): 2637-2649. <https://doi.org/10.1029/93WR00877>.
 14. Karimi M., Malekinejad H., Abqari H., and Azizian M. 2012. Evaluation of Different Flood Hydrograph Simulation Methods Using HEC_HMS Software Package (Case Study: Chehel Gezi Watershed), *Iranian Journal of Water Research* 5(9): 28-39. (In Persian with English abstract)
 15. Karami F., and Bayati Khatibi M. 2019. Modeling soil erosion and sediment yield prioritization in Satar Khan Watershed using MUSLE and SWAT models: *The Journal of Hydro Geomorphology* 15(18): 115-137. (In Persian with English abstract)
 16. Lotfirad M., Adib A., and Haghghi A. 2018. Estimation of daily runoff using of the semi-conceptual rainfall-runoff IHACRES model in the Navrood watershed (a watershed in the Gilan province. *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(2): 449-460. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2017.234237.614>.
 17. Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., and Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900. [DOI: 10.13031/2013.23153](https://doi.org/10.13031/2013.23153).
 18. Sadeghi S.H., Ghasemieh H., and Sadatinejad S.J. 2015. Performance Evaluation of the IHACRES Hydrological Model in Wet Areas (Case Study: Navrud Basin, Gillan) [Research]. *Journal of Water and Soil Science* 19(73): 73-83. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.73>. (In Persian with English abstract)
 19. Sarraf A., and Ghasemi H. 2021. Calibration of the IHACRES hydrological model using multi-objective social spider optimization and search and rescue algorithms. *Hydrogeomorphology*. (In Persian with English abstract). [DOI: 10.22034/hyd.2021.45015.1581](https://doi.org/10.22034/hyd.2021.45015.1581).
 20. Yaghoubi M., and Massah Bavani A. 2014. Sensitivity analysis and comparison of capability of three conceptual models HEC-HMS, HBV and IHACRES in simulating continuous rainfall-runoff in semi-arid basins. *Journal of the Earth and Space Physics* 40(2): 153-172. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22059/jesphys.2014.50640>.
 21. Zeid Ali Nejad N., Naseri Sh., and Alijani F. 2020. (Simulation of the effect of climate change on Taraz-Haraksh river runoff, Khuzestan province, using NEX-GDDP data set and IHACRES rainfall-runoff model. *Meteorology and Atmospheric Sciences* 2(2): 162-178. (In Persian with English abstract)



Effect of Bacterial Surfactant along with Application of Chelators on Soluble Cadmium in a Calcareous Soil

S. Arabteymori¹, A. Halajnia^{2*}, A. Lakzian³, F. Nikbin⁴

Received: 24-07-2021

Revised: 05-09-2021

Accepted: 11-11-2021

Available Online: 22-05-2022

How to cite this article:

Arabteymori S., Halajnia A., Lakzian A., and Nikbin F. 2022. Effect of Bacterial Surfactant along with Application of Chelators on Soluble Cadmium in a Calcareous Soil. Journal of Water and Soil 36(1): 53-65. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2021.71126.1063](https://doi.org/10.22067/JSW.2021.71126.1063)

Introduction

Surfactants as surface-active substances with combined hydrophobic and hydrophilic properties are widely used in various fields. In soil remediation processes these substances can be used to increase the availability of organic and inorganic contaminants to improve microbial decomposition of organic pollutants or heavy metals adsorption. In recent years, researchers have been seeking to produce and use surfactants that are more environment friendly. In this regard, produced biosurfactants by microorganisms are of special importance due to their environmental benefits. Microorganisms produce a wide range of biosurfactants. Biosurfactants are extracellular compounds that can combine with metals such as zinc, copper, and cadmium and can increase the solubility of these metals and reduce their toxicity. Negatively charged anionic biosurfactants such as rhamnolipids and lipopeptides can increase heavy metals availability by combining to metals and changing the properties of soil solution. In this study, the effect of surfactant application from *Pseudomonas putida* and *Bacillus subtilis* and some chelators include sodium citrate, humic acid and Na₂-EDTA on soluble cadmium in a contaminated calcareous soil was investigated.

Materials and Methods

This study was conducted as factorial in a completely randomized design in laboratory conditions at several steps separately. A calcareous soil sample was contaminated with 15 mg kg⁻¹ cadmium from the source of Cd (NO₃)₂. Contaminated soil incubated for 4 weeks at field capacity. Acid deposition method was used for surfactant extraction from culture medium of *Pseudomonas putida* KT-2440 and *Bacillus subtilis* 1795. The structure of extracted biosurfactants was investigated by FTIR. Equilibrium time was obtained by determining the amount of soluble cadmium at times 6, 12, 24, 36, 72 hours by adding 1mM sodium citrate, humic acid and Na₂-EDTA to the contaminated soil (ratio of 1 to 5 soil to solution).

The concentrations of 0, 0.1, 0.25, 0.5, 1 and 2 mM of humic acid, sodium citrate and Na₂-EDTA were used to determine the appropriate concentration of each chelator. To investigate the interaction of chelators and biosurfactants on soluble cadmium, an experimental was conducted as a completely randomized design with factorial arrangement design. Experimental treatments consisted of three types of chelating agents (sodium citrate, humic acid, Na₂-EDTA and control), two types of surfactants from *Pseudomonas putida* and *Bacillus subtilis*, and five concentration levels of the biosurfactants (0, 25, 50, 100 mg L⁻¹).

Results and Discussion

The highest amount of soluble cadmium (11.59 mg L⁻¹) was observed in Na₂-EDTA treatment at 72 hours, which was significant compared to the other treatments. The lowest amount of soluble cadmium was obtained through application of sodium citrate (0.205 mg L⁻¹) at 36 hours. In all studied concentrations, Na₂-EDTA had the greatest effect and sodium citrate had the least effect on soluble cadmium. While the use of Na₂-EDTA at all concentrations caused a significant increase in soluble cadmium, sodium citrate had no significant effect on

1, 2, 3 and 4- Graduate M.Sc. Student, Assistant Professor, Professor and Laboratory Expert Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

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

soluble cadmium at studied concentrations. Humic acid at concentrations higher than 0.5 mM significantly increased the soluble cadmium. Increasing the concentration of humic acid and citrate from 1 to 2 mM did not show any significant impact on soluble cadmium. At all levels of biosurfactant application, Na₂-EDTA and humic acid caused a significant increase in soluble cadmium concentration. In control and sodium citrate treatments, application of biosurfactants did not cause significant difference in the concentration of soluble cadmium. The highest amount of soluble cadmium was obtained as a result of the application of *Bacillus subtilis* surfactant and Na₂-EDTA. However, increasing the concentration of *Bacillus subtilis* surfactant from 25 to 100 mg L⁻¹ had no significant effect on increasing the efficiency of Na₂-EDTA. *Pseudomonas putida* surfactant had no significant effect on soluble cadmium in Na₂-EDTA application. While in humic acid treatment, the application of the *Pseudomonas putida* surfactant at the highest concentration (100 mg L⁻¹) increased the concentration of soluble cadmium. Using *Bacillus subtilis* surfactant did not have effect on soluble cadmium in application of humic acid.

Conclusion

Among the studied chelators (sodium citrate, humic acid and Na₂-EDTA), Na₂-EDTA had the greatest effect on soluble cadmium. While sodium citrate had no significant effect on soluble cadmium. Surfactants from *Pseudomonas putida* and *Bacillus subtilis* had different effects on increasing the efficiency of studied chelators and soluble cadmium in the studied soil. In Na₂-EDTA and humic acid application, surfactant from *Bacillus subtilis* at a concentration of 25 mg L⁻¹ and surfactant produced by *Pseudomonas putida* at a concentration of 100 mg L⁻¹ had a significant effect on soluble cadmium, respectively. It seems using biosurfactants and chelators on increasing soluble cadmium in soil can be useful for phytoremediation purposes to increase its uptake by plant. However, further research is needed.

Keywords: *Bacillus subtilis*, Bioremediation, Cadmium, *Pseudomonas putida*, Soil pollution

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۵۳-۶۵

تأثیر سورفکتانت باکتریایی همراه با کاربرد کلات کننده‌ها بر کادمیم محلول در یک خاک آهکی

سحر عرب تیموری^۱ - اکرم حلاج نیا^{۲*} - امیر لکزیان^۳ - فهیمه نیک بین^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

چکیده

در این پژوهش تأثیر دو نوع سورفکتانت باکتریایی بر کادمیم محلول همراه با کاربرد سه نوع کلات کننده (اسید هیومیک، سیترات سدیم و Na₂-EDTA) در یک خاک آهکی آلوده به کادمیم در چند آزمایش جداگانه در شرایط آزمایشگاه بررسی شد. زمان تعادل در کاربرد غلظت ۱ میلی مولار کلات کننده‌ها در شش زمان (۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸، ۷۲ ساعت) و غلظت موثر هر یک از کلات کننده‌ها در کاربرد غلظت‌های ۰، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲mM تعیین گردید. در نهایت تأثیر کاربرد هم‌زمان هر یک از کلات کننده‌ها و دو نوع سورفکتانت استخراج شده از باکتری‌های *Pseudomonas putida* و *Bacillus subtilis* در غلظت‌های صفر، ۵۰، ۲۵ و ۱۰۰ mg L⁻¹ بر کادمیم محلول بررسی شد. نتایج نشان داد با افزایش زمان تماس، کادمیم محلول خاک با کاربرد اسید هیومیک و Na₂-EDTA به صورت معنی‌داری (p<0.05) افزایش یافت. کاربرد Na₂-EDTA در همه غلظت‌های مورد مطالعه و کاربرد اسید هیومیک در غلظت‌های بالاتر از ۰/۲۵mM موجب افزایش کادمیم محلول در مقایسه با شاهد شد. سیترات سدیم در هیچ یک از غلظت‌ها و زمان‌های مورد مطالعه تأثیر معنی‌داری بر کادمیم محلول نداشت. بیوسورفکتانت‌های مورد استفاده تأثیر معنی‌داری بر کارایی سیترات سدیم از نظر افزایش کادمیم محلول نداشتند. کاربرد سورفکتانت تولید شده بوسیله *Bacillus subtilis* در غلظت ۲۵mg L⁻¹ همراه با Na₂-EDTA موجب افزایش کادمیم محلول گردید و افزایش غلظت این بیوسورفکتانت تأثیر معنی‌داری نسبت به غلظت ۲۵mg L⁻¹ ایجاد نکرد. در حالی که کاربرد هم‌زمان Na₂-EDTA و سورفکتانت *Pseudomonas putida* تأثیری بر کادمیم محلول نداشت این بیوسورفکتانت در غلظت ۱۰۰mg L⁻¹ اسید هیومیک موجب تفاوت معنی‌داری در غلظت کادمیم محلول خاک شد.

واژه‌های کلیدی: *Bacillus subtilis*، *Pseudomonas putida*، آلودگی خاک، زیست‌پالایی، کادمیم

مقدمه

2000). زیست‌پالایی یکی از زمینه‌های تحقیقاتی نوین می‌باشد که طی سال‌های اخیر دستاوردهای شگرفی را به همراه داشته است. در طول سال‌های اخیر، تأکید ویژه‌ای بر گیاه‌پالایی شده است، زیرا می‌تواند برای احیاء خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد (Robinson et al., 1997). از میکروب‌ها می‌توان جهت سمیت‌زدایی و تجزیه آلاینده‌ها و یا کمک به افزایش راندمان گیاه‌پالایی استفاده کرد. افزایش فراهمی آلاینده به ویژه فلزات سنگین موجب افزایش جذب آن توسط ریشه شده و در گیاه‌پالایی اهمیت زیادی دارد. در حالی که که فراهمی آلاینده در خاک می‌تواند به وسیله عوامل مختلف خاکی از جمله، مقدار و نوع رس‌ها، کربنات‌ها، مواد آلی و ... محدود شود. یکی از روش‌های افزایش فراهمی آلاینده‌ها در خاک جهت افزایش تجزیه میکروبی در مورد آلاینده‌های آلی و یا جذب در فلزات سنگین استفاده از سورفکتانت-

در حال حاضر روش‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی بسیاری برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین وجود دارد (Broos et al., 2005). وقتی غلظت فلزات سنگین بسیار کم است، روش‌های فیزیکی و شیمیایی بی‌اثر و پرهزینه خواهند بود. روش‌های زیستی مانند جذب زیستی یا تجمع زیستی برای حذف فلزات سنگین می‌تواند جایگزین خوبی برای روش‌های فیزیکی و شیمیایی باشد (Baker,

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد، استادیار، استاد و کارشناس آزمایشگاه گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: halajnia@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.71126.1063

(* - نویسنده مسئول)

نسبت به سورفکتانت‌های شیمیایی در فروشویی زیستی^۳ فلزات سنگین از جمله کادمیم راندمان حذف بالاتری از خود نشان داد. استفاده از کلات کننده‌ها نیز یکی از روش‌های افزایش فراهمی فلزات سنگین است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از اسید هیومیک در خاک‌های آلوده سبب افزایش فراهمی زیستی و تحرک فلزات می‌شود (Topcuoglu, 2012; Pizzeghello et al., 2013). هرچند برخی دیگر از مطالعات نشان می‌دهد که مواد آلی توانایی اتصال به یون‌های فلزی را دارند و منجر به افزایش تثبیت آن‌ها می‌شوند (Zhang et al., 2013). برونا آلیس گومز و همکاران (Bruna Alice Gomes et al., 2016) عنوان کردند که با استفاده از اسید هیومیک در خاک می‌توان محتوای فلزات سنگین محلول را کاهش و محتوای فرم متصل به مواد آلی Cu^+ ، Cd^{2+} و Zn^{2+} را افزایش داد تا فعالیت، سمیت و زیست فراهمی آن‌ها در خاک کاهش یابد. EDTA یک عامل کلات کننده مصنوعی است که در کلات کردن فلزات و افزایش غلظت آن‌ها در قسمت‌های بالای گیاه مؤثر است (Zhang et al., 2014; Luo et al., 2005). با این حال، در محیط زیست پایدار هستند (Nowack et al., 2006). بارونا و همکاران (Barona et al., 2001) مشاهده کردند که سرب، نیکل و روی پس از استفاده از EDTA متحرک‌تر بودند و احتمال آبشویی آن‌ها افزایش پیدا کرد.

با توجه به این که برخی تحقیقات نشان داده است که کلات کننده‌های طبیعی از قبیل سترات سدیم احتمالاً می‌توانند موجب افزایش کارایی بیوسورفکتانت‌ها می‌شوند (Gunawardana et al., 2011; Wang et al., 2002; Muhammad et al., 2009). این مطالعه اثر کاربرد هم‌زمان سورفکتانت باکتری‌های *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* و کلات کننده‌های سترات سدیم، اسید هیومیک و $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ بر کادمیم محلول مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی اثر سورفکتانت باکتریایی بر کادمیم محلول با آرایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط آزمایشگاهی در چند مرحله به صورت جداگانه انجام شد. پس از هوا خشک کردن نمونه خاک مورد آزمایش و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برخی از خواص فیزیکی و شیمیایی آن تعیین شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1979)، pH نمونه خاک در گل اشباع و هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع، کربن آلی به روش اکسایش با دی کرومات پتاسیم (Walkley and Black, 1934) و

های سنتزی یا طبیعی است. بیوسورفکتانت‌ها به دلیل مزایای بالقوه نسبت به همتایان سنتزی خود در بسیاری از زمینه‌های زیست‌محیطی اهمیت ویژه‌ای دارند. ریزجانداران طیف وسیعی از بیوسورفکتانت‌ها را تولید می‌کنند. بیوسورفکتانت‌ها مشابه سیدروفورها ترکیبات خارج سلول می‌باشند که قادر به تشکیل کمپلکس با فلزاتی مانند روی، مس و کادمیم بوده و می‌توانند سبب افزایش حلالیت این فلزات و کاهش سمیت آن‌ها شوند (Rosa et al., Makkar et al., 2011). از مزایای عمده بیوسورفکتانت‌ها تنوع ساختاری، سمیت کم، تجزیه زیستی بیشتر، قابلیت عملکرد در محدوده وسیعی از pH، دما و شوری است (Rosa et al., 2015; Makkar et al., 2011). سورفکتانت باعث تجمع، افزایش حلالیت و یا امولسیون انواع مختلف آلاینده‌های آلی و غیر آلی می‌شود (Gautam and Banat, 1995; Tyagi, 2006). یکی از مهمترین و رایج‌ترین کاربردهای بیوسورفکتانت‌ها در پالایش ترکیبات آلی مانند هیدروکربن‌ها افزایش فراهمی زیستی و تحرک آنها به هدف حذف آلاینده‌ها از طریق روش‌های تجزیه زیستی و یا آبشویی است (Das et al., 2008; Patowary et al., 2018; Volkering et al., 1998; Wei et al., 2020). با این حال استفاده از بیوسورفکتانت‌ها در پالایش ترکیبات معدنی مانند فلزات سنگین، به منظور حذف یون‌ها در طی مراحل شستشو با بررسی ارتباط بین آمفیفل‌ها^۱ (ترکیبات شیمیایی دارای هر دو ویژگی آب دوستی و چربی دوستی) و یون‌های فلزی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. آمفیفل‌ها قادر به تغییر شرایط فیزیکی و شیمیایی محلول یا تاثیر بر توزیع شیمیایی فلزات در میان فازهای مختلف آن هستند (Tiehm, 1994). مطالعات محدودی وجود دارد که بطور مستقیم اثر بیوسورفکتانت بر افزایش راندمان گیاه‌پالایی را بویژه در مورد فلزات سنگین بررسی کرده باشند. ون و همکاران (Wen et al., 2009) تاثیر مثبت رامنولپید^۲ را در خاک‌های آلوده به Zn و Cd مورد بررسی قرار دادند. جاواکار و همکاران (Juwarkar et al., 2008) از بیوسورفکتانت دی رامنولپید تولید شده توسط *Pseudomonas aeruginosa* BS2 برای حذف فلزات سنگین از خاک آلوده استفاده کردند. برخی مطالعات نشان می‌دهد که بیوسورفکتانت‌ها در حذف آرسنیک از خاک‌های آلوده تحت شرایط قلیایی کارایی دارند (Wang and Mulligan, 2009). نتایج لیما و همکاران (Lima et al., 2011) نشان داد که بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند با موفقیت برای حذف هم‌زمان فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی استفاده شوند. در مطالعه سان و همکاران (Sun et al., 2021) گزارش شد که بیوسورفکتانت تولید شده توسط *Pseudomonas sp.*

1- Amphiphiles

2- Rhamnolipid

3- Bioleaching

اسید هیومیک و Na₂-EDTA در غلظت یک میلی‌مول در لیتر تهیه و با نسبت ۱ به ۵ (۵ گرم خاک و ۲۵ میلی لیتر محلول) به خاک اضافه شدند. مقدار کادمیم در محلول در زمان‌های ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۷۲ ساعت بعد از سانتریفیوژ کردن با سرعت ۵۰۰۰ دور در دقیقه و پس از عبور از کاغذ صافی، به وسیله دستگاه جذب اتمی مدل PG990 اندازه‌گیری شد.

جهت تعیین غلظت مناسب ترکیبات اسید هیومیک، سیترات سدیم و Na₂-EDTA در غلظت‌های صفر، ۰/۱، ۰/۲۵، ۰/۵، ۱ و ۲ میلی‌مول در لیتر تهیه و با نسبت ۱ به ۵ به خاک اضافه شدند. بعد از ۷۲ ساعت تکان دادن مقدار کادمیم در محلول به وسیله دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

جهت بررسی اثر متقابل کلات کننده‌ها و بیوسورفکتانت‌ها بر کادمیم محلول، آزمایشی بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل فاکتورهای نوع کلات کننده (سیترات سدیم، اسید هیومیک، Na₂-EDTA و شاهد) در مناسب‌ترین غلظت از آزمایش قبل، نوع بیوسورفکتانت (استخراج شده از باکتریهای *Bacillus subtilis*، *Pseudomonas putida* KT-2440) و غلظت بیوسورفکتانت (صفر، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) انجام شد. نسبت خاک به محلول ۱ به ۵ و زمان تعادل ۷۲ ساعت در نظر گرفته شد. داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار JMP ۸ آنالیز و از آزمون LSD برای مقایسه میانگین‌ها در سطح معنی‌داری یک درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

بافت خاک مورد مطالعه sandy clay loam محتوی ۱۱/۲ درصد کربنات کلسیم معادل و ۰/۴۷ درصد کربن آلی، pH برابر ۷/۷، هدایت الکتریکی برابر ۳ دسی‌زیمنس بر متر بود. بیوسورفکتانت‌های استخراج شده از هر دو باکتری در تست گسترش روغن به وضوح موجب پراکنده شدن روغن سطحی به کناره‌های ظرف شدند. ساختارهای سورفکتانت‌های تولید شده توسط باکتری‌های *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* با استفاده از دستگاه FTIR^۱ مشخص و در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب آورده شده است.

شکل ۱ نمودار حاصل از طیف‌سنجی لیپوپپتید را نشان می‌دهد. طیف 3293 cm^{-1} را می‌توان به ارتعاشات کششی N-H نسبت داد. طیف دیگر 2962 cm^{-1} و 2925 cm^{-1} مربوط به C-H (CH₃, CH₂) می‌باشد. طیف 1656 cm^{-1} مربوط به گروه آمید CO-N است که

کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید (Loeppert and Suarez, 1996) اندازه‌گیری شد. نمونه خاک با نمک Cd(NO₃)₂ به میزان ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم آلوده شد. برای ایجاد تعادل میان کادمیم و خاک نمونه‌ها به مدت ۴ هفته در آزمایشگاه قرار گرفتند و رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی نگه داشته شد.

برای تولید و استخراج بیوسورفکتانت، باکتری‌های *Bacillus subtilis* 1795، *Pseudomonas putida* KT-2440 که به ترتیب از دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد و مرکز کلکسیون قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران تهیه شده بود، در محیط کشت حاوی (0.025 g) CaCl₂، (0.1 g) MgSO₄، (1 g) KH₂PO₄، (1 g) Na₂HPO₄·H₂O، (0.001g) FeSO₄·7H₂O، (0.5g) KCl، (2 g) NaNO₃ در لیتر و ۲ میلی‌گرم در لیتر محلول متشکل از عناصر کم مصرف (590 mg) CuSO₄·5H₂O، (60 mg) FeCl₃·6H₂O، (600 mg) ZnSO₄·7H₂O، (60 mg) COCl₂·6H₂O، (200 mg) MnSO₄·H₂O و ۲۰ گرم گلوکز به عنوان منبع اصلی کربن و pH تنظیم شده ۷ به مدت پنج روز بر روی دستگاه شیکر با سرعت ۱۵۰ دور در دقیقه و در دمای ۳۰ درجه سلسیوس رشد داده شدند (Silva et al., 2010).

برای تشخیص تولید بیوسورفکتانت از تست گسترش روغن استفاده شد. به این صورت که ۱۰۰ میکرولیتر از روغن خام به سطح ۴۰ میلی‌لیتر آب مقطر در یک ظرف پتری دیش اضافه شد تا یک لایه نازک ایجاد شود. سپس ۱۰ میکرولیتر از محیط کشت تلقیح شده با هر کدام از باکتری‌ها به مدت ۳۰ ثانیه در مرکز لایه روغن به آرامی قرار داده شد. کنار رفتن لایه روغن و نمایان شدن آب در سطح پتری دیش نشان دهنده حضور بیوسورفکتانت است (Phulpoto et al., 2020).

جهت استخراج و خالص‌سازی بیوسورفکتانت، محیط کشت حاوی باکتری به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد با سرعت ۱۴۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد تا سلول‌های باکتری از محیط کشت حاوی سورفکتانت حذف شوند. سپس pH محلول روبی با استفاده از اسید کلریدریک به ۲ رسانده شد (Das et al., 2008). پس از اسیدی کردن، محلول به مدت یک شب در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگه‌داری شد تا رسوب بیوسورفکتانت ایجاد شود. سپس رسوب حاصله با سانتریفیوژ کردن با سرعت ۱۲۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۴ درجه سلسیوس جدا شد. برای خالص‌سازی بیوسورفکتانت، به رسوب ۵۰ میلی لیتر آب مقطر با pH=۷/۵ اضافه شد (Das et al., 2008). سپس بیوسورفکتانت سه مرتبه با حجم مساوی از مخلوط کلروفوم-متانول با نسبت ۲ به ۱ استخراج شد. ساختار بیوسورفکتانت‌های استخراج شده به وسیله دستگاه FTIR مورد بررسی قرار گرفت.

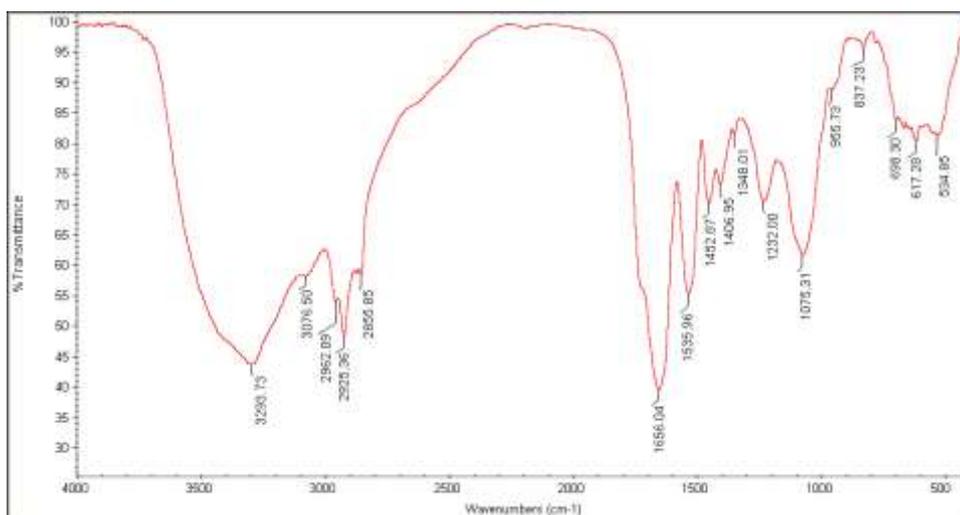
جهت به دست آوردن زمان تعادل، هر یک از مواد سیترات سدیم،

نشان دهنده گروه‌های آلکیل در زنجیره هیدروکربن را نشان داد. طیف ۱۲۲۹ و ۱۰۶۵ مربوط به گروه C-O-C است. طیف‌های جذب مشخصه نشان می‌دهند که این بیوسورفکتانت یک گلیکولیپید است که حاوی حلقه‌های قند و زنجیره‌های طولانی هیدروکربن است (Pornsunthorntawee et al., 2008).

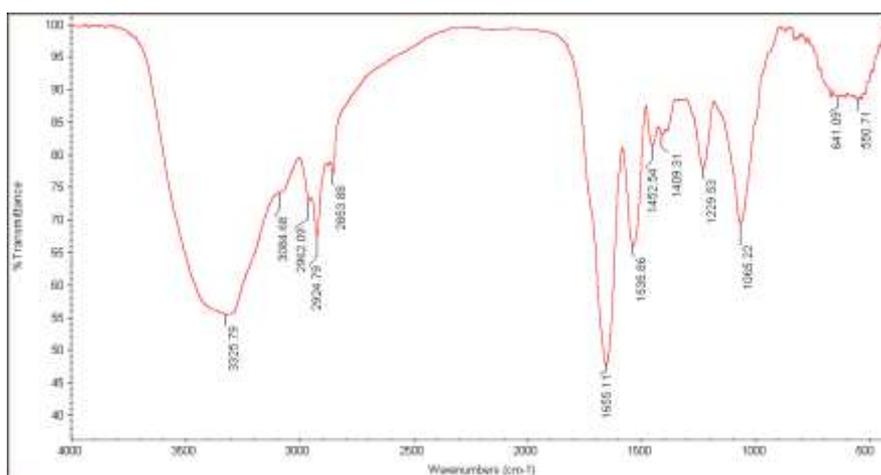
شکل ۳ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع کلات کننده و زمان را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار کادمیم محلول در تیمار EDTA و در زمان ۷۲ ساعت به مقدار ۱۱/۵۹ میلی‌گرم در لیتر مشاهده شد که در مقایسه با سایر تیمارها افزایش معنی‌داری را نشان داد.

نشان دهنده حضور گروه‌های پپتید و کربوکسیل است که ماهیت لیپوپپتید را نشان می‌دهد. طیف 1406 cm^{-1} و 1232 cm^{-1} زنجیره آلیفاتیک را نشان می‌دهد. این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که بیوسورفکتانت تولید شده، گروه‌های اصلی مشخصه یک مولکول سورفکتین را دارا می‌باشد و این بیانگر وجود هیدروکربن آلیفاتیک و همچنین پپتید است (Berreuter et al., 2002).

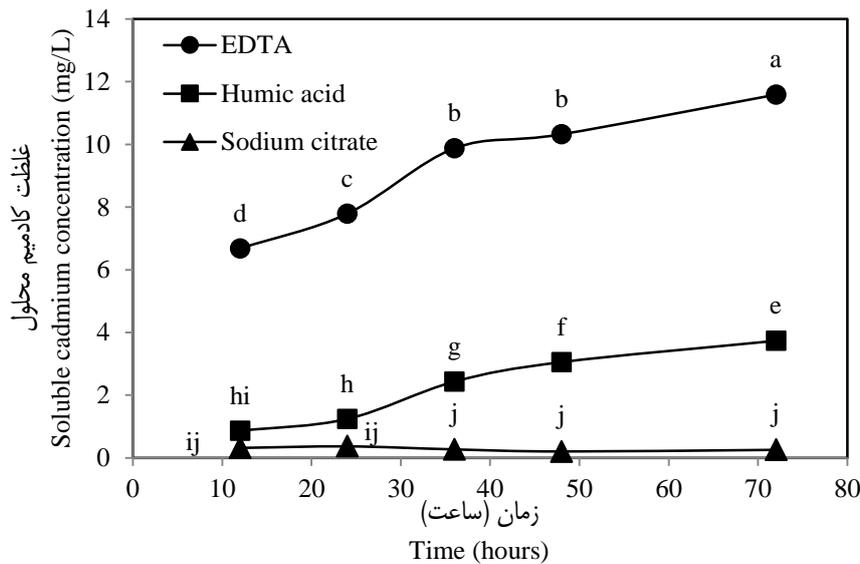
تجزیه و تحلیل ساختار رامنولیبید در شکل ۲ نشان داده شده است. طیف‌های 3325 cm^{-1} ، 2962 و 2924 نشان دهنده ارتعاشات کششی C-H موقعیت زنجیره هیدروکربن است. طیف 1655 مربوط به ارتعاشات کششی C=O گروه‌های کربونیل است. ارتعاشات 1535



شکل ۱- طیف FTIR سورفکتانت تولید شده بوسیله باسیلوس ساتیلیس
Figure 1- FTIR spectrum of produced surfactant by *Bacillus subtilis*



شکل ۲- طیف FTIR سورفکتانت تولید شده بوسیله سودوموناس پوتیدا
Figure 2- FTIR spectrum of produced surfactant by *Pseudomonas putida*



شکل ۳- اثر متقابل زمان و نوع کلات کننده بر غلظت کادمیم محلول (نسبت خاک به محلول: ۱ به ۵، غلظت کلات کننده: یک میلی مولار)
 Figure 3- Interaction effect of time and type of chelator on the concentration of soluble cadmium (soil / solution ratio: 1:5, chelator concentration: 1 mM)

غلظت‌های ۰/۵، ۱ و ۲ میلی مولار مقدار کادمیم محلول را نسبت غلظت صفر آن به طور معنی داری افزایش داد.

EDTA می‌تواند با ایجاد کمپلکس‌های محلول و پایدار با فلزات سنگین، موجب تحرک بالای فلزات سنگین در خاک شود. همانند نتایج بدست آمده از این تحقیق در مطالعات زیادی EDTA به عنوان کلات کننده‌ای که بیشترین تأثیر را بر افزایش حلالیت فلزات سنگین در خاک دارد معرفی شده است و این ترکیب به طور وسیعی برای استخراج فلزات سنگین از خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گرفته است (Luo *et al.*, 2005; Turgut *et al.*, 2016; Barona *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2014). بارونا و همکاران (Barona *et al.*, 2001) مشاهده کردند که میزان تحرک سرب، نیکل و روی پس از استفاده از EDTA و در نتیجه احتمال آنبشوی آن‌ها افزایش پیدا کرد. در مطالعه‌ای که توسط لامبراشت و همکاران (Lambrechts *et al.*, 2011) انجام شد نشان دادند که افزودن EDTA به خاک آلوده به فلزات سنگین منجر به افزایش غلظت Zn و Cd در اندام‌های هوایی *Lolium perenne* شد و نقش مهمی در پالایش خاک‌های آلوده داشت. در مطالعات زیادی به اثر مثبت اسید سیتریک در افزایش فراهمی فلزات سنگین نیز اشاره شده است (Chen *et al.*, 2003; Turgut *et al.*, 2004). محمود و همکاران (Muhammad *et al.*, 2009) عنوان کردند که کاربرد EDTA و مقادیر مختلف اسید سیتریک به طور معنی داری باعث افزایش غلظت‌های کادمیم، سرب و کروم در اندام‌های هوایی گیاه *Typha angustifolia* در مقایسه با شاهد شد. طاهری پور و همکاران (Taheripur *et al.*, 2016) گزارش کردند کاربرد کلات‌های اسیدسیتریک و EDTA باعث

کمترین مقدار کادمیم محلول نیز در تیمار سیترات سدیم در زمان ۳۶ ساعت به مقدار ۰/۲۷۲۵ میلی گرم در لیتر بدست آمد که البته مقدار کادمیم در این زمان با زمان‌های ۶، ۱۲، ۲۴ و ۷۲ ساعت اختلاف معنی داری نداشت. از بین سه نوع کلات کننده مورد استفاده در این تحقیق EDTA بیشترین تأثیر و سیترات سدیم کمترین مقدار تأثیر بر کادمیم محلول را داشتند. در دو کلات کننده EDTA و اسید هیومیک با افزایش زمان، مقدار کادمیم محلول افزایش معنی دار یافت (شکل ۳).

شکل ۴ نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع و غلظت کلات-کننده بر مقدار کادمیم محلول را نشان می‌دهد. طبق این نتایج بیشترین مقدار کادمیم محلول در غلظت ۱ میلی مول بر لیتر کلات کننده EDTA (۱۱/۵۹ میلی گرم در لیتر) و کمترین مقدار کادمیم محلول نیز در غلظت ۰/۲۵ میلی مول بر لیتر کلات کننده سیترات سدیم (۰/۰۷۷ میلی گرم در لیتر) مشاهده شد. در همه غلظت‌های مورد آزمایش EDTA بیشترین تأثیر و سیترات سدیم کمترین تأثیر بر کادمیم محلول را داشتند. دو کلات کننده اسید هیومیک و EDTA در غلظت‌های ۱ و ۲ میلی مول بر لیتر از نظر تأثیر بر کادمیم محلول تفاوت معنی داری با یکدیگر نداشتند. به همین دلیل برای بخش بعدی آزمایش یعنی تعیین تأثیر بیوسورفکتانت به همراه کاربرد کلات کننده‌ها از غلظت ۱ میلی مول در لیتر کلات کننده‌ها استفاده شد. در حالی که کاربرد EDTA در همه غلظت‌های مورد استفاده موجب افزایش قابل توجه و معنی دار کادمیم محلول شد. بین غلظت صفر و سایر غلظت‌های مورد استفاده سیترات سدیم اختلاف معنی داری از نظر تأثیر بر فراهمی کادمیم محلول وجود نداشت. اسید هیومیک در

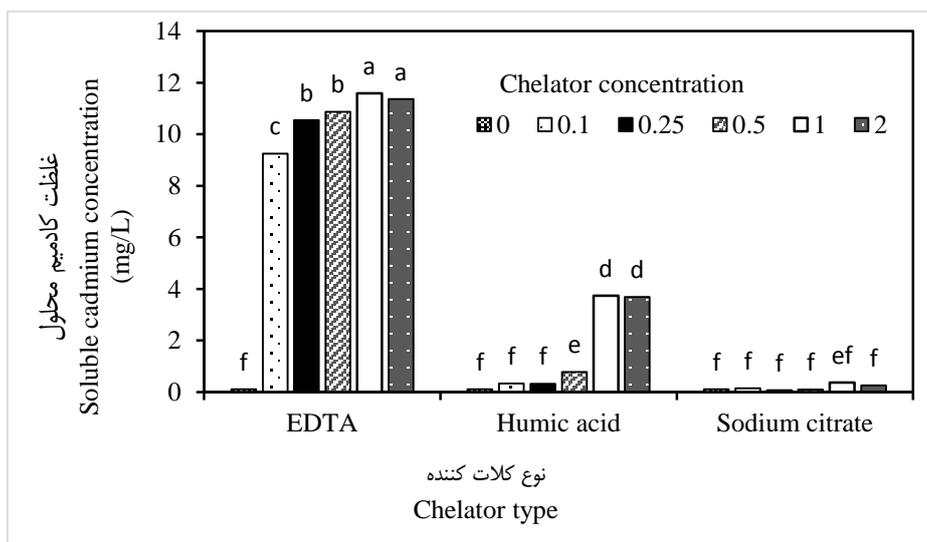
تحقیقات عمدتاً از اسید سیتریک استفاده شده است که داری pH پایینی است و به نظر می‌رسد که کاهش pH نقش اصلی در تاثیرگذاری این کلات کننده داشته باشد. در حالی که برای از بین بردن اثر pH در این تحقیق از سیترات سدیم استفاده شد تا تنها نقش کلات کنندگی آن بررسی شود.

اسید هیومیک با دارا بودن گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل و OH فنی می‌تواند در انتقال، زیست فراهمی و حلالیت عناصر سنگین نقش داشته باشد (Hofrichter and Steinbuchel, 2001; Lagier et al., 2000). اگرچه مطالعات زیادی نشان می‌دهد که استفاده از اسید هیومیک در خاک‌های آلوده باعث افزایش فراهمی زیستی و تحرک فلزات می‌شود (Pizzeghello et al., 2013; Rasouli-Sadaghiani et al., 2019; Topcuoglu, 2012)، با این حال برخی دیگر نشان می‌دهند که مواد آلی با ایجاد کمپلکس با یون‌های فلزی می‌تواند منجر به تثبیت آن‌ها شود (Rong et al., 2020; Zhang et al., 2013). برون‌آلیس گومز و همکاران (Bruna Alice Gomes et al., 2016) عنوان کردند که با استفاده از اسید هیومیک در خاک می‌توان محتوای فلزات سنگین محلول و محتوای فرم آلی مس، کادمیم، روی و سرب را کاهش داد تا فعالیت، سمیت و زیست فراهمی آن‌ها در خاک کاهش یابد.

نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع کلات کننده، نوع و غلظت بیوسورفکتانت نشان دهنده عدم معنی‌داری اثر ساده غلظت بیوسورفکتانت و اثر متقابل نوع کلات کننده و غلظت بیوسورفکتانت بر فراهمی کادمیم بود.

افزایش غلظت مس در اندام‌های هوایی ذرت شد و در این میان EDTA موثرتر از اسیدسیتریک بود. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2017) نیز گزارش کردند که EDTA نسبت به اسید سیتریک عامل کلات کننده موثرتری برای افزایش غلظت سرب محلول خاک بود.

این در حالی است که در این تحقیق سیترات سدیم به عنوان کلات کننده تاثیر معنی‌داری بر فراهمی کادمیم نداشت. تفاوت در نتایج به دست آمده می‌تواند ناشی از عدم تفکیک اثر کلات کنندگی و اثر pH در کاربرد اسید سیتریک باشد؛ چرا که اسید سیتریک در مقایسه با سیترات سدیم می‌تواند با تاثیر بر pH بر فراهمی عناصر تاثیرگذار باشد (Chen et al., 2003). طبق گزارش اعتمادیان و همکاران (Etemadian et al., 2018) کاربرد اسیدهای آلی در خاک‌ها منجر به کاهش سریع pH خاک‌ها می‌شود و این کاهش به غلظت اسید، درجه تفکیک یونی اسیدها، آنیون همراه و رفتار بیوشیمیایی آن‌ها در خاک بستگی دارد. در مطالعات انجام شده توسط گرای و همکاران (Gray et al., 2006) بر روی کادمیم در خاک گزارش شده است که تاثیرگذاری اسیدهای آلی بر واجذب این فلزات در pH های بالاتر کمتر بود. در این تحقیق نیز به نظر می‌رسد که آهکی بودن خاک و همچنین نیمه عمر کم سیترات (۲-۶ ساعت) (Van Hees et al., 2003) باعث شده تا اثرگذاری آن در مقایسه با سایر کلات کننده‌ها کمتر باشد. سرعت تجزیه پذیری بالای اسید سیتریک و در نتیجه کارایی کمتر آن در مقایسه با EDTA با نیمه عمر بیش از ۲۰ روز بر فراهمی عناصر سنگین بوسیله ون و همکاران (Wen et al., 2009) نیز گزارش شده است. علاوه بر این در بیشتر



شکل ۴- اثر متقابل غلظت و نوع کلات کننده بر غلظت کادمیم محلول (نسبت خاک به محلول: ۱ به ۵، زمان: ۷۲ ساعت)

Figure 4- Interaction effect of concentration and type of chelator on the concentration of soluble cadmium (soil / solution ratio: 1:5, time: 72 hours)

فراهمی فلزات سنگین Zn و Cd در روش‌های مختلف پالایش شود. تاثیر مثبت بیوسورفکتانت دی رامنولپید تولید شده توسط فلزات سنگین توسط جاوارکار و همکاران (*Juwarkar et al., 2008*) *Pseudomonas aeruginosa* BS2 در پالایش خاک آلوده به نیز گزارش شده است. در مطالعه‌ای اثر دی رامنولپید (-di-rhamnolipid) در حذف کروم، سرب، کادمیم و مس از خاک، در یک مطالعه ستونی بررسی شد و نتایج نشان داد که کاربرد محلول ۰/۱ درصد بیوسورفکتانت دی رامنولپید موجب حذف فلزات سنگین از خاک به ترتیب به صورت $Cd > Cr > Pb = Cu > Ni$ شد. تحقیقات نشان داده است که افزودن محلول سورفکتانت در فرآیندهای الکتروکینتیک می‌تواند تحرک آلاینده‌ها و فلزات سنگین را افزایش دهد (*Saichek and Reddy, 2005*). نتایج حاصل از تحقیق لیما و همکاران (*Lima et al., 2011*) نشان داد که بیوسورفکتانت‌ها می‌توانند با موفقیت برای حذف هم‌زمان یون‌های فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی از خاک آلوده به آلاینده‌های نفتی استفاده شوند. همچنین گزارش شده است که استفاده از لیپوپپتیدهای حاصل شده از گونه‌های مختلف باکتری باعث حذف کادمیم و فنانترن از خاک آلوده شده است. برخی مطالعات نشان می‌دهد که بیوسورفکتانت‌ها در حذف آرسنیک از خاک‌های آلوده تحت شرایط قلیایی کارایی دارند (*Wang and Mulligan, 2009*).

علاوه بر اثراتی که بیوسورفکتانت‌ها بر ویژگی‌های محلول خاک می‌گذارند، بیوسورفکتانت‌های آنیونی دارای بار منفی مانند رامنولپید و لیپوپپتید با ایجاد پیوند با فلزاتی مانند کادمیم می‌توانند موجب افزایش فراهمی آنها و ورودشان به فاز محلول شوند. با این حال ویژگی‌های فلز، ویژگی‌های خاک، تفاوت ساختاری و ویژگی‌های شیمیایی بیوسورفکتانت‌ها از جمله حلالیت، قدرت امولسیون کنندگی، تاثیر بر کشش سطحی و کمپلکس کنندگی می‌تواند بر شدت تاثیر بیوسورفکتانت‌ها در افزایش فراهمی فلزات سنگین موثر باشد. علاوه بر این غلظت بیوسورفکتانت از عوامل موثر دیگر است. حداقل غلظت بیوسورفکتانت مورد نیاز برای کاهش حداکثر کشش سطحی آب با عنوان غلظت بحرانی میسل یا CMC^2 ، شروع تشکیل میسل در نتیجه همگرایی مولکول‌های بیوسورفکتانت می‌باشد (*Silva et al., 2010*). مقدار CMC بستگی به ساختار سورفکتانت، ترکیب، درجه حرارت، قدرت یونی و حضور ترکیبات آلی در محلول‌ها دارد (*Fuguet et al., 2005*).

نتایج اثرات سه گانه نوع و غلظت بیوسورفکتانت و نوع کلات-کننده بر مقدار کادمیم محلول در جدول ۱ آورده شده است. کلات کننده‌های EDTA و اسید هیومیک در همه سطوح کاربرد بیوسورفکتانت موجب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم محلول نسبت به تیمار شاهد و سیترات سدیم شدند؛ در حالی که استفاده از سیترات سدیم به تنهایی و همراه با بیوسورفکتانت تاثیر معنی‌داری در غلظت کادمیم محلول نسبت به شاهد ایجاد نکردند. کاربرد سورفکتانت‌های تولید شده توسط *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* در هیچ کدام از غلظت‌های مورد استفاده بر افزایش کادمیم محلول در تیمارهای شاهد و سیترات سدیم معنی‌دار نبود. بیشترین مقدار کادمیم محلول در نتیجه کاربرد سورفکتانت *Bacillus subtilis* و کلات کننده EDTA به دست آمد. با این حال افزایش غلظت سورفکتانت *Bacillus subtilis* از ۲۵ به ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر تاثیر معنی‌داری بر افزایش کارایی کلات کننده EDTA نداشت. سورفکتانت حاصل از *Pseudomonas putida* در هیچ یک از سطوح استفاده شده تاثیر معنی‌داری بر کادمیم محلول در کاربرد EDTA نداشت. در حالی که در همراه با اسید هیومیک استفاده از سورفکتانت *Pseudomonas putida* در بالاترین غلظت (۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) در مقایسه با عدم کاربرد آن (غلظت صفر) موجب افزایش معنی‌دار غلظت کادمیم محلول شد. این نتایج نشان می‌دهد که به دلیل ساختار شیمیایی متفاوت کلات کننده‌ها و بیوسورفکتانت‌ها، نوع و غلظت بیوسورفکتانت تاثیر متفاوتی بر افزایش عملکرد کلات کننده‌های مختلف دارد. کاربرد بیوسورفکتانت‌ها در افزایش تاثیر کلات کننده‌ها و ترکیبات افزایش دهنده فرم فراهم عناصر سنگین در برخی مطالعات گزارش شده است. گوناواردانا و همکاران (*Gunawardana et al., 2011*) گزارش کردند که استفاده هم‌زمان از EDDS، بیوسورفکتانت رامنولپید^۱ و اسید سیتریک باعث افزایش فراهمی مس، کادمیم سرب و انتقال مقدار قابل توجهی از آنها به ساقه گیاه چچم (*Lolium perenne*) شد. علاوه بر نوع بیوسورفکتانت غلظت آن نیز عامل مهم دیگری در کارایی این مواد است. مولیگان و همکاران (*Mulligan et al., 2001*) حذف بیشتر عنصر روی در سطح ۲ درصد بیوسورفکتانت را گزارش کردند که غلظت بالایی از بیوسورفکتانت در مقایسه با مطالعه حاضر می‌باشد. تفاوت در نتایج به دست آمده از تحقیقات مختلف در مورد تاثیر بیوسورفکتانت بر فراهمی عناصر سنگین می‌تواند تحت تاثیر نوع خاک، شرایط آزمایش و غلظت و نوع بیوسورفکتانت متفاوت باشد. ون و همکاران (*Wen et al., 2009*) گزارش کردند که رامنولپید در خاک به خوبی می‌تواند باعث افزایش

جدول ۱- اثر متقابل نوع و غلظت بیوسورفکتانت و نوع کلات کننده بر غلظت کادمیم محلول (نسبت خاک به محلول: ۱ به ۵، زمان: ۷۲ ساعت)

Table 1- Interaction effect of type and concentration of biosurfactant and chelator type on the concentration of soluble cadmium (soil / solution ratio: 1:5, time: 72 hours)

نوع کلات کننده Chelator type	باکتری Bacteria	غلظت بیوسورفکتانت Biosurfactant concentration (mg/L)	غلظت کادمیم محلول Soluble cadmium concentration (mg/L)
Control	<i>Bacillus subtilis</i>	0	0.218 e
		25	0.285 e
		50	0.333 e
		100	0.485 e
	<i>Pseudomonas putida</i>	0	0.223 e
		25	0.255 e
		50	0.283 e
		100	0.240 e
EDTA	<i>Bacillus subtilis</i>	0	11.510 b
		25	12.298 a
		50	12.740 a
		100	12.650 a
	<i>Pseudomonas putida</i>	0	11.510 b
		25	11.433 b
		50	10.985 b
		100	11.043 b
Humic acid	<i>Bacillus subtilis</i>	0	3.733 d
		25	4.138 cd
		50	4.020 cd
		100	4.103 cd
	<i>Pseudomonas putida</i>	0	3.733 d
		25	3.995 cd
		50	4.070 cd
		100	4.513 c
Sodium citrate	<i>Bacillus subtilis</i>	0	0.215 e
		25	0.235 e
		50	0.233 e
		100	0.180 e
	<i>Pseudomonas putida</i>	0	0.531 e
		25	0.550 e
		50	0.225 e
		100	0.167 e

معنی داری بر کادمیم محلول خاک نداشت. نتایج نشان داد که تاثیر نوع و مقدار سورفکتانت تولید شده توسط باکتری های *Bacillus subtilis* و *Pseudomonas putida* بر غلظت کادمیم محلول در کاربرد اسید هیومیک و EDTA و سیترات سدیم متفاوت بود. در مقایسه با عدم استفاده از بیوسورفکتانت، سورفکتانت تولید شده بوسیله *Bacillus subtilis* در غلظت ۲۵ میلی گرم در لیتر همراه با کاربرد EDTA و سورفکتانت تولید شده بوسیله *Pseudomonas putida* در غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر همراه با کاربرد اسید هیومیک تاثیر معنی داری بر کادمیم محلول خاک داشتند. مقدار کادمیم محلول در تیمار شاهد و سیترات سدیم در هیچ یک از غلظت های دو بیوسورفکتانت های مورد مطالعه تفاوتی نشان نداد. مطالعات بیشتر در خصوص تاثیر نوع و غلظت بیوسورفکتانت ها در خاک های مختلف بر فراهمی فلزات سنگین ضروری است. از نتایج استفاده از بیوسورفکتانت و کلات کننده ها بر افزایش فراهمی کادمیم می تواند

در غلظت های بالاتر از CMC تشکیل میسل ها می تواند کارایی بیوسورفکتانت در تغییر خواص فیزیکی و شیمیایی محلول و نقش کمپلکس کنندگی آن را تغییر دهد. بنابراین علاوه بر نوع بیوسورفکتانت غلظت آن و ویژگی های شیمیایی محلول می تواند کاملاً بر شدت و چگونگی تاثیر بیوسورفکتانت در فراهمی عناصر سنگین موثر باشد که بررسی تاثیر این عوامل نیازمند مطالعات بیشتر می باشد.

نتیجه گیری

نتایج نشان داد که کاربرد کلات کننده های اسید هیومیک و EDTA باعث افزایش معنی دار کادمیم محلول خاک شدند و در این بین EDTA تاثیر بیشتری بر کادمیم محلول خاک داشت در حالی که سیترات سدیم در هیچ یک از غلظت های مورد استفاده از ۰/۱ تا ۲ میلی مول در لیتر و در هیچ یک از زمان های مورد مطالعه تاثیر

برای اهداف گیاه پالایی جهت افزایش جذب آن به وسیله گیاه بهره برد.

منابع

- Babaeian E., Homaee M., and Rahnemaie R. 2016. Chelate-enhanced phytoextraction and phytostabilization of lead-contaminated soils by carrot (*Daucus carota*). Archives of Agronomy and Soil Science 62: 339-358. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1060320>.
- Baker A.J.M. 2000. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biological resource for phytoremediation of metal-polluted soils. In: Phytoremediation of Contaminated Soil and Water. Terry N., and Banuelos G.S. (Eds.). CRC Press. Boca Raton. 85-107.
- Banat I.M. 1995. Biosurfactants production and use in microbial enhanced oil recovery and pollution remediation: a review. Bioresource Technology 51: 1-12. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(94\)00101-6](https://doi.org/10.1016/0960-8524(94)00101-6).
- Barona A., Aranguiz I., and Elias A. 2001. Metal associations in soils before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further cleanup procedures. Environmental Pollution 113: 79-85. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00158-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00158-5).
- Berreuter H., Charzinski J., and Scherer S. 2002. Intraspecific diversity of *Brevibacterium linens*, *Corynebacterium glutamicum* and *Rhodococcus erythropolis* based on partial 16S rDNA sequence analysis and Fourier-transform infrared (FT-IR) spectroscopy. Microbiology 148: 1523-1532. <https://doi.org/10.1099/00221287-148-5-1523>.
- Broos K., Beyens H., and Smolders E. 2005. Survival of rhizobia in soil is sensitive to elevated zinc in the absence of the host plant. Soil Biology and Biochemistry 37: 573-579. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.08.018>.
- Bruna Alice Gomes D.M., Mottal F.L., and Andrade Santana M.H. 2016. Humic acids: Structural properties and multiple functionalities for novel technological developments. Materials Science and Engineering C 62: 967-974. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.001>.
- Chen Y.X., Li Q., Luo Y.M., He Y.F., Zhen, S.J., Yu, Y.L., Tian, G.M., and Wong, M.H. 2003. The role of citric acid on the phytoremediation of heavy metal contaminated soil. Chemosphere 50: 807-811. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00223-0).
- Das P., Mukherjee S., and Sen R. 2008. Antimicrobial potential of a lipopeptide biosurfactant derived from a marine *Bacillus circulans*. Journal Applied Microbiology 104: 1675-1684. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2007.03701.x>.
- Etemadian M., Hassani A., Nourzadeh Haddad M., and Hanifei M. 2018. Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. Journal of Water and Soil Conservation 24: 73-91. (In Persian with English abstract). [10.22069/jwsc.2017.12528.2723](https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.12528.2723).
- Fuguet E., Ràfols C., Rosés M., and Bosch E. 2005. Critical micelle concentration of surfactant in aqueous buffered and unbuffered systems. Analytica Chimica Acta 548: 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.05.069>.
- Gautam K.K., and Tyagi V.K. 2006. Microbial surfactants: a review. Journal of Oleo Science 55: 155-166. <https://doi.org/10.5650/jos.55.155>.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1979. Particle size analysis by hydrometer, a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. Soil Science Society of America Journal 43: 1004-1007. <https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300050038x>.
- Gray C.W., Dunham S.J., Dennis P.G., Zhao F.J. and McGrath S.P. 2006. Field evaluation of in situ remediation of a heavy metal contaminated soil using lime and red-mud. Environmental Pollution 142: 530-539. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.10.017>.
- Gunawardana B., Singhal N., and Johnson A. 2011. Effects of amendments on copper, cadmium and lead phytoextraction by *Lolium perenne* from multiple-metal contaminated solution. International Journal of Phytoremediation 13: 215-232. <https://doi.org/10.1080/15226510903567448>.
- Hofrichter M., and Steinbüchel A. 2001. Biopolymers. Vol. 1: Lignin, humic substances and coal. Wiley Europe-VCH, Weinheim, New York.
- Hosseini S.S., Lakzia A., and Halajnia A. 2017. Effect of EDTA and Citric acid on soil enzyme activities and phytoextraction of lead by sun flower and Indian mustard from a contaminated soil. Journal of Water and Soil Conservation 24: 47-65. (In Persian with English abstract). [10.22069/jwfs.2017.12039.2655](https://doi.org/10.22069/jwfs.2017.12039.2655).
- Juwarkar A.A., Dubey K.V., Nair A., and Singh S.K. 2008. Bioremediation of multi-metal contaminated soil using biosurfactant-a novel approach. Indian Journal of Microbiology 48: 142-146. <https://doi.org/10.1007/s12088-008-0014-5>.
- Lagier T., Feuillade G., and Matejka G. 2000. Interactions between copper and organic macromolecules: determination of conditional complexation constants. Agronomie 20: 537-546. <https://doi.org/10.1051/agro:2000148>.

20. Lambrechts T., Gustot Q., Couder E., Houben D., Iserentant A., and Lutts S. 2011. Comparison of EDTA-enhanced phytoextraction and phytostabilisation strategies with *Lolium perenne* on a heavy metal contaminated soil. *Chemosphere* 85: 1290-1298. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.07.034>.
21. Lima T.M.S., Procópio L.C., Brandão F.D., Leão B.A., Tótolá M.R., and Borges A.C. 2011. Evaluation of bacterial surfactant toxicity towards petroleum degrading microorganisms. *Bioresour. Technology* 102: 2957-2964. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.109>.
22. Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and Gypsum, *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>.
23. Luo C., Shen Z., and Li X. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* 59: 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.100>.
24. Makkar R.S., Cameotra S.S., and Banat I.M. 2011. Advances in utilization of renewable substrates for biosurfactant production. *Applied Microbiology and Biotechnology* 1: 1-19. <https://doi.org/10.1186/2191-0855-1-5>.
25. Muhammad D., Chen F., Zhao G., and Wu F. 2009. Comparison of EDTA and Citric-acid- enhanced phytoextraction of heavy metals in artificially metal contaminated soil by *Typha angustifolia*. *International Journal of Phytoremediation* 11: 558-574. <https://doi.org/10.1080/15226510902717580>.
26. Mulligan C.N., Yong R.N., and Gibbs B.F. 2001. Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review. *Engineering Geology* 60: 371-380. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(00\)00117-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(00)00117-4).
27. Nowack B., Schulin R., and Robinson B.H. 2006. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction. *Environmental Science & Technology* 40: 5225-5232. <https://doi.org/10.1021/es0604919>.
28. Patowary R., Patowary K., Kalita M.C., and Deka S. 2018. Application of biosurfactant for enhancement of bioremediation process of crude oil contaminated soil. *International Biodeterioration and Biodegradation* 129: 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.01.004>.
29. Phulpoto I.A., Liang H., Yu Z., Hu B., Wang Y., Ndayisenga F., Li J., and Qazi M.A. 2020. Production and characterization of surfactin-like biosurfactant produced by novel strain *Bacillus nealsonii* S2MT and its potential for oil contaminated soil remediation. *Microbial Cell Factories* 19: 145-157. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01402-4>.
30. Pizzeghello D., Francioso O., Ertani A., Muscolo A., and Nardi S. 2013. Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances. *Journal of Geochemical Exploration* 129: 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.007>.
31. Pornsunthorntawe O., Wongpanit P., Chavadej S., Abe M., and Rujiravanit R. 2008. Structural and physicochemical characterization of crude biosurfactant produced by *Pseudomonas aeruginosa* SP4 isolated from petroleum-contaminated soil. *Bioresour. Technology* 99: 1589-1595. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.020>.
32. Rasouli-Sadaghiani M.H., Karimi H., Ashrafi Saeidlou S., and Khodaverdiloo H. 2019. The Effect of Humic Acid on the Phytoremediation Efficiency of Pb in the Contaminated Soils by Wormwood Plant (*Artemisia absantium*). *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 22: 261-278. (in Persian with English abstract). [10.29252/JSTNAR.22.4.261](https://doi.org/10.29252/JSTNAR.22.4.261).
33. Robinson B.H., Brooks R.R., Howes A.W., Kirkman J.H., and Gregg P.E.H. 1997. The potential of the high biomass nickel hyper accumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining. *Journal of Geochemical Exploration* 60: 115-126. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00036-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00036-8).
34. Rong Q., Zhong K., Huang H., Li C., Zhang C., and Nong X. 2020. Humic acid reduces the available cadmium, copper, lead, and zinc in soil and their uptake by Tobacco. *Applied Sciences* 10: 1-12. <https://doi.org/10.3390/app10031077>.
35. Rosa C.F.C., Freire D.M.G., and Ferraz E.C. 2015. Biosurfactant microfoam: Application in the removal of pollutants from soil. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 3: 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.12.008>.
36. Saichek R.E., and Reddy K.R. 2005. Surfactant-enhanced electrokinetic remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in heterogeneous subsurface environments. *Journal of Environmental Engineering and Science* 4: 327-339. <https://doi.org/10.1139/s04-064>.
37. Silva S., Farias C., Rufino R., Luna J., and Arubbo L. 2010. Glycerol as substrate for the production of biosurfactant by *Pseudomonas aeruginosa* UCP0992. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 79: 174-183. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.03.050>.
38. Sun W., Zhu B., Yang F., Dai M., Sehar S., Peng C., Ali I., Naz I. 2021. Optimization of biosurfactant production from *Pseudomonas sp.* CQ2 and its application for remediation of heavy metal contaminated soil. *Chemosphere* 265. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129090>.
39. Taheripur A., Kiani Sh., and Hosseinpour A. 2016. Effect of EDTA and citric acid on phytoextraction of copper and zinc from a naturally contaminated soil by maize (*Zea mays* L.) cultivars. *Journal of Water and Soil* 29: 1493-1505. (In Persian with English abstract)

40. Tiehm A. 1994. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the presence of synthetic surfactants. *Applied Environmental Microbiology* 60: 258-263. <https://doi.org/10.1128/aem.60.1.258-263.1994>
41. Topcuoglu B. 2012. The influence of humic acids on the metal bioavailability and phytoextraction efficiency in longterm sludge applied soil. Conference on International Research on Food Security, Natural Resource Management and Rural Development. Tropentag, Gottingen, Germany.
42. Turgut C., Pepe M.K, and Cutright T.J. 2004. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*. *Environmental Pollution* 131: 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.017>.
43. Van Hees P.A.W., Jones D.L., and Godbold D.L. 2003. Biodegradation of low molecular weight organic acids in a limed forest soil. *Water, Air and Soil Pollution* 3: 121-144. <https://doi.org/10.1023/A:1024127514103>.
44. Volkering F., Breure A.M., and Rulkens W.H. 1998. Microbiological aspects of surfactant use for biological soil remediation. *Biodegradation* 8: 401-417. <https://doi.org/10.1023/A:1008291130109>.
45. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38. [10.1097/00010694-193401000-00003](https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003).
46. Wang S., and Mulligan C.N. 2009. Arsenic mobilization from mine tailings in the presence of a biosurfactant. *Applied Geochemistry* 24: 928-935. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.02.017>.
47. Wang Z., Shan X.Q., and Zhang S. 2002. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils. *Chemosphere* 46: 1163-1171. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00206-5](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00206-5).
48. Wei Z., Wang J.J., Meng Y., Li J., Gaston L.A., Fultz L.M., and DeLaune R.D. 2020. Potential use of biochar and rhamnolipid biosurfactant for remediation of crude oil-contaminated coastal wetland soil: Ecotoxicity assessment, *Chemosphere* 253: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126617>.
49. Wen J., Stacey S.P., McLaughlin M.J., and Kirby J.K. 2009. Biodegradation of rhamnolipid, EDTA and citric acid in cadmium and contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 2214-2221. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.006>.
50. Zhang T.H., Wei X.H., Yang B., Xia J.M., Liu C.Y., and Qiu R.L. 2014. Influence of the selective EDTA derivative phenyldiaminetetraacetic acid on the speciation and extraction of heavy metals from a contaminated soil. *Chemosphere* 109: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.039>.
51. Zhang Y., Yang X., Tian S., Guo W., and Wang J. 2013. The influence of humic acids on the accumulation of lead and cadmium in tobacco leaves grown in different soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13: 43-53. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000005>.



Interactive Effects of Pb (NO₃)₂, Biochar and Salicylic acid on Growth Characteristics of Thyme (*Thymus vulgaris* L.)

B. Rezaei¹, A.A. Amirinejad^{2*}, M. Ghobadi³

Received: 11-11-2021

Revised: 15-12-2021

Accepted: 29-01-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Rezaei B., Amirinejad A.A., and Ghobadi M. 2022. Interaction Effects of Pb (NO₃)₂, Biochar and Salicylic acid on Growth Characteristics of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). Journal of Water and Soil 36(1): 67-79. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.72977.1101](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.72977.1101)

Introduction

Industrial development has resulted in higher soils pollution with heavy metals. Plants which are subjected to heavy metals may severely lose their yield capabilities. Applying improving compounds in the soil is a new method to reduce effects of heavy metals on plants growth. Biochar as a carbon rich source and salicylic acid as an important plant hormone, are two main compounds to alleviate heavy metals stresses in plants. These are the cost-effective and environmentally friendly substances for increasing the resistance of plants. Lead (Pb), as a common and extremely poisonous element in polluted soils, can be accumulated due to its non-biodegradability nature. When Pb content in plants reaches a toxic level, it can inhibit plant growth by reducing enzyme activities and photosynthesis and changing mineral nutrients balance. However, with regard to the program of expanding the area under cultivation of medicinal plants, including thyme, there is a possibility of contamination of soils in the vicinity of industrial centers and roads with lead. Therefore, the present study was conducted to evaluate the effects of salicylic acid as a plant growth stimulant and biochar made of rapeseed wastes, as a stable organic compound, on alleviation of Pb-induced stress in thyme (*Thymus vulgaris* L.).

Materials and Methods

In order to investigate the effects of salicylic acid (SA) and biochar (BC) on reducing Pb stress in thyme (*Thymus vulgaris* L.), a factorial experiment was conducted based on a completely randomized design with three replications in the greenhouse of Razi University. The factors included Pb at three levels (0, 150, and 300 mg/kg as Pb(NO₃)₂), SA at three levels (0, 150, and 300 μM) and BC at three levels (0, 1 and 3% by weight). To apply the Pb treatments, the soil samples of each pot (8 kg) were sprayed with Pb(NO₃)₂ solutions, 4 weeks before planting, according to the contamination levels. Then, BC treatments were performed by mixing it with the soil samples. In each pot, four thyme seedlings were planted. At four-leaf stage, SA solutions were sprayed three times on foliage of the thyme plants, until the beginning of flowering. After harvesting, some characteristics of aerial and root parts of thyme, including soluble sugars and proline contents, plant height, dry weights of shoots and roots, root volume and root length were determined. All plant parameters were then averaged for each pot. Also, Pb concentrations in extracts obtained from digestion of leaf tissues, were measured by Varian AA220 atomic absorption spectrophotometer. The analysis of variance (ANOVA) and comparison of means (Duncan's multiple range test) were performed using SPSS-16 software.

Results and Discussion

The results revealed that Pb stress reduced all plant characteristics, such as plant height, root volume and root length, as well as, dry weights of shoots and roots, and elevated leaf Pb concentration, proline content and

1 and 2- M.Sc Student and Assistant Professor, Department of Soil Science and Engineering, Razi University, Kermansh, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: aliamirinejad@razi.ac.ir)

3- Associate Professor Department of Production Engineering and Plant Genetics, Razi University, Kermansh, Iran

soluble sugars in thyme. However, BC application resulted in improvements in growth parameters. The positive effect of BC was further enhanced when SA was sprayed onto the foliage of the thyme plants. The interaction effects of SA, BC and Pb treatments on the growth parameters of thyme, i.e. shoot dry weight, root volume, Pb concentration, soluble sugars and proline contents were significant ($P < 0.01$). In other words, SA and BC treatments moderated the negative effects of Pb on the growth traits. The highest Pb concentration (4.83 mg) and proline content (37.8 $\mu\text{mol/g}$) were obtained in 300 $\mu\text{g/kg}$ of Pb, and SA and BC controls. Also, the highest concentration of soluble sugars (0.46 mg/kg) was found at 300 mg/kg of Pb, 300 μM SA and BC control.

Conclusion

Our results indicated the positive effects of SA and BC treatments on the growth parameters, such as; shoot and root dry weights in thyme plants, especially under Pb stress. In other words, Pb stress, while reducing all growth characteristics, increased proline content and soluble sugars in thyme. In general, it seems that under Pb stress, treatment of thyme with SA (as a plant growth regulator) and BC (as an organic matter with high viability in the soil) is a simple and appropriate method in order to increase the plant's resistance and reduce the effects of Pb toxicity on the overall growth of thyme.

Keywords: Growth characteristics, Heavy metals, Soil improving compounds

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۶۷-۷۹

اثرات متقابل سرب نترات، سالیسیلیک اسید و بیوچار بر ویژگی‌های رشدی گیاه آویشن
(*Thymus vulgaris* L.)بهاره رضایی^۱ - علی اشرف امیری نژاد^{۲*} - مختار قبادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

چکیده

از روش‌های نوین کاهش اثرات فلزات سنگین بر رشد گیاهان، کاربرد ترکیبات اصلاح‌کننده در خاک است. بمنظور ارزیابی اثرات متقابل سرب نترات، سالیسیلیک اسید و بیوچار بقایای کلزا بر بر ویژگی‌های رشدی گیاه دارویی آویشن (*Thymus vulgaris* L.)، آزمایشی به صورت فاکتوریل، در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در شرایط گلخانه‌ای انجام گرفت. فاکتورها شامل غلظت سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک به صورت سرب نترات)، سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار) و بیوچار در سه سطح (۰، ۱ و ۳ درصد وزنی) بودند. نتایج نشان داد که تنش سرب تمام ویژگی‌های رشدی گیاه را کاهش داده اما تیمارهای سالیسیلیک اسید و بیوچار موجب تعدیل اثرات منفی سرب بر این خصوصیات گردید. اثر متقابل تیمارها بر ویژگی‌های رشدی از قبیل وزن خشک شاخساره و حجم ریشه و نیز مقدار قندهای محلول، پروتئین و سرب معنادار بود ($P < 0/01$). بیش‌ترین مقدار سرب (۴/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پروتئین (۳۷/۸ میکرومول بر گرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد. بطور کلی می‌توان گفت که کاربرد همزمان سالیسیلیک اسید و بیوچار یک روش آسان، ارزان و موثر در راستای کاهش اثرات تنش سرب بر رشد گیاه آویشن است.

واژه‌های کلیدی: ترکیبات اصلاح‌کننده خاک، عناصر سنگین، ویژگی‌های رشدی

مقدمه

یکی از مسائل مهم زیست محیطی، آلودگی خاک‌های کشاورزی با فلزات سنگین است. این فلزات به علت اینکه قابلیت تحرک کمی دارند در خاک تجمع یافته و این موضوع آن را به زنگ خطری برای محیط زیست تبدیل کرده است (Pikula and Stepien, 2021). کم تحرک‌ترین عنصر سنگین که گاهی تا ۱۵۰ سال در خاک باقی می‌ماند، سرب است. به علت اینکه سرب در لایه سطحی خاک انباشته می‌شود، به راحتی از طریق ریشه جذب شده و در نتیجه سمیت آن برای گیاهان حدود بیست برابر بقیه عناصر است (Sharma

and Dubey, 2005). در گیاهان، سمیت سرب موجب تنش

اکسیداتیو شده و با تأثیر در بعضی فرآیندهای سوخت و ساز، موجب کاهش شدید رشد بخش‌های هوایی می‌شود. به عنوان مثال، سرب با افزایش فعالیت کلروفیلاز موجب تجزیه کلروفیل و کاهش فعالیت فتوسنتزی گیاهان می‌گردد (Zhou et al., 2018).

یکی از راه‌های مقابله با تنش سرب، استفاده از ترکیبات اصلاح‌کننده با کارایی بالا و مقرون به صرفه است. سالیسیلیک اسید یا ارتو هیدروکسی بنزوئیک اسید، یکی از مشتقات فنلی است که با ایجاد یک سری واکنش‌های متابولیک در گیاهان، موجب افزایش سازگاری آن‌ها در برابر تنش‌های محیطی و از جمله افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش فلزات سنگین می‌گردد (Metwally et al., 2015). به عنوان مثال، گزارش شده که کاربرد اسید سالیسیلیک اثرات سمی سرب را در گیاه دارویی مریم گلی (*Salvia officinalis* L.) کاهش داده است (Teymouri et al., 2021).

همچنین، در سالیان اخیر استفاده از بیوچار برای اصلاح کیفیت

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: aliamirinejad@razi.ac.ir)

۳- دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.72977.1101

می‌آید (Barraza et al., 2021).

به هر حال، با توجه به برنامه گسترش سطح زیرکشت گیاهان دارویی و از جمله آویشن در کشور و امکان تجمع سرب در خاک حاشیه مراکز صنعتی و جاده‌ها، بررسی نحوه اصلاح محیط خاک و کاهش قابلیت جذب سرب برای گیاهان با روش‌های آسان و کم هزینه که در زمان کوتاه نیز نتیجه‌بخش باشد، مورد تأکید است. در این راستا، مطالعه اثرات متقابل سالیسیلیک اسید، به عنوان یک محرک رشد گیاهی و بیوجار کلزا، به عنوان یک ترکیب آلی پایدار در خاک، در کاهش اثرات منفی سرب بر رشد گیاه دارویی آویشن مورد توجه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشگاه رازی انجام شد. نمونه برداری خاک از لایه سطحی (عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری) زمین‌های کشاورزی منطقه ماهیدشت استان کرمانشاه، با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۹ دقیقه و ۴۲ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۳۶ دقیقه و ۱۲ ثانیه شرقی، تهیه شد. تجزیه اولیه نمونه‌های خاک شامل تعیین بافت خاک با روش هیدرومتر (Bouyoucos, 1962)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) خاک در نسبت ۱:۲/۵ توسط pH متر و هدایت‌سنج الکتریکی (Klute, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی‌سازی با اسید کلریدریک (Allison and Moodie, 1965)، کربن آلی به روش تیتراسیون با فروسولفات آمونیم (Walkley and Black, 1934)، جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه (Klute, 1986) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش استات آمونیوم (Klute, 1986) صورت گرفت. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

تیمارهای آزمایشی شامل غلظت سرب در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک از نمک سرب نیترات)، سالیسیلیک اسید در سه سطح (۰، ۱۵۰ و ۳۰۰ میکرومولار) و بیوجار در سه سطح (۰، ۱ و ۳ درصد وزنی) بودند. انتخاب سطوح تیمارها بر اساس نتایج تحقیقات قبلی در خصوص گیاه آویشن و سایر گیاهان مشابه صورت گرفت (Padash ; Mehdimiri et al., 2015; Feizi et al., 2021). جهت اعمال تیمار سرب، ۴ هفته قبل از کاشت، نمونه خاک هر گلدان (به میزان ۸ کیلوگرم)، با توجه به سطح آلودگی، با محلول نیترات سرب اسپری گردید. طی این مدت، نمونه‌های خاک ضمن بهم‌زدن به حالت مرطوب نگه‌داشته شد. سپس تیمارهای بیوجار به صورت مخلوط کردن با خاک انجام گردید. برای سهولت زهکشی، در کف هر گلدان مقداری پرلیت و پوکه معدنی اضافه و سپس نمونه خاک ریخته شد.

فیزیکی و شیمیایی خاک مورد توجه قرار گرفته است. این ماده که از تجزیه بقایای گیاهی مانند پوسته میوه‌ها و ضایعات کشاورزی در شرایط بدون اکسیژن حاصل می‌گردد، با افزایش میزان ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)، ظرفیت نگهداشت آب در خاک و وضعیت تهویه، کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد (Carter et al., 2013). علاوه بر این، بیوجار می‌تواند موجب تغییر شکل قابل جذب و یا تثبیت فلزات سنگین در خاک شود. به عبارتی، بیوجار به دلیل دارا بودن گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل و کربونیل و نیز خاصیت بازی، ساختار متخلخل و سطح ویژه بالا، توانایی دسترسی آلاینده‌های معدنی خاک را کاهش می‌دهد. فرایند جذب فلزهای سنگین نیز در قالب یکسری واکنش‌های الکتروستاتیک، مبادله یونی، ته‌نشست و رسوب شیمیایی و یا ایجاد کمپلکس با گروه‌های عاملی در سطوح بیوجار صورت می‌گیرد (Birria et al., 2016). البته خصوصیات بیوجار تولیدی مانند CEC، سطح ویژه و pH به نوع ماده آلی مورد استفاده، دمای سیستم و میزان اکسیژن در طی فرایند پیرولیز بستگی دارد (Ahmad et al., 2012). فیضی و همکاران (Feizi et al., 2021) در بررسی اثرات بیوجار و سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) گزارش کرده‌اند که کاربرد سالیسیلیک اسید و بیوجار ضمن کاهش غلظت سرب شاخساره، توانست بطور قابل ملاحظه‌ای اثرات تنش سرب بر ویژگی‌های رشدی ریحان را کاهش دهد.

تیموری و همکاران (Teiymouri et al., 2021) نیز در بررسی اثرات بیوجار و سالیسیلیک اسید بر کاهش تنش سرب در گیاه مریم-گلی (*Salvia officinalis* L.) گزارش کرده‌اند که کاربرد هم‌زمان بیوجار و سالیسیلیک اسید؛ به عنوان یک استراتژی ساده و کم هزینه، توانست با افزایش غلظت پرولین و فندهای محلول، اثرات منفی سرب بر گیاه مریم گلی را کاهش دهد.

در سال‌های اخیر با توجه به عوارض داروهای شیمیایی و گرایش مردم به محصولات ارگانیک، استفاده از گیاهان دارویی (گیاه درمانی) مورد توجه قرار گرفته است. آویشن (*Thymus vulgaris* L.) یک گیاه دارویی از تیره نعنائیان (Lamiaceae) است که خاصیت ضد باکتریایی، ضد قارچی و ضد ویروسی دارد. مواد مؤثره آویشن بسیار خلط‌آور بوده و عصاره تهیه شده برای تسکین سرفه و گلودرد به کار می‌رود. این گیاه که به شکل دم‌کرده، عصاره روان، شربت و پودر مورد استفاده قرار می‌گیرد (Omidbeigi, 2010) دارای ساختار بوته‌ای با برگ‌های خوشبو و ساقه علفی و پرانشعاب بوده و معمولاً تا ارتفاع ۳۵ سانتی‌متر رشد می‌کند. اگرچه این گیاه بومی ایران نیست اما کشت آن جهت برآورده کردن نیاز داخلی و صادرات مهم است. در مناطق نیمه خشک تا معتدل رویش مناسب داشته اما بیشترین میزان اسانس آن در وضعیت نور طبیعی و ۵۰ درصد رطوبت خاک به دست

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده
Table 1- Physical and chemical properties of the soil sample

سرب Pb mg kg ⁻¹ (¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol _c kg ⁻¹)	B mg.kg ⁻¹ (¹)	Mn mg.kg ⁻¹ (¹)	Cu mg.kg ⁻¹ (¹)	Zn mg.kg ⁻¹ (¹)	Fe mg.kg ⁻¹ (¹)	K ₂ O mg.kg ⁻¹ (¹)	P _{tot} mg.kg ⁻¹ (¹)	N _i (%)	کربن الی OC (%)	آهک CaCO ₃ (%)	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	pH ماش	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
0.17	11.5	1.5	7.6	1.3	1.8	9.5	182	7.6	0.09	0.93	26.5	0.5	7.7	16.4	42.6	41

الکتریکی قرار داده و دمای کوره به تدریج و در عرض ۲ ساعت به ۵۵۰ درجه سلسیوس رسانیده شد. بعد از حدود ۶ ساعت، خاکستر حاصل را با کمی آب خیس کرده و سپس به آرامی ۲/۵ میلی لیتر کلریدریک اسید ۲ مولار افزوده شد. بعد از انجام فعل و انفعالات لازم بر روی هات پلیت و خروج بخارات، محتویات بوتله را در یک بالن ژوژه ۲۵ میلی لیتری صاف کرده و سپس با آب مقطر ولرم به حجم رسانیده شد. در نهایت، غلظت سرب عصاره توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید (Klute, 1986).

مقدار قندهای محلول با روش کالریمتری (Dubois et al., 1956) و پرولین با روش بیتس و همکاران (Bates et al., 1973) تعیین گردیدند.

تهیه بیوچار با استفاده از فرایند پیرولیز بقایای مزرعه کلزا در دمای ۳۵۰ درجه سلسیوس در شرایط کم هواری صورت گرفت (Wang et al., 2018). بیوچار تهیه شده پس از عبور از الک دو میلی متری، برای اندازه گیری بعضی ویژگی های مهم استفاده شد. راندمان بیوچار با توجه به نسبت وزنی کاه و کلش اولیه به بیوچار تولیدی تعیین شد. pH و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) بیوچار در نسبت ۱:۵ آب به بیوچار توسط دستگاه pH متر و EC متر اندازه گیری گردید. سطح ویژه بیوچار نیز بر اساس میزان جذب گاز نیتروژن در سطح جاذب تعیین شد (Leng et al., 2021). همچنین، میزان سدیم و پتاسیم با روش فلیم فتومتری اندازه گیری شدند. جدول ۲ ویژگی های بیوچار تولیدی را نشان می دهد.

بررسی ویژگی های بیوچار کلزا تولیدی نشان می دهد که pH آن ۸/۹ با ماهیت قلیایی بوده که دلیل این موضوع آزاد شدن نمک های قلیایی در طی فرآیند پیرولیز است (Carter et al., 2013). البته به دلیل اسیدیته قلیایی اکثر خاک های ایران، افزودن پیوسته بیوچار ممکن است اثر مخرب بر کیفیت خاک داشته باشد. میزان قابلیت هدایت الکتریکی (EC) نیز به دلیل آزاد شدن یون های معدنی حین فرآیند پیرولیز ۵/۴۵ دسی زیمنس بر متر بود. سطح ویژه و CEC بیوچار تولیدی نیز بالا بود.

در هر گلدان چهار نشاء آویشن (*Thymus vulgaris L.*) به صورت دایره ای کاشته شد. بر اساس نتایج تجزیه خاک، مقادیر کودهای نیتروژن و فسفر به خاک مورد آزمایش اضافه شدند. به عبارتی، به خاک هر گلدان حدود ۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم نیتروژن (به صورت کود اوره محلول در آب) و حدود ۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم اکسید فسفر (P_2O_5) (به صورت کود سوپرفسفات تریپل) اضافه و بلافاصله آبیاری انجام گردید. با توجه به نتایج آزمون خاک، کمبودی از نظر عناصر غذایی کم مصرف برای گیاهان ایجاد نگردید.

آبیاری گلدان ها تا پایان دوره رویشی در حد ظرفیت گلدانی انجام شد. جهت تعیین درصد رطوبت ظرفیت گلدانی، یک گلدان را با آب اشباع کرده و بعد اجازه داده شد تا در مدت ۴۸ ساعت زهکشی انجام شود. برای جلوگیری از تبخیر، سطح گلدان توسط نایلون پوشیده شد. با خروج آب ثقلی و زمانی که وزن گلدان ها ثابت شد، یک نمونه خاک از داخل گلدان برداشته و رطوبت آن تعیین شد. برای دوری از تنش رطوبتی، گلدان ها هر روز توزین و با فواصل کوتاه (بسته به دوره رشد گیاه) تا رسیدن به ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت گلدانی با آب مقطر آبیاری شدند.

در مرحله چهار برگه، تیمار سالیسیلیک اسید به صورت محلول پاشی تا خیس شدن کامل سطح برگ ها در سه مرحله و با فاصله ده روز یک بار تا شروع گلدهی گیاه صورت گرفت. در محلول، قطره توین (با غلظت ۰/۱ درصد) به عنوان سورفاکتانت، جهت جذب بهتر سالیسیلیک اسید اضافه شد. تیمار شاهد با آب مقطر اسپری گردید. پارامترهای گیاهی اندازه گیری شده در پایان دوره رویشی (قبل از شروع گلدهی گیاه) شامل تعیین قطر ساقه (توسط کولیس دیجیتالی) و ارتفاع گیاه (با خط کش)، وزن خشک بخش هوایی و ریشه ها (خشک شده در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت) و حجم ریشه هر گلدان (از طریق جابجایی حجم آب در یک استوانه مدرج) بودند.

همینطور غلظت سرب شاخساره با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل AA220 شرکت Varian استرالیا تعیین شد. برای این منظور، ۰/۵ گرم پودر خشک شاخساره را (با یک بوتله چینی) در کوره

جدول ۲- ویژگی های فیزیکی و شیمیایی بیوچار کلزای مورد استفاده

Table 2- Physical and chemical properties of the biochar used.

ظرفیت تبادل کاتیونی CEC ($\text{cmol}_e/\text{kg}^{-1}$)	کربن آلی OC (%)	منیزیم Mg (cmol_e/kg)	کلسیم Ca (cmol_e/kg)	پتاسیم K (cmol_e/kg)	سدیم Na (cmol_e/kg)	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)	pH	سطح ویژه Surface area (m^2/g)
82.8	29.3	7.51	63.6	2.34	3.91	5.5	8.9	26.4

آنجا که سرب کم تحرک‌ترین عنصر سنگین در خاک است و در لایه سطحی خاک تجمع می‌یابد، لذا به راحتی از طریق ریشه‌ها جذب و به بخش‌های هوایی گیاهان وارد می‌شود. وجود سرب در گیاهان، با افزایش فعالیت کلروفیلاز موجب تجزیه کلروفیل و یا کاهش تولید آن شده و با اختلال در فرایند فتوسنتز، باعث کاهش زیست‌توده بخش‌های هوایی و ریشه می‌شود (Parsa Doust *et al.*, 2007). از دیگر آثار سمیت سرب در گیاهان، تنش اکسیداتیو و جلوگیری از جذب مواد و عناصر غذایی است (Zhou *et al.*, 2018).

کم‌ترین غلظت سرب (۰/۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نیز در تیمار ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید، ۳ درصد وزنی بیوچار و شاهد سرب به‌دست آمد. به عبارتی، کاربرد سالیسیلیک اسید و بیوچار در خاک موجب کاهش مقدار سرب شاخساره آویشن گردیدند. تاثیر بیوچار و سالیسیلیک اسید در کاهش مقدار سرب اندام‌های هوایی مریم‌گلی توسط (Teymouri *et al.*, 2021) نیز گزارش شده است. بیوچار با جذب آلاینده‌های معدنی مثل فلزات سنگین، تحرک و زیست‌فراهمی آن‌ها را در خاک کاهش می‌دهد (Biria *et al.*, 2016). از طرفی، سالیسیلیک اسید به طور قابل توجهی، تجمع یون سرب را در گیاهان کاهش می‌دهد (Padash *et al.*, 2016). به عبارتی، سالیسیلیک اسید باعث بهبود عوارض سوء ناشی از جذب سرب در گیاهان می‌شود.

در پایان، تجزیه واریانس داده‌ها با نرم‌افزار SPSS-16 انجام شد. برای مقایسه میانگین‌ها نیز از آزمون چند دامنه‌ای دانکن (Duncan) در سطح آماری پنج درصد استفاده گردید.

نتایج و بحث

اثرات متقابل سالیسیلیک اسید، سرب نیترات و بیوچار بر

صفات بیوشیمیایی و مورفولوژیک بخش هوایی آویشن

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات متقابل سالیسیلیک اسید، سرب نیترات و بیوچار بر صفات بیوشیمیایی (غلظت سرب و مقادیر پرولین و قندهای محلول) بخش هوایی گیاه و ویژگی‌های مورفولوژیک (وزن خشک شاخساره و ارتفاع گیاه) معنادار بوده است ($P < 0.01$) (جدول ۳).

غلظت سرب شاخساره

بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین مقدار سرب شاخساره گیاه آویشن (۴/۸۳ میلی‌گرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمده است (جدول ۵). مشابه این نتیجه، (Feizi *et al.*, 2021) گزارش کرده‌اند که افزایش غلظت سرب در خاک، موجب بالارفتن مقدار سرب اندام‌های هوایی ریحان (*Ocimum basilicum* L.) شده است. از

جدول ۳- تجزیه واریانس ویژگی‌های بخش هوایی گیاه آویشن برای اثرات سالیسیلیک اسید، سرب و بیوچار

Table 3- Analysis of variance for effects of salisilic acid (SA), Pb, and biochar (BC) on characteristics of aerial parts of thyme

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	وزن خشک برگ Leaf dry weight	قندهای محلول Soluble sugars	پرولین Proline	سرب Pb
سالیسیلیک اسید Salisilic acid (A)	2	68.5*	206.8*	1.15*	184.5*	0.63*
سرب Pb (B)	2	87.9*	269.8*	1.26*	973.9**	30.9**
بیوچار Biocha (C)	2	89.1*	191.6*	5.24**	1098**	0.48*
A×B	4	56.9*	217.5**	1.01*	82.3 ^{ns}	2.3**
A×C	4	75.3**	159.2*	1.12*	25.5 ^{ns}	1.8**
B×C	4	81.1**	179.6*	0.95*	218.6**	4.8**
A×B×C	8	54.5**	211**	2.83**	153.9**	0.9**
خطا Error	54	18.23	51.6	0.32	45.8	0.13
ضریب تغییرات (CV) (%)	—	12.79	18.56	14.32	10.3	23.7

ns، * و ** به ترتیب عدم معناداری و معنادار بودن در سطح پنج و یک درصد را نشان می‌دهد.

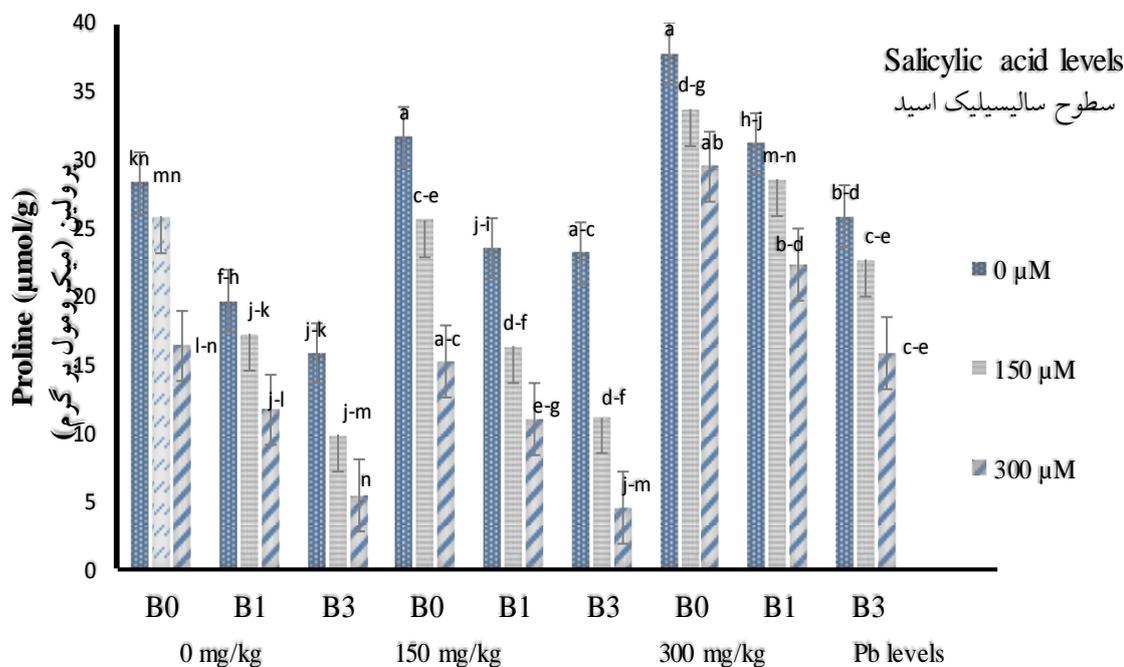
ns, **, * represent non-significant and significant at the probability levels of 1% 5%, respectively.

مقدار پرولین شاخساره

بیشترین میزان پرولین (۳۷/۸ میکرومول بر گرم) در تیمار ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم سرب، بدون بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد (شکل ۱). به عبارتی، تنش سرب موجب تولید و انباشت پرولین در بخش‌های هوایی گیاه شد. به عقیده *Rasheed et al., (2014)*، پرولین در گیاهان تحت تنش‌های محیطی و از جمله تنش فلزات سنگین، نقش آنتی اکسیدان داشته و به عنوان یک محافظ مولکولی، از فعالیت‌های مختلف آنزیمی محافظت می‌کند. بنابراین گیاهان برای افزایش تحمل تنش، تولید این اسید آمینه را افزایش می‌دهند. به عبارت دیگر، مهمترین اثر تخریبی سرب در گیاهان، القاء تنش‌های اکسیداتیو است که باعث تولید رادیکال‌های فعال اکسیژن می‌شود. گیاهان برای مقابله با این رادیکال‌های آزاد، از پرولین به عنوان یک آنتی اکسیدان غیرآنزیمی استفاده می‌کنند. پرولین با اتصال به سرب و تشکیل کمپلکس سرب-پرولین، موجب کاهش سمیت سرب در گیاه

می‌گردد (*Khan et al., 2016*).

کمترین میزان پرولین (۵/۴ میکرومول بر گرم) نیز در تیمار شاهد سرب، ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد. گزارش شده که در حضور سالیسیلیک اسید و بیوچار، میزان پرولین شاخساره گیاه ریحان در تیمارهای دارای سرب کاهش یافته است (*Feizi et al., 2021*). به عقیده *Padash et al., (2016)*، کاربرد سالیسیلیک اسید با بهبود شرایط تغذیه عناصر معدنی و یا فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیدانی، موجب برطرف شدن اثرات سمی سرب در گیاهان می‌شود. همچنین، به نظر می‌رسد که بیوچار با غیرمتحرک کردن عنصر سرب در خاک، از طریق تشکیل کمپلکس سرب با کربنات، سولفات و فسفات موجود در بیوچار، موجب کاهش اثرات منفی تنش سرب و کاهش تولید پرولین در گیاه می‌شود (*Park et al., 2013*).



B1, B2, B3 و B0 به ترتیب کاربرد بیوچار در سطوح ۱، ۰ و ۳ درصد وزنی

B1, B2 and B3 represent BC application at 0, 1 and 3% by weight.

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$)

شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات متقابل سرب، بیوچار و سالیسیلیک اسید بر مقدار پرولین گیاه آویشن

Figure 1- Mean comparisons of interaction effect of Pb, biochar (BC) and salicylic acid (SA) on proline content in thyme

قندهای محلول

بر اساس جدول مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین مقدار قندهای محلول شاخساره گیاه آویشن (۰/۴۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب، ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و شاهد بیوچار به دست آمده است (جدول ۴). مشابه این نتیجه، *Teymouri et al., (2021)* نیز گزارش کرده‌اند که افزایش سطوح سرب در خاک موجب بالارفتن مقدار قندهای محلول شاخساره ریحان شده است. به عقیده *Aldoobie and Beltagi (2013)*، حضور سرب در منطقه ریشه و ورود آن به گیاه، بر متابولیسم قندها اثر می‌گذارد. بنابراین، افزایش قندهای محلول در تنش فلزات سنگین، یک روش سازگاری گیاه جهت تنظیم پتانسیل آب سلول در بخش سیتوزول برای مقابله با غلظت بالای یون تجمع یافته در واکنش است (*Kocal et al., 2018*).

کم‌ترین میزان قندهای محلول (۰/۰۷ میلی‌گرم بر گرم) نیز در تیمار شاهد سرب و سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد. به عبارتی، در حضور بیوچار، میزان قندهای محلول اندام‌های هوایی آویشن در تیمارهای دارای سرب کاهش یافت. به عقیده *Teymouri et al., (2021)* با توجه به اینکه در شرایط کم آبی میزان قندهای محلول افزایش می‌یابد؛ بیوچار می‌تواند با بهبود شرایط خاک و افزایش رطوبت قابل دسترس خاک، محتوی نسبی آب برگ را افزایش دهد.

وزن خشک شاخساره

بر طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین وزن خشک شاخساره (۷/۳۹ گرم) در تیمار شاهد سرب، ۳۰۰ میکرومولار - سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد (جدول ۵). به عبارتی، با کاربرد سالیسیلیک اسید، زیست توده گیاهی افزایش پیدا کرد. گزارش شده که سالیسیلیک اسید با افزایش جذب CO_2 ، سرعت فتوسنتز در گیاهان را افزایش می‌دهد (*Hussain et al., 2007*). از طرف دیگر، بیوچار با بهبود شرایط جذب عناصر غذایی در شرایط تنش نیز باعث افزایش رشد عمومی گیاهان می‌گردد (*Khashei et al., 2019*).

کم‌ترین وزن خشک شاخساره (۵/۲۱ گرم) نیز در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد. به عبارتی، با افزایش میزان سرب خاک، به دلیل اثر بازدارندگی آن بر فعالیت‌های متابولیکی گیاه، زیست توده گیاهی کاهش پیدا کرد. به عقیده *Padash et al., (2016)* وجود سرب در محیط ریشه با کاهش جذب و انتقال آب و مواد غذایی یا کاهش فعالیت آنزیم‌ها، موجب کاهش فتوسنتز و در نتیجه کاهش رشد و پارامترهای آن می‌گردد. همچنین گزارش شده است که با افزایش غلظت سرب در

گیاه، میزان کلروفیل کاهش یافته که نمایانگر وسعت آسیب‌های اکسیداتیو است. با کاهش بیوسنتز کلروفیل، رشد عمومی و وزن خشک گیاه کاهش می‌یابد (*Nagajyoti et al., 2010*).

ارتفاع گیاه

بر طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین ارتفاع گیاه (۳۹/۶ سانتی‌متر) در تیمار شاهد سرب، ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد (جدول ۴). نتایج پژوهش *Padash et al., (2016)* نیز نشان داده که اثرات متقابل سرب و سالیسیلیک اسید بر ارتفاع بوته ریحان در سطح یک درصد معنی‌دار شده است. یعنی سالیسیلیک اسید کاهش رشد ناشی از فلز سرب را بهبود می‌بخشد. بنظر می‌رسد سالیسیلیک اسید جذب عناصر غذایی را در شرایط تنش بهبود داده که این خود افزایش رشد و ارتفاع گیاه را به همراه دارد (*Khan et al., 2015*). همچنین، گزارش شده که سالیسیلیک اسید با تأثیر بر فعالیت‌های آنزیمی و تولیدات فتوسنتزی، رشد گیاه گندم (*T. aestivum*) را بهبود و منجر به افزایش ارتفاع گیاه گردیده است (*Shakirova et al., 2003*). بیوچار نیز از راه افزایش جذب عناصر غذایی، توانایی سیستم فتوسنتزی و بدنبال آن رشد بیشتر گیاه را فراهم می‌سازد (*Khashei et al., 2019*). همچنین، کم‌ترین ارتفاع گیاه (۲۵/۴ سانتی‌متر) در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد. به عبارتی، سرب با تأثیر منفی بر فعالیت‌های رشدی، موجب کاهش ارتفاع گیاه شده است.

تأثیر متقابل سالیسیلیک اسید، سرب نیترات و بیوچار بر ویژگی‌های ریشه آویشن

نتایج تجزیه واپانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل تیمارها (سرب × سالیسیلیک اسید × بیوچار) بر وزن خشک، حجم ($P \leq 0.01$) و طول ریشه آویشن ($P < 0.05$) معنادار بوده است (جدول ۴).

وزن خشک ریشه

بر طبق نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیش‌ترین وزن خشک ریشه گیاه (۵/۲۱ گرم) در تیمار شاهد سرب، ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد (جدول ۵). *Feizi et al., (2021)* در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum L.*) و *Teymouri et al., (2021)* در گیاه مریم‌گلی (*Salvia officinalis L.*)، افزایش وزن خشک ریشه در شرایط کاربرد بیوچار را گزارش کرده‌اند.

جدول ۴- تجزیه واریانس ویژگی‌های ریشه گیاه آویشن برای اثرات سالیسیلیک اسید، سرب و بیوچار

Table 4- Analysis of variance for effects of salicylic acid (SA), biochar (BC) and Pb stress on root characteristics of thyme

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Df	طول ریشه Root length	حجم ریشه Root volume	وزن خشک ریشه Root dry weight
سالیسیلیک اسید Salicylic acid (A)	2	42.2 ^{ns}	119.2 ^{**}	1.35 ^{ns}
سرب Pb (B)	2	26.6 ^{ns}	960.9 ^{**}	8.5 ^{ns}
بیوچار Biocha (C)	2	12.5 ^{ns}	305.2 ^{**}	109.1 ^{**}
A×B	4	100.7 ^{**}	325.4 ^{**}	27.7 ^{**}
A×C	4	10.1 ^{ns}	98.3 ^{**}	15.2 [*]
B×C	4	38.2 ^{ns}	95.4 ^{**}	23.3 ^{**}
A×B×C	8	36.6 [*]	125.8 ^{**}	25.1 ^{**}
خطا Error	54	25.9	2.39	5.85
ضریب تغییرات (CV) (%)	-	8.8	9.6	13.8

ns, **, * به ترتیب عدم معناداری و معناداری در سطح پنج و یک درصد را نشان می دهد.

ns, **, * represent non-significant and significant at the probability levels of 1% 5%, respectively.

تقسیم سلولی در ناحیه مریستم ریشه است. البته بعضی محققین دیگر، دلیل افزایش طول و حجم ریشه گیاه در اثر کاربرد سالیسیلیک اسید را به تأثیر مثبت آن بر افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش رادیکال‌های آزاد نسبت داده‌اند (Gunes *et al.*, 2017).

کم‌ترین طول ریشه (۱۳/۹ سانتی‌متر) و حجم ریشه گیاه (۱۰/۳ سانتی‌متر مکعب) نیز در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد. فلزات سنگین و به ویژه سرب، با کاهش تقسیم سلولی موجب کاهش گسترش و طول شدن ریشه در خاک می‌شوند (Zhou *et al.*, 2018).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق، بیانگر اثرات مثبت سالیسیلیک اسید و بیوچار کلزا بر کلیه صفات رویشی مانند وزن خشک اندام‌های هوایی و ریشه آویشن، بویژه در شرایط تنش سرب بود. به عبارت دیگر، تنش سرب ضمن کاهش تمامی ویژگی‌های رویشی گیاه، موجب افزایش مقادیر پرولین و قندهای محلول بخش‌های هوایی گیاه آویشن گردید. در مجموع به نظر می‌رسد که در شرایط تنش سرب، تیمار گیاه آویشن با سالیسیلیک اسید (به عنوان یک تنظیم کننده رشد گیاه) و بیوچار (به عنوان یک ماده آلی با قابلیت ماندگاری بالا در خاک)، یک روش ساده و مناسب در راستای افزایش مقاومت گیاه در برابر تنش و کاهش عوارض ناشی از سمیت سرب بر رشد کلی گیاه دارویی آویشن باشد.

با توجه به ماهیت بیوچار، استفاده از آن با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و یا افزایش دسترسی عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن موجب افزایش پارامترهای رشدی گیاهان و در نتیجه وزن خشک ریشه می‌شود.

کم‌ترین وزن خشک ریشه (۳/۲۱ گرم) نیز در تیمار ۳۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب و شاهد بیوچار و سالیسیلیک اسید به دست آمد. Valizade *et al.* (2020) نیز کاهش وزن تازه و خشک ریشه گیاه کاهو (*Lactuca sativa* L.) در اثر افزایش مقدار سرب خاک را گزارش کرده‌اند. در واقع در شرایط تنش سرب، به علت کاهش فعالیت‌های آنزیمی و متابولیسم سلولی، در نتیجه آن کاهش زیست‌توده و از جمله کاهش وزن خشک ریشه رخ می‌دهد (Nie *et al.*, 2018). همینطور، از جمله آثار منفی فلزات سنگین بر رشد گیاهان، کاهش مقدار هورمون‌های گیاهی، به ویژه ستوکینین است که نقش اصلی در تقسیم سلولی و رشد گیاه دارد (Jiang *et al.*, 2014).

طول و حجم ریشه

بیش‌ترین طول (۴۷/۴ سانتی‌متر) و حجم ریشه گیاه (۷۰/۵ سانتی‌متر مکعب) در تیمار شاهد سرب، ۳۰۰ میکرومولار سالیسیلیک اسید و ۳ درصد وزنی بیوچار به دست آمد (جدول ۵). Maasoumi (2016) نیز اشاره نموده‌اند که استفاده از سالیسیلیک اسید بر حجم، قطر، وزن و طول ریشه گیاه ماش (*Vigna radiate* L.) اثر افزایشی داشته و این نتیجه به دلیل تأثیر سالیسیلیک اسید بر

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های بخش هوایی و ریشه گیاه آویشن برای اثر برهمکنش سالیسیلیک اسید، بیوجار و سرب نیترات

Table 5- Mean comparisons of interaction effects of salicylic acid (SA), biochar (BC) and Pb stress on characteristics of

thyme									
سطوح بیوجار BC level (%)	سطوح سالیسیلیک اسید SA level ($\mu\text{mol/l}$)	سطوح سرب Pb level (mg/kg)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g/pot)	طول ریشه Rroot length (cm/pot)	حجم ریشه Rroot volume cm ³ /pot(وزن خشک برگ Leaf dry weight (g/pot)	ارتفاع گیاه Plant height)cm/pot(قندهای محلول Soluble sugars)mg/kg(غلظت سرب Pb concentration (mg/kg)
		0	3.53 ^{ab}	23.4 ^{h-k}	27.7 ^{d-f}	5.66 ^{bcd}	30.1 ^{abc}	0.25 ^{a-d}	1.3 ^{i-m}
	0	150	3.36 ^b	20.6 ^k	17.5 ^{mn}	5.22 ^{cd}	27.3 ^{bc}	0.33 ^{abc}	3.26 ^{bc}
		300	3.21 ^b	13.9 ^l	10.3 ⁿ	5.09 ^d	25.4 ^c	0.34 ^{abc}	4.83 ^a
		0	3.76 ^{ab}	26.9 ^{e-i}	40 ^{e-k}	5.87 ^{a-d}	30.8 ^{abc}	0.32 ^{abc}	0.96 ^{j-m}
	150	150	3.53 ^{ab}	21.7 ^{jk}	37.5 ^{f-k}	5.25 ^{bcd}	39.2 ^{abc}	0.32 ^{abc}	2.92 ^{cd}
		300	3.4 ^{ab}	20.5 ^k	29.4 ^{j-m}	5.23 ^d	26.0 ^{bc}	0.41 ^{ab}	3.88 ^b
		0	4.01 ^{ab}	30.6 ^{c-e}	57.5 ^{a-d}	6.42 ^{a-d}	31.6 ^{abc}	0.30 ^{abc}	0.79 ^{klm}
	300	150	3.71 ^{ab}	23.4 ^{h-k}	43.2 ^{d-k}	6.31 ^{a-d}	31.4 ^{abc}	0.40 ^{ab}	2.31 ^{d-g}
		300	3.51 ^{ab}	21.6 ^{jk}	33.1 ^{h-m}	5.61 ^{a-d}	30.3 ^{abc}	0.46 ^a	3.31 ^{bc}
		0	3.63 ^{ab}	25.1 ^{f-j}	36 ^{g-l}	5.56 ^{a-d}	32.6 ^{abc}	0.14 ^{bcd}	0.89 ^{j-m}
	0	150	3.46 ^{ab}	22.4 ^{ijk}	30 ^{i-m}	5.45 ^{bcd}	28.6 ^{bc}	0.21 ^{a-d}	2.92 ^{cd}
		300	3.3 ^b	22 ^k	20.5 ^{lmn}	5.44 ^{bcd}	26.7 ^{bc}	0.29 ^{abc}	3.91 ^{ab}
		0	4.16 ^{ab}	27.8 ^{e-i}	60.5 ^{abc}	6.41 ^{a-d}	35.6 ^{abc}	0.22 ^{a-d}	0.72 ^{lm}
	150	150	4.04 ^{ab}	24.5 ^{h-k}	48.7 ^{c-h}	6.08 ^{a-d}	34.1 ^{abc}	0.31 ^{a-d}	2.11 ^{e-h}
		300	3.75 ^{ab}	21.5 ^{jk}	35.1 ^{g-l}	5.84 ^{a-d}	27.5 ^{bc}	0.38 ^{abc}	2.62 ^{de}
		0	4.62 ^{ab}	32.2 ^c	67 ^{ab}	6.45 ^{a-d}	29 ^{ab}	0.20 ^{a-d}	0.56 ^m
	300	150	4.29 ^{ab}	31.9 ^{cd}	50.2 ^{c-g}	6.05 ^{a-d}	36.2 ^{abc}	0.31 ^{a-d}	1.74 ^{f-j}
		300	3.93 ^{ab}	28.4 ^{c-g}	45 ^{e-j}	5.91 ^{a-d}	38.6 ^{abc}	0.43 ^{ab}	2.22 ^{d-g}
		0	4.65 ^{ab}	26.2 ^{e-i}	53.5 ^{b-f}	6.58 ^{a-d}	33.4 ^{abc}	0.07 ^d	0.86 ^{klm}
	0	150	4.38 ^{ab}	24.7 ^{g-k}	40.4 ^{e-k}	6.22 ^{a-d}	35.7 ^{abc}	0.22 ^{a-d}	2.36 ^{d-g}
		300	4.06 ^{ab}	22.9 ^{ijk}	31.5 ^{h-m}	5.91 ^{a-d}	30.4 ^{bc}	0.32 ^{abc}	2.47 ^{def}
		0	4.98 ^{ab}	38.4 ^b	62.1 ^{abc}	6.67 ^{ab}	30.2 ^{ab}	0.21 ^{a-d}	0.83 ^{lm}
	3	150	4.04 ^{ab}	30.1 ^{cde}	54.2 ^{a-e}	6.56 ^{a-d}	33.6 ^{abc}	0.31 ^{a-d}	1.46 ^{h-l}
		300	3.85 ^{ab}	27.4 ^{d-h}	35.4 ^{g-l}	6.38 ^{a-d}	28.2 ^{bc}	0.36 ^{abc}	1.91 ^{e-i}
		0	5.43 ^a	47.4 ^a	70.5 ^a	7.26 ^a	39.6 ^a	0.16 ^{a-d}	0.63 ^{g-k}
	300	150	4.99 ^{ab}	33 ^c	59 ^{a-d}	6.48 ^{abc}	30.3 ^{ab}	0.21 ^{a-d}	1.51 ^{g-k}
		300	4.33 ^{ab}	29.8 ^{c-f}	47.5 ^{c-i}	6.23 ^{a-d}	34.4 ^{abc}	0.30 ^{a-d}	2.46 ^{d-g}

در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند بر اساس آزمون دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنادار ندارند.

In each column, numbers with similar letters are not significantly different (Duncan's test, $p < 0.05$)

منابع

- Ahmad M., Lee S., Dou X., Mohan D., Sung J., Yang J.E., and Ok Y.S. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology* 118: 536-544. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>.
- Aldoobie N.F., and Beltagi M.S. 2013. Physiological, biochemical and molecular responses of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plants to heavy metals stress. *African Journal of Biotechnology* 12(29): 4614-4622. <https://doi.org/10.36808/af/2019/v145i2/144288>.
- Allison L.E., and Moodie C.D. 1965. Carbonate, Black Methods of soil analyses. P 1379-1396.
- Barraza F., Montero V., Wong-Benito H., Valenzuela C., Godoy-Guzmán F., Guzmán B., Köllner T., Wang C.J., Secombes and Maisey K. 2021. Revisiting the teleost thymus: Current knowledge and future perspectives. *Biology* 10: 8-18. <https://doi.org/10.3390/biology10010008>.
- Bates L.S., Waldren R.P., and Teare I.D. 1973. Rapid determination of free proline for water stress studies. *Plant and Soil* 29: 205-207. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00018060>.
- Biria, M., Moezzi A., and Amirikhah H. 2016. Effect of Sugarcane bagasse biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soils. *Journal of Water and Soil* 31(2): 609-626.

7. Bouyoucos C.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle-size analysis of soil. *Agronomy Journal* 54(5): 464-465.
8. Carter S., Shackley S., Sohi T., Suy T., and Haefele S. 2013. The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lactuca sativa*) and cabbage (*Brassica chinensis*). *Agronomy* 3(2): 404-418. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020404>.
9. Dubois D., Gilleres K.A., and Hamilton J.K. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry* 28:350-356.
10. Feizi K., Amirinejad A., and Ghobadi M. 2021. The effects of biochar and salicylic acid on reducing Pb-induced stress in basil crop (*Ocimum basilicum* L.). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(2): 539-547. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.313282.668795>.
11. Gunes A., Inal A., Alpaslan M., Eraslan F., Bagci E.G., and Cicek N. 2017. Salicylic acid induced changes on some physiological parameters symptomatic for oxidative stress and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.) grown under salinity. *Journal of Plant Physiology* 194(3): 728-736. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.12.009>.
12. Hussain I., Siddique A., Ashraf M., Rasheed R., Ibrahim M., Iqbal M., Akbar S., and Imran M. 2007. Does exogenous application of ascorbic acid modulate growth, photosynthetic pigments and oxidative defense in okra (*Abelmos chusesculentus* L.) under lead stress? *Acta Physiologiae Plantarum* 39: 144-151. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2439-0>.
13. Jiang X.J., Luo Y.M., Liu Q., Liu S.L., and Zhao Q.G. 2014. Effects of lead on nutrient uptake and translocation by Indian mustard. *Environmental Geochemistry and Health* 26(2): 319-324. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-32714>.
14. Khan I., Iqbal M., Ashraf M.Y., Ashraf M.A., and Ali S. 2016. Organic chelates-mediated enhanced lead (Pb) uptake and accumulation is associated with higher activity of enzymatic antioxidants in spinach (*Spinace aoleracea* L.). *Journal of Hazardous Materials* 317: 352-361. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.007>.
15. Khan M.I., Fatma M., Per T.S., Anjum N., and Khan A. 2015. Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science* 6: 462-770. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>.
16. Khasheim A., Shahidi A., Yaghoobzadeh M., and Dastourani M. 2019. Effect of biochar application and water tensin levels on yield and yield components of medicinal plant (*Trachyspermum ammi*). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(13): 319-328. (In Persian with English abstract)
17. Klute A. 1986. *Methods of Soil Analysis: Part 1 and 2. Physical and Chemical Methods*, Second Edition. Soil Science Society of America, Inc.
18. Kocal N., Sonnewald U., and Sonnewald S. 2018. Cell wall-bound invertase limits sucrose export and is involved in symptom development and inhibition of photosynthesis during compatible interaction in tomato. *Plant Physiology* 148: 1523-36. <https://doi.org/10.1104/pp.108.127977>.
19. Leng L., Xiong Q., Yang L., Li H., Zhou Y., Zhang W., Jiang S., Li H., and Huang H. 2021. An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of Total Environment* 763: 144-204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>.
20. Maasoumi G., Lahouti M., and Mahmoodzadeh H. 2016. Effect of combined application of salicylic acid and zinc on germination indices and vegetative growth of mung bean. *Crop Physiology Journal* 8(30):121-133.
21. Mehdimiri S., Ahmadi S., and Moradi P. 2015. Influence of salicylic acid and citric acid on the growth, biochemical characteristics and essential oil content of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Journal of Medicinal Plants and By-Products* 2: 141-146.
22. Metwally A., Finkemeier I., Georgi M., and Dietz K.J. 2015. Salicylic acid alleviates the cadmium toxicity in barley seedling. *Plant Physiology* 132: 272-281. <https://doi.org/10.1104/pp.102.018457>.
23. Nagajyoti P.C., Lee K.D., and Sreekanth T.V. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters* 8(3): 199-216. <https://doi.org/10.1007/S10311-010-0297-8>.
24. Nie C., Yang X., Niazi N.K., Xu X., Wen Y., Rinklebe J., and Wang H. 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: a field study. *Chemosphere* 200: 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.134>.
25. Omidbeigi R. 2010. *Production and Processing of Medicinal Plants* (4th Ed). Astan Ghods Razavi Publications.pp:93.
26. Padash A., Ghanbari A., and Asgharipour M.R. 2016. Effect of salicylic acid on concentration of nutrients, protein and antioxidant enzymes of basil under lead stress. *Iranian Journal of Plant Biology* 8(27): 17-32. (In Persian)
27. Park J.H., Choppala G. Lee S.J., Bolan N., Chung J.W., and Edraki M. 2013. Comparative sorption of Pb and Cd by biochars and its implication for metal immobilization in soils. *Water, Air and Soil Pollution* 224: 1-12. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1711-1>.
28. Parsa Doust F., Bahreininejad B., Safari Sanjani A.K., and Kaboli M.M. 2007. Phytoremediation of lead with native rangeland plants in Irankoh polluted soils. *Pajouhesh & Sazandegi* 75: 54-63. (In Persian with English abstract)
29. Piķula D., and Stepień W. 2021. Effect of the degree of soil contamination with heavy metals on their mobility in the soil profile in a microplot experiment. *Agronomy* 11: 878-880. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050878>.
30. Rasheed R., Ashraf M.A., Hussain I., Haider M.Z., Kanwal U., and Iqbal M. 2014. Exogenous proline and glycine

- betaine mitigate cadmium stress in two genetically different spring wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Brazilian Journal of Botany 37: 399-406. <https://doi.org/10.1007/s40415-014-0089-7>.
31. Shakirova F., Sakhabutdinova A., Bezrukova M.V., Fatkhutdinova R.A., and Fatkhutdinova D.R. 2003. Changes in the hormonal status of wheat seedlings induced by salicylic acid and salinity. Journal of Plant Science 164(3): 317-322. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00415-6](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00415-6).
32. Sharma P., and Dubey R.S. 2005. Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology 17(1): 35-52. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202005000100004>.
33. Teymouri A., Amirinejad A., and Ghobadi M. 2021. The effects of biochar and salicylic acid on alleviation of Pb stress in salvia (*Salvia officinalis* L.). Journal of Soil and Plant Interactions 12(1): 95-108. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jspi.12.1.20161>.
34. Valizadeh Ghale Beig A., Nemati S.H., Emami H., and Aroiee H. 2020. The Effect of Cutflower-Rose Waste Biochar on Morphological Traits and Heavy Metals in Lettuce (*Lactuca sativa* L.). Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture 10(4): 21-35. (In Persian with English abstract)
35. Walkley A., and Black I.A. 1934. Examination of the degtjareff method determining soil organic matter and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38.
36. Wang Z., Shen D., Wu C., and Gu S. 2018. State-of-the-art on the production and application of carbon nanomaterial from biomass. Green Chemistry 20: 5031-5057. <https://doi.org/10.1039/c8gc01748d>.
37. Zhou J., Zhang Z., Zhang Y., Wei Y., and Jiang Z. 2018. Effects of lead stress on the growth, physiology, and cellular structure of privet seedlings. PloS one 13(3): 137-140. <https://doi.org/10.1371/journal.0191139>.



The Effect of Mycorrhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond (*Prunus dulcis* Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition

M. Mohammadi^{1*}

Received: 11-11-2021

Revised: 22-11-2021

Accepted: 07-03-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:Mohammadi M. 2022. The Effect of Mycorrhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond (*Prunus dulcis* Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition. Journal of Water and Soil 36(1): 81-94. (In Persian with English abstract)DOI: [10.22067/jsw.2022.73354.1110](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73354.1110)

Introduction

Almond (*Prunus dulcis* Mill.), native to West Asia to the Mediterranean. Iran after the United States and Spain has been ranked third among this plant production across the world. Drought stress is one of the most important factors limiting the yield and production of agricultural products. Many morphological, physiological, enzymatic, nutritional, quantitative and qualitative characteristics of almonds can be impaired by drought stress. There are a lot of micro-organisms in soil which can help the plant nutrition and uptake of nutrient elements through different ways and can be mentioned by the dual symbiotic relation between micro-organism and plant. Mycorrhizae fungi are one of these microorganisms. The most important beneficial effects of mycorrhizal symbiosis is increasing the nutrient uptake, leaf gas exchange, photosynthesis, water use efficiency, productivity, improve plant nutrition and resistance to environmental stresses. It also helps the plant to absorb more water and nutrients by modification of rhizosphere environment, improvement of soil structure through formation of stable aggregates, expansion of external filaments and change of root morphology. The results of mycorrhizae symbiosis research in different plants show that the higher uptake of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), iron (Fe), zinc (Zn), copper (Cu) and manganese (Mn). The aim of this study was to evaluate the ability of mycorrhizal fungi, a symbiotic and environmentally friendly agent, under drought stress condition on increasing growth and absorption of water and nutrients on almond rootstocks commonly consumed in Chaharmahal-va-Bakhtiari province.

Material and Methods

This field experiment was carried out as a factorial based on a randomized complete block design (RCBD) with three replications. The treatments consist of two level of mycorrhizal fungus (M_0 : without and M_1 with using of mycorrhizal fungus), four kinds of rootstock (bitter, local Shorab 2, GF and GN) and four levels of drought stress (without stress as a control, slight, moderate and severe water stress which based on ratio of depletion of plant available water). Inoculation of mycorrhizal fungi at the rate of 100 g of a mixture of three species of mycorrhizal fungi (*Clariodeoglumus etunicatum*, *Rhizophagus intraradices* and *Funneliformis mosseae*) was placed under the roots for each rootstock with a population of at least 100 active fungal organs including spores, vesicles, and hyphae per gram. The plants were exposed to drought stress for six weeks. Leaf samples were taken to measure the amount of nutrient elements. Nitrogen by Kjeldahl method, P by spectrophotometer, K by flame method with flame photometer and nutrients of iron, zinc, manganese, boron and copper were measured by atomic absorption spectrophotometry with an atomic absorption spectrometer (PerkinElmer Analyst 400, Waltham, United States of America). Statistical analysis was done with SAS 9.3 statistical software. Duncan's multiple range test was used to separate means.

Results and Discussion

1- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Chaharmahal and Bakhtiari Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shahrekord, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.mohamadi@areo.ac.ir)

The results revealed that there were significant differences between four cultivars in terms of nutrient concentrations except B. The maximum amounts of the studied characteristics were obtained from GF rootstock. The GN rootstock was in the second ranking. Water deficient treatment showed a significant effect on the examined nutrient elements except Mn and Cu concentrations. The maximum amounts of measured nutrient elements, except K, were obtained from I₁ treatment. The highest rate of K was obtained from I₃ and I₄ treatments. With increasing drought stress the decreasing trend of nutrient elements, except K was observed. Mycorrhizae fungi treatment increased nutrient elements except B. The maximum amounts of N, P, Fe and Zn were obtained from GF + I₁. Using of mycorrhizae fungi in drought treatments caused significant increase in N, K, Fe, Mn and B. The maximum amount of nutrients was obtained from GF + M₁ treatment. The maximum amounts of N, Fe and B were obtained from I₁ + M₁ + GN. Inoculation of mycorrhizae fungi caused higher rootstock growth under drought stress. The change in the shape, volume and number of root branches of the root caused by the consumption of mycorrhizae fungi was due to increased nutrient uptake and changes in the amount of plant hormones such as auxin. Growth and absorption of water and nutrients decreased under water deficient stress. Therefore, the effect of symbiosis with mycorrhizae fungi under water deficient stress conditions was more important than non-stress conditions. This has been reported in the research of various researchers.

Conclusion

The results of this study showed that with increasing water deficient stress, the amount of nutrient elements decreased except K. The importance of GF rootstock to mycorrhizae fungi inoculation was higher due to higher growth potential and root velocity. Nutrients that were measured in inoculated rootstocks were higher than those without inoculation. Under drought stress conditions, the amount of nutrients measured was higher in inoculated rootstocks. Inoculation of mycorrhizal fungi can lead to increase nutrients absorption with some mechanisms such as effective increase in root uptake, root length, number of lateral roots, proton production, and secretion of organic acids, siderophores, chelating compounds, and acid phosphates. Consumption of mycorrhizae fungi increased nutrient uptake and improved almond rootstock resistance to drought stress.

Keywords: Almond (*Prunus amygdalus*), GF rootstock, Nitrogen, Phosphorus, Zinc

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۸۱-۹۴

تأثیر همزیستی میکوریزی بر میزان عناصر غذایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی

محمود محمدی^{*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

چکیده

تنش خشکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده عملکرد و تولید محصولات کشاورزی می‌باشد. قارچ‌های میکوریز آریسکولار در فراهم کردن جذب آب و مواد غذایی و افزایش تحمل گیاهان به خشکی به نفع میزبان خود عمل می‌کنند. به منظور بررسی تأثیر قارچ‌های میکوریزی بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی پایه‌های متداول بادام در شرایط تنش خشکی آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی شهرکرد اجرا شد. فاکتورهای این آزمایش شامل فاکتور اول، قارچ میکوریز در دو سطح M_0 : شاهد بدون مصرف و M_1 : مصرف قارچ میکوریزی، فاکتور دوم پایه‌های بادام در چهار سطح (GF، GN، محلی شوراب ۲ و تلخ) و فاکتور سوم تنش خشکی در چهار سطح (I_1 : بدون تنش، I_2 : ۲۰، I_3 : ۴۰ و I_4 : ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده گیاه بودند. نتایج نشان داد حداکثر مقادیر عناصر غذایی از پایه GF حاصل شد. با افزایش تنش خشکی روند کاهش در میزان عناصر غذایی به جز پتاسیم مشاهده شد. تلقیح قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش میزان عناصر غذایی به غیر از بور شد. حداکثر میزان نیتروژن، فسفر، آهن، روی و بور از تیمار $GF+I_1$ حاصل شد. کاربرد قارچ‌های میکوریزی در تیمارهای تنش در پایه‌های مورد بررسی باعث افزایش معنی‌دار نیتروژن، پتاسیم، آهن، منگنز و بور شد. حداکثر میزان این عناصر غذایی از تیمار $GF+M_1$ حاصل شد. حداکثر میزان نیتروژن، آهن و بور از تیمار I_1+M_1+GN حاصل شد. تلقیح قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش میزان عناصر غذایی در شرایط تنش خشکی شد.

واژه‌های کلیدی: بادام، پایه GF، تنش خشکی، فسفر، نیتروژن

مقدمه

بادام (*Prunus dalcis* (Miller) D. webb)، بومی مناطق غرب آسیا تا حوزه دریای مدیترانه بوده و کشور ایران دارای رتبه سوم سطح زیر کشت درختان سردسیری پس از آمریکا و اسپانیا در جهان می‌باشد (Tehranifar et al., 2004). تعدادی از ریز جانداران در خاک وجود دارند که برآیند اثرات متقابلشان با محیط خاک و ریشه موجب افزایش جذب عناصر غذایی، افزایش عملکرد، تعدیل اثرات نامطلوب انواع تنش‌ها، بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش مقاومت در برابر آفات و بیماری‌ها می‌گردند. از جمله این ریز جانداران قارچ‌های

میکوریزا و همزیستی این قارچ‌های خاکزی با ریشه گیاهان است (Rejali, 2017; Smith and Read, 2010). در تمامی گیاهان و به‌ویژه درختان میوه که از تراکم ریشه‌ای کمتری برخوردار می‌باشند سیستم ریشه‌ای به‌عنوان اصلی‌ترین کانال جذب آب و عناصر غذایی در بخش تغذیه گیاهان محسوب می‌گردد. در این میان استفاده از قارچ‌های میکوریزی همزیست با ریشه گیاهان از راه‌کارهای علمی و عملی برای رسیدن به تغذیه مطلوب می‌باشد (Rejali, 2017; Mishra et al., 2010). استفاده از همزیستی میکوریزی، افزایش رشد بالاخص در مراحل اولیه رشد در نهالستان‌ها و متعاقب آن در باغ‌ها را به‌دنبال خواهد داشت (Brundrett et al., 1996). از مهمترین اثرات مثبت همزیستی میکوریزی می‌توان به افزایش جذب عناصر غذایی، بهبود تغذیه گیاه، افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب و مقاومت گیاه در مقابل تنش‌های محیطی مانند خشکی و شوری اشاره نمود (Amirabadi et al., 2009; Artusson et al., 2006; Smith and Read, 2010). همچنین قارچ‌های میکوریزی با ایجاد

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شهرکرد، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: m.mohamadi@areeo.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2022.73354.1110

هشت گونه متفاوت از میکوریزا با چهار گونه پسته باعث افزایش رشد رویشی و جذب عناصر فسفر و روی در گیاهان همزیست با میکوریزا نسبت به شاهد غیرمیکوریزی می‌شود. نتایج تحقیقات حقیقت‌نیا و همکاران (Haghighatnia et al., 2011) نشان داد تلقیح قارچ‌های میکوریزی با پایه مرکبات ولکامرانیا به‌ویژه تلقیح گیاه با گونه *Rhizophagus intraradices* به‌واسطه تأثیر مثبت بر پارامترهای مورفولوژیک، جذب عناصر غذایی (پتاسیم، فسفر و کلسیم)، مقدار کلروفیل و رطوبت نسبی آب برگ تحت شرایط تنش خشکی، سبب اصلاح مقاومت به تنش خشکی شده است. با عنایت به تأثیر الگوی سیستم ریشه‌ای و صفات رشدی بر میزان جذب آب و مواد غذایی این پژوهش با هدف بررسی توانایی قارچ‌های میکوریزی به عنوان عامل همزیست و سازگار با طبیعت در افزایش رشد، جذب آب و مواد غذایی و افزایش مقاومت به خشکی بر روی پایه‌های بادام متداول مصرفی در استان چهارمحال و بختیاری با خصوصیات رشدی و ریشه‌ای متفاوت انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌ها کامل تصادفی در سه تکرار و سه گیاه در هر واحد آزمایشی در سال ۱۳۹۷ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی شهرکرد انجام شد. فاکتورهای آزمایشی عبارت بودند از فاکتور اول، قارچ میکوریزا در دو سطح شامل M₀: بدون مصرف قارچ میکوریزی به‌عنوان شاهد و M₁: مصرف قارچ میکوریزی، فاکتور دوم پایه بادام در چهار سطح (GN، GF، محلی شوراب ۲ و تلخ) و فاکتور سوم تنش خشکی در چهار سطح (I₁: بدون تنش به‌عنوان شاهد، I₂: تنش ۲۰ درصد، I₃: تنش ۴۰ درصد و I₄: تنش ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل استفاده گیاه). در این بررسی بعد از نمونه‌برداری مقدماتی ابتدا مقدار خاک کافی با میزان فسفر قابل جذب پائین به محل آزمایش انتقال داده شد و مراحل آماده‌سازی بر روی آن اعمال و خصوصیات فیزیکی‌شیمیایی آن اندازه‌گیری شد (جدول ۱) (Emami, 1996). برای تهیه پایه‌های بادام تلخ ابتدا تعداد کافی بذر بادام تلخ تهیه و پس از اعمال سرمادهی در اسفند ماه ۹۶ با مساعد شدن هوا، بذرهای جوانه‌دار شده به گلدان‌های پلاستیکی دو کیلوگرمی انتقال داده شدند و مراقبت لازم از آنها به مدت سه ماه تا مرحله استقرار ریشه و رشد نهال و انتقال پایه‌های بذری بادام به گلدان‌های ۱۳ لیتری انجام شد. برای تهیه پایه‌های رویشی GF و GN نیز از طریق ریشه‌دار نمودن قلمه‌های آنها در بستر کشت استریل ترکیب پرلیت + ماسه (۱:۱) که محیط خنثی و فاقد خاک می باشد انجام شد.

تبادل نسبی در جذب فسفر و نیتروژن می‌تواند از اثرات بازدارندگی و رقابتی آنها در جذب عناصر کم مصرف کاسته و به ایجاد تغذیه متبادل گیاهی کمک کنند (Mishra et al., 2010; Chen et al., 2005).

تنش خشکی باعث کاهش تعداد تارهای کشنده ریشه شده و بر مورفولوژی ریشه و انشعابات ریشه صدمه وارد می‌نماید که در نتیجه آن جذب عناصر غذایی بوسیله سیستم ریشه‌ای کاهش می‌یابد. در این زمان هیف‌های قارچ‌های میکوریز می‌توانند به عنوان ادامه سیستم ریشه‌ای گیاه میزبان به جذب عناصر غذایی کمک نمایند (Tehranifar et al., 2004; Ortas et al., 2015). بررسی‌های وو و زو (Wu and Zou, 2011) نشان می‌دهد که در شرایط تنش خشکی نقش قارچ‌های میکوریزی مهمتر از شرایط بدون تنش است. بررسی‌های آقابابایی و همکاران (Aghababaei et al., 2011) بر روی رقم‌های مختلف بادام نشان داد که همزیستی میکوریزی منجر به افزایش غلظت و جذب فسفر و روی شده است. اما غلظت نیتروژن، آهن و منگنز در اندام هوایی کاهش یافته و بر جذب پتاسیم و مس اثر مثبتی نداشته است. پژوهش‌های وو و همکاران (Wu et al., 2009) نشان داد تلقیح قارچ‌های میکوریزی *Glomus versiforme*، *Glomus mosseae* و *Paraglomus occultum* در هلو منجر به افزایش جذب عناصر غذایی فسفر، آهن، روی، کلسیم و منیزیم در اندام هوایی شده است ولی جذب عناصر مس و منگنز روند کاهشی را نشان داده است. نتایج تحقیقات کالوت و همکاران (Calvert et al., 2004) نشان داد تلقیح پایه دورگ هلو- بادام (GF677) با قارچ‌های میکوریزی تأثیری بر غلظت نیتروژن گیاه نداشته ولی غلظت پتاسیم را در شرایط تنش آلودگی‌های نماتدی افزایش داد. زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013) گزارش نمودند میزان وزن خشک ریشه و اندام هوایی، جذب فسفر، نیتروژن، آهن، منگنز، مس و روی در اندام هوایی و درصد کلینیزاسیون ریشه پایه نارنج تلقیح شده با قارچ میکوریزی نسبت به پایه غیرمیکوریزی در شرایط تنش کم‌آبی، بالاتر بود. ژبامینگ و همکاران (Xueming et al., 2007) به بررسی همزیستی قارچ‌های میکوریزی بر روی قلمه‌های آلو پرداخت و گزارش نمود جذب عناصر غذایی فسفر، پتاسیم، منگنز و روی افزایش یافت و گونه‌های *Glomus etunicatum* و *Glomus mosseae* بیشترین تأثیر را داشتند. تحقیقات رازوک و کاجی (Razouk and Kajji, 2015) در خصوص تلقیح قارچ‌های میکوریزی گونه *Glomus intraradices* و *Glomus mosseae* بر روی چهار رقم آلو (*Prunus domestica*) در شرایط تنش خشکی نشان داد که تلقیح باعث افزایش جذب فسفر، پتاسیم، روی و آهن شده است. بررسی‌های کفکاس و ابراهیم (Kafkas and Ibrahim, 2009) نشان داد تلقیح

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Soil chemical and physical characteristics of the research site

رطوبت PWP	رطوبت FC	شن	سیلت	رس	مواد خنثی شونده TNV (%)	کربن آلی OC	نیترژن N	مس	منگنز	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)
PWP	FC	Silt	Sand	Clay	TNV (%)	OC	N	Cu	Mn	Zn	Fe	K	P		EC
15.6	33.5	20	54	26	24.5	0.92	0.07	0.9	8.9	0.58	4.1	311	6	7.8	0.88

قرار داده شدند. نمونه اندام هوایی برای اندازه‌گیری میزان عناصر غذایی برداشت شد و پس از آسیاب کردن آن‌ها و انجام مرحله هضم تر در لوله‌های مخصوص با سولفوریک اسید، سالیسیک اسید، آب اکسیژنه، نیترژن به روش تیتراسیون بعد از تقطیر با استفاده از دستگاه کج‌لدال (Gerhardt, Germany)، فسفر به روش فسفر در محلول به طریق رنگ‌سنجی (رنگ زرد آمونیم مولیبدات وانادات) با دستگاه اسپکتروفتومتر (3100, Tokyo, Japan UV Shimadzu) در طول موج ۴۷۰ نانومتر، پتاسیم به روش شعله‌سنجی با دستگاه فلیم‌فتومتر (Jenway PFP7, Sherwood Scientific, Cambridge, United Kingdom) و عناصر غذایی آهن، روی، منگنز و مس با روش هضم خشک با کلریدریک اسید در حرارت ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با دستگاه جذب اتمی (PerkinElmer Analyst 400, Waltham, United States of America) اندازه‌گیری شد (Emami, 1996). داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS 9.3 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر تیمارهای آزمایش بر میزان عناصر غذایی اندام

هوایی

عناصر غذایی نیترژن، فسفر و پتاسیم

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی و قارچ میکوریزا بر میزان این عناصر غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان نیترژن، فسفر و پتاسیم به ترتیب به میزان ۳/۱، ۰/۲۶ و ۱/۵۳ درصد از پایه GF حاصل شد. در خصوص تیمارهای تنش خشکی با افزایش شدت تنش میزان عناصر غذایی نیترژن و فسفر اندام هوایی روند کاهشی را نشان دادند.

حداکثر میزان نیترژن و فسفر از تیمار II حاصل شد که در مقایسه با تیمار I4 به ترتیب افزایش ۱۰ و ۲۶ درصدی نشان داد. در خصوص پتاسیم با افزایش شدت تنش خشکی میزان این عنصر غذایی افزایش نشان داد. به گونه‌ای که حداکثر میزان پتاسیم اندام هوایی از تیمار I4 حاصل شد که نسبت به تیمار II افزایش ۱۸

پس از ریشه‌دار شدن، نسبت به تلقیح آنها با قارچ‌های میکوریزا اقدام شد. در ادامه قلمه‌های سه ماهه پایه‌های GF677 (هیبرید هلو و بادام)، GN 15 (هیبرید هلو و بادام) و پایه بومی شوراب ۲ (هیبرید دیر گل هلو و بادام شاهرود ۱۶) از نهالستان‌های سطح منطقه به گلخانه انتقال داده شد. سپس مراحل پر کردن خاک در گلدان‌های ۱۳ لیتری انجام شد و پایه‌های مورد آزمایش به گلدان‌ها انتقال و آبیاری تا مرحله استقرار پایه‌ها به‌طور یکسان انجام شد. تلقیح قارچ میکوریزی به میزان ۱۰۰ گرم از مخلوط سه گونه قارچ میکوریزی *Rhizophagus intraradices*, *Clariodeoglumus etunicatum* و *Funneliformis mosseae* برای هر پایه با جمعیت حداقل ۱۰۰ اندام فعال قارچ شامل اسپور، وزیکول، هیف در هر گرم در زیر ریشه قرار داده شد. قارچ‌های میکوریزی از بخش بیولوژی خاک موسسه تحقیقات خاک و آب کشور تهیه شد. بعد از مرحله استقرار، گلدان‌ها به فضای باز انتقال داده شده و تیمارهای تنش آبی اعمال شدند. افزایش آب به گلدان‌ها از طریق اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج^۱ TDR و جبران آب کاهش یافته در هر یک از سطوح رطوبتی فوق انجام شد. جهت تعیین مقدار آب مورد نیاز تیمارهای تنش، ابتدا میزان رطوبت خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم با استفاده از دستگاه صفحه فشاری^۲ تعیین شد و با اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک در عمق توسعه ریشه با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج و با استفاده از فرمول عمق آب آبیاری محاسبه و به گلدان‌ها اضافه شد. در این مرحله پس از محاسبه میزان رطوبت در تیمارهای تنش آبیاری و محاسبه میزان آب در هر تیمار، روزانه رطوبت خاک در گلدان‌ها اندازه‌گیری و به محض رسیدن رطوبت گلدان به نقطه رطوبتی مورد نظر آبیاری گلدان‌ها انجام شد. اضافه کردن آب به گلدان‌ها در تیمارهای رطوبتی با استفاده از پیمانه‌های حجمی با توجه به میزان آب محاسبه شده برای هر تیمار و وزن کردن گلدان‌های اضافی برای هر تیمار در طول مرحله رشد انجام شد. طول دوره رشد گیاه از ابتدای انتقال نهال به گلدان‌ها تا مرحله برداشت گیاه ۵ ماه بود. گیاهان به مدت چهار ماه تحت تنش خشکی

1- Time Domain Reflectometry (TDR)

2- Pressure plate

نیترژن و پتاسیم معنی‌دار شد (جدول ۲). در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در تنش خشکی حداکثر میزان نیترژن و فسفر به ترتیب به میزان ۳/۱ و ۰/۲۷ درصد از تیمار II+ GF حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I4 + تلخ)، به ترتیب ۳۷ و ۵۰ درصد افزایش نشان داد. اما در خصوص پتاسیم حداکثر و حداقل میزان پتاسیم به ترتیب به میزان ۱/۷۵ و ۱/۱۲ درصد از تیمارهای I4 + GF و I1 + تلخ حاصل شد (جدول ۴).

درصدی نشان داد (جدول ۳). صرف نظر از نوع پایه و سطح تنش کم‌آبی با مصرف قارچ‌های میکوریزی میزان این عنصرهای غذایی در اندام هوایی افزایش پیدا کرد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان نیترژن، فسفر و پتاسیم، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریز بر میزان نیترژن و پتاسیم، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای پایه، سطوح تنش آبی و قارچ میکوریز بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی
Table 2- Anova table for the effects of rootstock, drought stress and mycorrhizae fungi on nutrient elements

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Degree of freedom	بور	مس	منگنز	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	نیترژن
		B	Cu	Mn	Zn	Fe	K	P	N
پایه (Rootstock)	3	1473**	410**	357*	628**	1113**	0.5**	0.01**	1.3**
آبیاری (Irrigation)	3	۱۰*	64 ^{ns}	66 ^{ns}	63**	56**	0.36**	0.009**	0.5**
میکوریزا (Mycorrhizae)	1	۴,۳ ^{ns}	520**	492*	900**	950**	0.26**	0.01**	0.3**
آبیاری×پایه (Rootstock × Irrigation)	3	۲۲,۵**	32.5 ^{ns}	64 ^{ns}	21*	32**	0.07**	0.0004**	0.3**
میکوریزا×پایه (Rootstock × Mycorrhizae)	3	18**	35**	191 ^{ns}	17.5 ^{ns}	21.6*	0.15**	0.0006 ^{ns}	0.1*
میکوریزا×آبیاری (Irrigation × Mycorrhizae)	3	42.8**	145 ^{ns}	352*	10.6 ^{ns}	25.3**	0.03*	.0003 ^{ns}	0.09*
میکوریزا×آبیاری×پایه (Rootstock×Irrigation×Mycorrhizae)	9	26.3**	32 ^{ns}	57 ^{ns}	10 ^{ns}	22.3**	0.04*	0.0008 ^{ns}	0.09*
خطا (Error)	62	1.8	4.3	95	7.5	3.7	0.01	0.0001	0.02
کل (Total)	95								
ضریب تغییرات (C.V)		3.1	4.5	14	10	3	8.5	5.8	5.6

^{ns} و * و ** به ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد.
^{ns}, * and **: Non significant and significant P ≤ 0.05 and P ≤ 0.01 respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین صفات تأثیر پایه، سطوح تنش خشکی و قارچ میکوریزا بر میزان عناصر غذایی
Table 3- Mean comparison of simple effects of rootstock, drought stress and mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	بور (B)	مس (Cu)	منگنز (Mn)	روی (Zn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	فسفر (P)	نیترژن (N)
	میلی گرم بر کیلوگرم (mg kg ⁻¹)				درصد (%)			
GF	47.9 ^a	32.3 ^a	69.8 ^a	32 ^a	72 ^a	1.53 ^a	0.26 ^a	3.1 ^a
GN	31.9 ^a	29.7 ^b	69.5 ^a	31.8 ^a	71 ^a	1.5 ^a	0.23 ^b	3 ^a
Shorab2	47.5 ^a	23.2 ^c	63.4 ^b	24 ^b	60.3 ^b	1.3 ^b	0.2 ^c	2.74 ^b
Talkh	31.9 ^b	21.4 ^c	62.7 ^b	22.3 ^b	59.8 ^b	1.22 ^c	0.2 ^c	2.57 ^c
I ₁	44.5 ^a	33.7 ^a	68.6 ^a	29.3 ^a	68.2 ^a	1.27 ^b	0.24 ^a	2.96 ^a
I ₂	44 ^{ab}	31.8 ^a	66.2 ^a	28.5 ^a	66 ^b	1.29 ^b	0.23 ^b	2.91 ^{ab}
I ₃	43.4 ^{bc}	28.4 ^a	65.8 ^a	26.3 ^b	65.2 ^{bc}	1.48 ^a	0.22 ^c	2.84 ^b
I ₄	43 ^c	26.3 ^a	64.7 ^a	26 ^b	64.7 ^c	1.5 ^a	0.19 ^d	2.67 ^c
M ₁	43.9 ^a	35.5 ^a	68.6 ^a	30.6 ^a	69.2 ^a	1.44 ^a	0.23 ^a	2.9 ^a
M ₀	43.4 ^a	31.3 ^b	64.2 ^b	24.5 ^b	62.9 ^b	1.33 ^b	0.21 ^b	2.78 ^b

حروف مشابه در هر ستون و هر قسمت نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.
Means in an each column by a different letter are significantly different (P ≤ 0.05) by Duncan's Multiple range test.

متحرک بودن نیتروژن در خاک، جذب این عنصر نیاز به شبکه گسترده ریشه‌ای ندارد (Marschner and Dell, 1994). بررسی‌های مارشنر و دل (Marschner and Dell, 1994) نشان می‌دهد که گیاه میزبان می‌تواند تا ۲۵ درصد از نیاز نیتروژنی و روی و ۱۰ درصد از نیاز پتاسیمی خود را از طریق رابطه همزیستی با با قارچ‌های میکوریز آربسکولار تأمین نماید.

در این تحقیق در تیمارهای میکوریزی استفاده‌شده میزان نیتروژن، فسفر و پتاسیم اندام هوایی بیشتر است. بهبود مولفه‌های رشد در این مطالعه از قبیل طول و قطر ساقه، وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه، کلروفیل و کلونیزاسیون ریشه (Mishra et al., 2010) منجر به افزایش رشد و جذب عناصر غذایی شد (اطلاعات آورده نشده است). افزایش جذب فسفر و نیتروژن به جذب پتاسیم نیز کمک می‌کند. با افزایش تنش خشکی میزان عناصر نیتروژن و فسفر کاهش ولی میزان پتاسیم افزایش نشان داد. این نتایج با نتایج تحقیقات حقیقت‌نیا و همکاران (Haghighatnia et al., 2012)، علی اصغرزاد و همکاران (Alisgharzade et al., 2006)، ردربش و همکاران (Rudresh et al., 2005) و میشر و همکاران (Mishra et al., 2010) مطابقت دارد.

در اثر تنش خشکی میزان جذب پتاسیم در گیاه افزایش می‌یابد و آن به دلیل تنظیم فشار اسمزی و نقش یون پتاسیم در کنترل روزنه است. در مواردی نیز مشاهده شده است که درصد پتاسیم در گیاهان تحت تنش کمتر بوده و دلیل آن می‌تواند کاهش قابلیت دسترسی این عنصر در شرایط کمبود رطوبت است. به این صورت که در اثر وجود آب زیادتر، یون‌های یک ظرفیتی مانند پتاسیم در محلول خاک به‌طور نسبی بیشتر از یون‌های دو ظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم افزایش می‌یابند.

با خشک شدن تدریجی خاک، کلونیدهای رس با قدرت بیشتری یون پتاسیم تک ظرفیتی را به سطح خود جذب کرده و مانع از جدا شدن این یون می‌شود (Kafi, 2009). مکانیسم‌های جذب و انتقال عناصر غذایی در گیاهان، نظیر جریان توده‌ای، انتشار و یا جذب و انتقال بوسیله پدیده‌ی اسمز همگی، کم و بیش تابعی از مقدار رطوبت موجود در خاک و ریشه می‌باشد و در صورت کاهش رطوبت، رشد گیاه کاهش می‌یابد و شدت و مقدار جذب عناصر غذایی دستخوش تغییر و تحول می‌گردد (Marschner, 1995). با افزایش شدت کم آبی از جذب نیتروژن در اندام هوایی گیاه کاسته شده و مصرف قارچ میکوریزی باعث افزایش مولفه‌های رشدی گیاه (Mohammadi and Rejali, 2021) شده از این رو غلظت و جذب نیتروژن نسبت به گیاهان بدون مصرف قارچ میکوریزی، افزایش می‌یابد. تنش خشکی باعث افزایش مقاومت مکانیکی خاک شده و منجر به کاهش رشد ریشه می‌شود.

در خصوص اثر متقابل معنی‌دار رقم در قارچ میکوریز بر میزان نیتروژن و پتاسیم حداکثر میزان نیتروژن و پتاسیم به ترتیب به میزان ۳/۷ و ۱/۶۳ درصد از تیمار GF+M1 به بر میزان نیتروژن و پتاسیم حداکثر میزان نیتروژن و پتاسیم به ترتیب به میزان ۳/۷ و ۱/۶۳ درصد از تیمار GF+M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان نیتروژن به میزان سه درصد از تیمار I1 + M1 که نسبت به تیمار حداقل (I4 + M0) افزایش ۱۸ درصدی را نشان داد، اما بیشترین میزان پتاسیم از تیمار I4 + M1 به میزان ۱/۵۷ درصد حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I1+M0) با ۱/۲۴ درصد پتاسیم، ۲۶/۶ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶).

در خصوص اثر متقابل سه‌گانه رقم در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان نیتروژن به میزان ۳/۴۸ درصد از تیمار GF+I1+M1 و حداقل به میزان ۲/۰۲ درصد از تیمار I4+M0+ تلخ به دست آمد. همچنین حداکثر میزان پتاسیم به میزان ۱/۸ درصد از تیمارهای GN+I4+M1 و GF+I4+M1 و حداقل به میزان ۱/۱۹ درصد از تیمار I4 + M0+ تلخ، حاصل شد (جدول ۷).

اغلب گزارش‌ها حاکی از آن است که همزیستی گیاهان با قارچ‌های میکوریز در بیشتر موارد باعث افزایش جذب عناصر غذایی به خصوص عناصر غذایی با تحرک پائین در خاک مانند فسفر و روی توسط گیاه میزبان می‌گردد. میزان بیشتر فسفر در گیاهان تلقیح شده با میکوریز تحت شرایط مدیریت آبیاری کامل و شرایط کم‌آبیاری در گیاهان مختلف گزارش شده است (Mohammadi and Rejali, 2021; Kafkas and Ibrahim, 2009; Rejali, 2017). یکی از مکانیسم‌های اصلی برای مقاومت به تنش آبی توسط قارچ‌های میکوریز بهبود جذب عناصر غذایی از قبیل فسفر می‌باشد. گیاهان میکوریزایی با مکانیسم‌های مختلفی از قبیل دسترسی به حجم بیشتری از خاک به‌واسطه تولید ریشه‌های برون ریشه‌ای توسط قارچ و افزایش طول ریشه گیاه، بالا بردن سرعت جذب فسفر توسط هیف قارچ، انتقال فسفر از فواصل دور از ریشه، افزایش ناحیه تخلیه فسفر، افزایش انحلال فسفر به‌واسطه رهاسازی اسیدهای آلی و آنزیم فسفاتاز و فیتاز و کاهش pH ریزوسفر به‌واسطه ترشح یونهای H⁺ موجب افزایش جذب فسفر می‌گردند (Smith and Read, 2010; Ortas et al., 2015; Wu et al., 2011). هیف‌های قارچی در مقایسه با ریشه‌های گیاه به‌طور طبیعی عناصر غذایی را از فواصل دور دست مناطق تخلیه شده انتقال می‌دهند. این هیف‌ها توانایی نفوذ داخل حفرات خاک و تماس با ذرات خاک و جذب عناصر غذایی را دارند. همچنین ریشه‌های میکوریزایی شده موادی ترشح می‌کنند که فراهمی مواد غذایی برای جذب ریشه‌ای یا هیفی را افزایش می‌دهند (Wu et al., 2011; Marschner and Dell, 1994). با توجه به

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه در سطوح تنش کم آبی بر میزان عناصر غذایی

Table 4- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and drought stress on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	تنش Stress	بور (B)	روی (Zn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	فسفر (P)	نیترژن (N)
		میلی گرم در کیلوگرم (mg Kg ⁻¹)				درصد (%)	
GF	I1	49.8 ^a	34.5 ^a	74.5 ^a	1.41 ^{cd}	0.28 ^a	3.34 ^a
	I2	46.7 ^a	32 ^a	72 ^a	1.47 ^{bc}	0.27 ^{ab}	2.68 ^{efg}
	I3	46.6 ^a	28.5 ^b	68.5 ^b	1.48 ^{bc}	0.26 ^{bc}	3.10 ^{abcd}
	I4	48.7 ^a	33 ^a	73 ^a	1.75 ^a	0.23 ^{ef}	3.18 ^{ab}
GN	I1	49 ^a	32.2 ^a	72.2 ^a	1.3 ^{cdefg}	0.25 ^{cd}	3.18 ^{ab}
	I2	46.4 ^a	34.2 ^a	74.2 ^a	1.34 ^{cdef}	0.24 ^{cde}	3.14 ^{abc}
	I3	46.2 ^a	33.1 ^a	73.1 ^a	1.64 ^{ab}	0.23 ^{ef}	2.84 ^{def}
	I4	47.9 ^a	2.2 ^b	68.2 ^b	1.68 ^a	0.19 ^{hi}	2.80 ^{ef}
Shorab2	I1	48.4 ^a	26.2 ^{bc}	64.2 ^c	1.15 ^{fg}	0.23 ^{de}	2.94 ^{bcde}
	I2	49.6 ^a	25.6 ^{bcd}	60.8 ^{cde}	1.22 ^{defg}	0.21 ^{fg}	2.88 ^{cdef}
	I3	46.1 ^a	21.6 ^e	58.2 ^{ef}	1.38 ^{cde}	0.19 ^{hi}	2.72 ^{ef}
	I4	46.1 ^a	22.3 ^{de}	58.3 ^{ef}	1.44 ^{bc}	0.18 ⁱ	2.43 ^{hi}
Talkh	I1	30.6 ^c	24.5 ^{ced}	62 ^{cd}	1.12 ^{efg}	0.22 ^{ef}	2.63 ^{fgh}
	I2	33.3 ^{bc}	22.3 ^{ed}	57.3 ^f	1.20 ^g	0.19 ^{hi}	2.92 ^{abc}
	I3	34.5 ^b	21.8 ^e	61 ^{cde}	1.32 ^{cd}	0.2 ⁱ	2.45 ^{cdef}
	I4	29.3 ^c	30.8 ^e	59.5 ^{def}	1.42 ^g	0.18 ⁱ	2.26 ⁱ

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه در قارچ میکوریزا بر میزان عناصر غذایی

Table 5- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and Mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)	مس (Cu)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	نیترژن (N)
		میلی گرم در کیلوگرم (mg Kg ⁻¹)			درصد (%)	
GF	M ₁	48.5 ^a	36.3 ^a	76.4 ^a	1.63 ^a	3.13 ^a
	M ₀	48.4 ^b	31.4 ^c	67.7 ^d	1.44 ^b	3.07 ^{ab}
GN	M ₁	46.8 ^c	34.7 ^b	74.5 ^b	1.62 ^a	3.08 ^{ab}
	M ₀	48 ^c	30.3 ^d	69.3 ^c	1.35 ^{bc}	2.85 ^{ab}
Shorab2	M ₁	47.5 ^d	31.2 ^c	62.5 ^f	1.25 ^{cd}	2.75 ^{ab}
	M ₀	46.6 ^f	28.6 ^e	58.2 ^g	1.24 ^{cd}	2.73 ^{bc}
Talkh	M ₁	32.94 ^g	30.6 ^c	63.4 ^e	1.25 ^{cd}	2.66 ^{bc}
	M ₀	30.95 ^h	27.5 ^e	56.5 ^h	1.2 ^c	2.48 ^d

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریزا بر میزان عناصر غذایی اندام هوایی
Table 6- Mean comparison of the significant interaction effect of drought stress and Mycorrhizae fungi on nutrient elements concentration

تنش Stress	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)	منگنز (Mn)	آهن (Fe)	پتاسیم (K)	نیتروژن (N)
		میلی گرم در کیلوگرم (mg Kg ⁻¹)			درصد (%)	
I1	M ₁	44.1 ^{abc}	71 ^a	71.8 ^a	1.3 ^{cd}	3 ^a
	M ₀	44.8 ^{ab}	70.2 ^a	64.6 ^c	1.24 ^d	2.92 ^{ab}
I2	M ₁	46 ^a	70.9 ^a	97.8 ^b	1.40 ^{bc}	2.90 ^{ab}
	M ₀	42 ^c	61.5 ^{bc}	64.5 ^{cd}	1.19 ^d	2.93 ^{ab}
I3	M ₁	43.8 ^{abc}	65.5 ^{abc}	68.5 ^b	1.50 ^{ab}	2.94 ^{ab}
	M ₀	42.9 ^c	66.2 ^{abc}	62 ^d	1.47 ^{ab}	2.73 ^{bc}
I4	M ₁	41.8 ^c	67.1 ^{ab}	68.7 ^b	1.57 ^a	2.78 ^{abc}
	M ₀	44.2 ^{abc}	58.4 ^c	60.8 ^e	1.43 ^{abc}	2.55 ^c

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

بیشتر ریشه‌های این دوپایه و دسترسی بیشتر به حجم و منافذ بیشتر خاک و جذب آب و مواد غذایی بیشتر باشد (Mishra et al., 2010; Rejali, 2017; Wu et al., 2011). در خصوص تیمارهای تنش خشکی با افزایش شدت تنش میزان آهن و روی اندام هوایی روند کاهشی را نشان دادند. بیشترین میزان آهن و روی از تیمار I1 حاصل شد که در مقایسه با تیمار I4 به ترتیب افزایش ۶ و ۱۲ درصدی نشان داد (جدول ۳). با توجه به معنی‌دار نشدن اثر تیمار آبیاری بر میزان منگنز اندام هوایی، اما بیشترین میزان منگنز از تیمار آبیاری I1 به میزان ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد. با مصرف قارچ‌های میکوریزا میزان این عناصر غذایی در اندام هوایی افزایش پیدا کرد. حداکثر میزان آهن، روی و منگنز به ترتیب به میزان ۶۹/۲، ۳۰/۶ و ۶۸/۶ میلی‌گرم در کیلوگرم از مصرف قارچ‌های میکوریزی حاصل شد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان آهن و روی، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریزا بر میزان آهن، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریزا بر میزان آهن و منگنز و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریزا بر میزان آهن معنی‌دار شدند (جدول ۲).

در خصوص اثر متقابل پایه در تنش خشکی حداکثر میزان آهن و روی به ترتیب به میزان ۷۴/۵، ۳۴/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار II+ GF حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I4 + Talkh)، ۲۵ و ۶۶ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴).

کاهش رشد ریشه موجب کاهش توانایی گیاه برای جذب عناصر غذایی می‌شود (Marschner and Dell, Marschner, 1995; Marschner and Dell, 1994). قارچ‌های میکوریزی دارای توانایی تغییر در شکل و حجم ریشه می‌باشند. این تغییر شکل از جنبه تغییر در وضعیت تغذیه‌ای گیاه و تغییر در سطح ترکیبات هورمونی گیاه می‌باشد (Perez-Perez, 2007; Rejali, 2017). تغییر در تعداد انشعابات ریشه بادام همزیست با قارچ میکوریز عمدتاً به دلیل جذب عناصر غذایی است زیرا بادام دارای ریشه‌های ضخیم با انشعاب کم می‌باشد و ریشه‌های با انشعاب ریزتر که دارای توانایی جذب عناصر غذایی هستند در آن کمتر است (Ortas et al., 2015; Calvert et al., 2004). در شرایط تنش خشکی مولفه‌های رشدی، کلروفیل، وزن خشک ریشه و کلنیزاسیون (Mohammadi and Rejali, 2021) کاهش پیدا نمود. این کاهش منجر به کاهش رشد گیاه و متعاقب آن فتوسنتز و جذب آب و مواد غذایی کاهش می‌یابد. این موضوع در نتایج تحقیقات محققین مختلف گزارش شده است (Calvert et al., 2004; Wu an Zou, 2009; Xueming et Haghghatnia et al., 2012; al., 2007).

عناصر غذایی آهن، روی و منگنز

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی (به غیر از میزان منگنز) و قارچ میکوریزا بر میزان این عنصرهای غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان آهن، روی و منگنز به ترتیب به میزان ۷۲، ۳۲ و ۶۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از پایه GF حاصل شد که با پایه GN اختلاف معنی‌داری نداشت. علت افزایش بیشتر این عناصر غذایی در پایه‌های GF و GN می‌تواند مربوط به رشد و توسعه

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل معنی‌دار پایه در تنش در آبیاری بر میزان برخی از عناصر غذایی

Table 7- Mean comparison of the significant interaction effect of rootstock and drought stress on nutrient elements concentration

پایه Rootstock	تنش Stress	میکوریزا Mycorrhizae	بور (B)		پتاسیم (K)		نیتروژن (N)	
			میلی گرم در کیلوگرم (mg Kg ⁻¹)		درصد (%)		درصد (%)	
GF	I1	M ₁	52 ^a	81 ^a	1.4 ^{efghij}	3.4 ^a		
		M ₀	51.2 ^{defghi}	68 ^{ghi}	1.43 ^{defghi}	3.15 ^{bdc}		
	I2	M ₁	46.6 ^{ghij}	74 ^{cd}	1.61 ^{abcde}	3.32 ^{ab}		
		M ₀	46.8 ^{efghij}	70 ^{efgh}	1.33 ^{efghijkl}	2.64 ^{ijk}		
	I3	M ₁	49.3 ^{bcdef}	72.3 ^e	1.65 ^{abcd}	3.20 ^{abcd}		
		M ₀	44 ^{kl}	64.7 ^{ijkl}	1.32 ^{efghijkl}	3.02 ^{bcdef}		
I4	M ₁	45.8 ^{ijkl}	78 ^{ab}	1.81 ^a	3.06 ^{bcdef}			
	M ₀	51.6 ^{ab}	68 ^{ghi}	1.70 ^{abc}	2.73 ^{efghijk}			
GN	I1	M ₁	45.9 ^{Jhijkl}	73.6 ^{cde}	1.47 ^{defgh}	3.30 ^{ab}		
		M ₀	48.3 ^{defghi}	70.6 ^{defg}	1.13 ^{lm}	3.06 ^{bcd}		
	I2	M ₁	48.9 ^{cdefg}	77.7 ^b	1.53 ^{bcdefg}	3.23 ^{abc}		
		M ₀	43.8 ^{efghij}	70.7 ^{defg}	1.16 ^{klm}	3.05 ^{bcdef}		
	I3	M ₁	46.4 ^{ghijk}	76 ^{bc}	1.73 ^{ab}	3.03 ^{bcdef}		
		M ₀	46 ^{hijkl}	70.3 ^{efg}	1.55 ^{bcdefg}	2.66 ^{jhik}		
I4	M ₁	45.7 ^{ijkl}	70.7 ^{defg}	1.80 ^a	2.97 ^{cdefgh}			
	M ₀	50 ^{abcde}	65.7 ^{ijk}	1.56 ^{bcdef}	2.63 ^{ljk}			
Shorab2	I1	M ₁	48.9 ^{cdefg}	66.6 ^{ghi}	1.12 ^{lm}	3 ^{bcdefg}		
		M ₀	47.8 ^{efghi}	61.6 ^{lmn}	1.19 ^{ijklm}	2.89 ^{defghi}		
	I2	M ₁	50.8 ^{abcd}	58.4 ^{nop}	1.28 ^{hijklm}	3.14 ^{bcd}		
		M ₀	48.5 ^{defgh}	63.4 ^{ijklm}	1.16 ^{kjmn}	2.62 ^{ijk}		
	I3	M ₁	47 ^{efghij}	62 ^{nop}	1.12 ^{lm}	2.78 ^{efghij}		
		M ₀	45.2 ^{ijkl}	54.3 ^q	1.64 ^{abcd}	2.66 ^{hijk}		
I4	M ₁	47 ^{thghi}	63.3 ^{ijklm}	1.50 ^{cdefgh}	2.62 ^{ijk}			
	M ₀	45.1 ^{ijkl}	53.3 ^q	1.40 ^{efghij}	2.24 ^{lm}			
Talkh	I1	M ₁	33.1 ⁿ	66 ^{ijk}	1.22 ^{ijklm}	2.68 ^{ghijk}		
		M ₀	28.3 ^o	58 ^{op}	1.19 ^{ijklm}	2.60 ^{ijk}		
	I2	M ₁	37.5 ^m	61 ^{mno}	1.13 ^m	2.96 ^{cdefgh}		
		M ₀	29 ^o	53.6 ^{def}	1.12 ^{lm}	2.90 ^{defghi}		
	I3	M ₁	32.4 ⁿ	63.6 ^{ijklm}	1.46 ^{defgh}	2.50 ^{ikl}		
		M ₀	36.7 ^m	58.3 ^{nop}	1.40 ^{efghij}	2.42 ^{lm}		
I4	M ₁	29.8 ^o	63 ^{klm}	1.18 ^{ijklm}	2.50 ^{ikl}			
	M ₀	28.7 ^o	56 ^q	1.10 ^m	2.02 ^m			

حروف مشابه در هر ستون نشان‌دهنده عدم اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Means in an each column by a different letter are significantly different ($P \leq 0.05$) by Duncan's Multiple range test.

آمد (جدول ۶). در خصوص اثر متقابل سه‌گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان آهن به میزان ۸۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GN+I1+M1 و حداقل به ترتیب به میزان ۵۶ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I4 + M0 + تلخ، به دست آمد (جدول ۷). بررسی‌ها نشان می‌دهد که همزیستی میکوریزی دارای اثرهای متفاوتی در

در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در قارچ میکوریز حداکثر میزان آهن به میزان ۷۶/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF + M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان آهن و منگنز به میزان ۷۱/۸ و ۷۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I1 + M1 و حداقل از تیمار I4 + M0 به دست

خشکی میزان این عناصر کاهش یافت. تیمارهای بدون تنش خشکی دارای میزان بیشتر عناصر غذایی مطالعه شده بودند. در واقع کم آبی باعث کاهش تعداد انشعابات ریشه و تغییر و آسیب به شکل ریشه شده که نتیجه آن کاهش جذب عناصر غذایی توسط ریشه می‌باشد.

عناصر غذایی مس و بور

نتایج تجزیه واریانس مرکب نشان داد اثر پایه، تنش خشکی (به غیر از میزان مس) و قارچ میکوریزا (به غیر از میزان بور) بر میزان این عنصرهای غذایی معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان مس و بور از پایه GF حاصل شد. با افزایش شدت تنش خشکی روند کاهشی عناصر مس و بور مشاهده شد. بیشترین میزان این دو عنصر غذایی از تیمار II حاصل شد (جدول ۳). مصرف قارچ‌های میکوریزی باعث افزایش معنی‌دار میزان مس اندام هوایی شد. حداکثر میزان مس به میزان ۴۳/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم حاصل شد که نسبت به تیمار عدم مصرف ۱۳/۵ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳). از بین اثرات متقابل تیمارهای مورد بررسی اثر متقابل دو گانه پایه در تنش خشکی بر میزان بور، اثر متقابل پایه در قارچ میکوریز بر میزان مس و بور، اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان بور و اثر متقابل سه گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز بر میزان بور معنی‌دار شدند (جدول ۲). در خصوص اثر متقابل پایه در تنش خشکی حداکثر میزان بور به مقدار ۴۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF + II حاصل شد که نسبت به تیمار حداقل (I4 + Talkh)، ۱۷ درصد افزایش نشان داد (جدول ۴). در خصوص اثر متقابل معنی‌دار پایه در قارچ میکوریز حداکثر میزان مس و بور به میزان ۳۶/۳ و ۴۸/۵ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GF + M1 به دست آمد (جدول ۵). در خصوص اثر متقابل تنش خشکی در قارچ میکوریز، بیشترین میزان بور به میزان ۳۴/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار I1 + M1 و حداقل از تیمار I4 + M0 به دست آمد (جدول ۶). در خصوص اثر متقابل سه‌گانه پایه در تنش خشکی در قارچ میکوریز حداکثر میزان بور به میزان ۵۲ میلی‌گرم در کیلوگرم از تیمار GN+I1+M1 به دست آمد (جدول ۷). تنش رطوبتی اغلب جذب عناصر غذایی توسط گیاه را محدود می‌سازد. جذب مواد غذایی به وسیله گیاهان تحت شرایط کمبود آب، به دلیل کاهش کارایی سیستم ریشه‌ای ناشی از کاهش تعداد انشعابات ریشه، آسیب به ریشه، کاهش تعرق، اختلال در سیستم انتقال فعال و نفوذپذیری غشاء و در نتیجه کاهش نیروی جذب کنندگی ریشه، کاهش می‌یابد (Kafi et al., 2009). بررسی‌های لیو و همکاران (Liu et al., 2000) نشان داد گیاهان همزیست با قارچ‌های میکوریزی عناصر غذایی فلزی بیشتری را از طریق هیف‌های خارجی خود جذب می‌کنند که این امر به علت افزایش سطح تماس بیشتر نسبت به ریشه‌های گیاه و کاهش فاصله انتشار یون‌های فلزی نظیر

جذب عناصر کم مصرف در گیاه میزبان دارد. از این رو نوع گیاه میزبان و ویژگی‌های ژنتیکی آن باعث جذب متغیر عناصر کم مصرف در گیاهان مختلف می‌شود. به‌عنوان مثال همزیستی میکوریزی در جذب آهن تحت تأثیر نوع گیاه میزبان، نوع گونه قارچ میکوریزی، pH خاک، درجه حرارت و میزان فسفر اضافه شده به خاک قرار می‌گیرد (Marschner, Balakrishnan and Subramanian, 2012)؛ در خصوص منگنز دسترسی گیاهان به این عنصر تحت کنترل واکنش‌های اکسیداسیون و احیاء در خاک می‌باشد که در این میان نقش ترشحات ریشه و فعالیت ریز جانداران به خوبی مشخص نشده است. گیاهان میکوریزی معمولاً توانایی کمتری برای جذب منگنز نسبت به گیاهان غیر میکوریزی دارند (Rejali, 2017). اگر چه در مواردی افزایش جذب منگنز در گیاهان میزبان قارچ‌های میکوریز آریسکولار نیز دیده شده است (Zarei et al., 2013; Xueming et al., 2007). با این وجود افزایش جذب منگنز در برخی از گیاهان دارای همزیستی با قارچ‌های میکوریزی مشاهده شده است (Xueming et al., 2007)؛ علت افزایش میزان جذب عناصر کم‌مصرف می‌تواند ناشی از گسترش ریشه و دسترسی به حجم خاک بیشتر، افزایش سطح جذب ریشه‌ای، انتقال توسط هیف قارچی پتانسیل رید اکس پایین‌تر در ریزوسفر، افزایش ترشحات کلات کننده و کاهش بیشتر pH در ریزوسفر گیاهان همزیست با قارچ میکوریزا نسبت به گیاهان بدون قارچ می‌باشد (Subramanian et al., 2011)؛ Balakrishnan and Subramanian, 2012; Vafadar et al., 2014). یکی دیگر از عوامل افزایش‌دهنده فراهمی عناصر غذایی ریزمغذی توسط همزیستی میکوریزی بخصوص در خاک‌های آهکی، تولید و ترشح موچنیک اسید می‌باشد (Balakrishnan and Subramanian, 2012). سایرانیان و همکاران (Subramanian, 2012; et al., 2011) جذب بیشتر روی در گیاهان میکوریزی را به فعالیت بالای آنزیم‌های کربنیک انهدراتاز و سوپراکسید دیسموتاز نسبت دادند. لیو و همکاران (Liu et al., 2000) گزارش نمودند گیاهان همزیست با قارچ‌های میکوریزی عناصر غذایی فلزی بیشتری را از طریق هیف‌های خارجی خود جذب می‌کنند که این امر به علت افزایش سطح تماس بیشتر نسبت به ریشه‌های گیاه و کاهش فاصله انتشار یون‌های فلزی نظیر روی، منگنز و مس تا محل جذب می‌باشد. افزایش جذب عناصر غذایی کم مصرف در این تحقیق با نتایج تحقیقات آقابائی و همکاران (Aghababaei et al., 2011)، زارعی و همکاران (Zarei et al., 2013)، وفادار و همکاران (Vafadar et al., 2014)، وو و همکاران (Wu et al., 2011)، بالاکریشن و همکاران (Balakrishnan and Subramanian, 2012) و مادر و همکاران (Mader et al., 2011) مطابقت دارد. با افزایش تنش

تغییر در تعداد انشعابات ریشه در اثر همزیستی قارچ میکوریزی بیشتر به علت افزایش جذب عناصر غذایی و تغییر در میزان هورمون‌های گیاهی از قبیل اکسین می‌باشد (Perez-Perez, 2007).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش تنش خشکی میزان عناصر غذایی به غیر از میزان پتاسیم موجود در اندام هوایی روند کاهشی داشتند. تأثیرپذیری پایه GF نسبت به تلقیح قارچ‌های میکوریزی به دلیل برقراری همزیستی بیشتر با قارچ‌های میکوریزی و پتانسیل گسترش و سرعت ریشه بالاتر، بیشتر بود. عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در پایه‌های تلقیح شده بیشتر از پایه‌های بدون تلقیح بود. در شرایط تنش خشکی میزان عناصر غذایی اندازه‌گیری شده در پایه‌های تلقیح شده بیشتر بود. همزیستی میکوریزی می‌تواند از طریق افزایش مولفه‌های رشدی، کلروفیل و کلنیزاسیون ریشه و با مکانیسم‌هایی از قبیل افزایش مؤثر سطح جذب ریشه، طول ریشه، تعداد ریشه‌های جانبی، تولید پروتون، ترشح اسیدهای آلی، سیدروفورها، ترکیبات کلات‌کننده، فسفات‌آز اسیدی منجر به افزایش جذب عناصر غذایی شود. همزیستی میکوریزی ایجاد شده باعث افزایش جذب عناصر غذایی و بهبود مقاومت پایه‌های بادام به تنش خشکی شد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت و کمک مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فن‌آوران کشور با کد ۹۴۰۰۳۱۳۹ انجام شده است که بدین‌وسیله از همکاری صندوق تشکر به‌عمل می‌آید.

منگنز و مس تا محل جذب می‌باشد. میزان مس موجود در محلول خاک مانند عنصر روی، بسیار اندک بوده و از طرف دیگر ضریب پخش شدن این عنصر در خاک نیز بسیار کم می‌باشد. این دو عامل باعث شده تا در گیاهان میکوریزی میزان مس جذب شده بیشتر از گیاهان غیرمیکوریزی باشد. میزان جذب مس در گیاه تا حدودی وابسته به میزان فسفر موجود در گیاه می‌باشد. با افزایش میزان فسفر در گیاه مقدار مس بیشتری به سمت اندام هوایی حرکت کرده و غلظت فسفر و مس در اندام هوایی افزایش می‌یابد (Rejali, 2017; Smith and Marschner and Dell, 1994; Read, 2010). قارچ‌های میکوریزی در همزیستی با گیاهان و از طریق فعالیت فسفات‌آزی خود می‌توانند ترکیبات آلی فسفره را هیدرولیز کرده و بدین صورت جذب هم زمان فسفر و مس را در گیاه افزایش دهند. لیو و همکاران (Liu et al., 2000) گزارش نمودند با حضور قارچ میکوریز آربوسکولار، جذب روی، مس، منگنز و آهن بوسیله ذرت در سطوح فسفر و عناصر غذایی ریزمغذی تحت تأثیر قرار گرفته است به‌طوری‌که غلظت منگنز با کاربرد قارچ میکوریزی کاهش پیدا می‌کند. اما امیر آبادی و همکاران (Amirabadi et al., 2009) و مادر و همکاران (Mader et al., 2011) افزایش جذب منگنز را در اثر استفاده ترکیبی گونه‌های میکوریزا گزارش نمودند. اثر قارچ‌های میکوریزی بیانگر پتانسیل قارچ بر رشد پایه‌ها است (Al-Karaki and Al-Raddad, 1997). قارچ‌های میکوریزی با داشتن هیف‌هایی با قطر کوچکتر از ریشه وارد منافذ ریز خاک شده و رطوبت و عناصر غذایی را جذب می‌کنند (Smith and Read, 2010). تغییری که در شکل و حجم ریشه در اثر مصرف قارچ‌های میکوریزی ایجاد می‌شود از دو جنبه تغییر در وضعیت تغذیه‌ای گیاه و تغییر در سطح ترکیبات هورمونی گیاه است.

منابع

1. Aghababaei F., Reisi F., and Nadian H.A. 2011. Influence of mycorrhizal symbiosis on the uptake of nutrients in some commercial genotypes of Almond in a sandy loam soil. Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences) 25(20): 138-147. (In Persian with English abstract)
2. Aliasgharzad N., Neyshabouri M.R., and Salimi G.H. 2006. Effects of *arbuscular mycorrhizal* fungi and *Bradyrhizobium japonicum* on drought stress of soybean. Biologia, Bratislava 19: 324-328. DOI: 10.2478/s11756-006-0182-x.
3. AL-Karaki G.N., and Al-Raddad A. 1997. Effects of arbuscularmycorrhizal fungi and drought stress on growth and nutrient uptake of two wheat genotypes differing in drought resistance. Journal of Mycorrhiza 7: 83-88. DOI: 10.1007/s005720050166.
4. Amirabadi M., Rejali F., Ardakani M., and Borji M. 2009. The effect of using Azetobacter inoculant and mycorrhizae fungi on uptake of some mineral nutrients in different levels of phosphorus in corn (*Zea mays* var 704). Journal of Soil Research 23(1): 107-115. (In Persian with English abstract)
5. Artusson V., Finlay R.D., and Jansson J.K. 2006. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and bacteria and their potential for stimulating plant growth. Journal of Environment Microbiology 8: 1-10. DOI: 10.1111/j.1462-2920.2005.00942.x.
6. Balakrishnan N., and Subramanian K. 2012. Mycorrhizal symbiosis and bioavailability of micronutrients in maize grain. Mydica Journal 57: 129-138.
7. Brundrett M., Bougher N., Dell B., Grove T., and Malajczuk N. 1996. Working with mycorrhizas in forestry and

- agriculture. Australian Centre for International Agricultural Research, Canberra. Pp 374
8. Calvet C., Estan V., Camprub A., Hernandez-Dorrego A., Pinochet J., and Moreno M.A. 2004. Aptitude for mycorrhizal root colonization in *Prunus* rootstocks. *Scientia Horticulturae* 100: 39-49. DOI: [10.1016/j.scienta.2003.08.001](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2003.08.001).
 9. Chen X., Chunhua W.U., Jianjun T. and Shuijin H. 2005. Arbuscular mycorrhiza enhances metal lead uptake and growth of host plant under a sand culture experiment. *Chemosphere* 60: 665-671. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2005.01.029](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.029).
 10. Emami A. 1996. Plant analysis methods. Soil and water research Institute. First Volume Technical Bulletin No.982. (In Persian)
 11. Haghghatnia H., Nadian H., Rejali F., and Tavakoli A.R. 2012. Effect of Two Species of Arbuscular-Mycorrhizal Fungi on Vegetative Growth and Phosphorous Uptake of Mexican Lime Rootstock (*Citrus aurantifolia*) Under Drought Stress Conditions. *Seed and Plant Production Journal* 2(28): 403-417. (In Persian with English abstract)
 12. Kafi M., Borzoei M., Salehi M., Kamandi A., Masomi A., and Nabati J. 2009. Physiology of environmental stresses in plants. Mashhad Jihad University Press, Mashhad 502 page. (In Persian)
 13. Kafkas S., and Ibrahim O. 2009. Various mycorrhizal fungi enhance dry weights, P and Zn uptake of four *Pistacia* species. *Plant Nutrition* 32: 146-159. DOI: [10.1080/01904160802609005](https://doi.org/10.1080/01904160802609005).
 14. Liu A., Hamel C., Hamilton R.I., Ma B.L., and Smith D.L. 2000. Acquisition of Cu, Zn, Mn, and Fe by mycorrhizal maize (*Zea mays* L.) grown in soil at different P and micronutrient levels. *Mycorrhiza Journal* 9: 331-336. DOI: [10.1007/s005720050277](https://doi.org/10.1007/s005720050277).
 15. Mader P., Kaiser F., Adholeya A., Singh R., Uppal H.S., Sharma A. K., Srivastava R., Sahai V., Aragno M., Wiemken A., Johri B.N., and Fried P.M. 2011. Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat rice and wheat black gram rotations in India. *Journal of Soil Biology and Biochemistry* 43: 609-619. DOI: [10.1016/j.soilbio.2010.11.031](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.031).
 16. Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plant. Second Ed., Academic Press. Harcourt Brace Company, Pub. Co. New York. 890 Pages.
 17. Marschner H., and Dell B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil* 159: 89-102. DOI: [10.1007/bf00000098](https://doi.org/10.1007/bf00000098).
 18. Mishra A., Prasad K., and Geeta R. 2010. Effect of biofertilizer inoculation on growth yield of dwarf field Pea (*Pisumsativum* L.) in conjunction with different doses of chemical fertilizers. *Agronomy Journal* 9: 163-168. DOI: [10.3923/ja.2010.163.168](https://doi.org/10.3923/ja.2010.163.168).
 19. Mohammadi M., and Rejali F. 2021. Effect of mycorrhizal symbiosis on growth properties and colonization of common Almond rootstock water deficit conditions. *Journal of Soil Biology* 9(1): 14-29. DOI: [10.22092/sbj.2020.343209.197](https://doi.org/10.22092/sbj.2020.343209.197).
 20. Ortas I., Akpınar C., and Demirbas A. 2015. Effect of mycorrhizal species on growth and nutrient uptake by seedlings of citrus (*Citrus sinensis*) under three soil growth conditions. *Current Horticulture* 3(2): 61-64.
 21. Perez-Perez, J. M., 2007. Hormone signaling and root development: an update on the latest Arabidopsis thaliana research. *Funct. Plant Biology* 34: 163-171. DOI: [10.1071/fp06341](https://doi.org/10.1071/fp06341).
 22. Razouk R., and Kajji A. 2015. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on water relations and growth of young *Plum* trees under severe water stress conditions. *Plant Soil Science* 5: 300-312. DOI: [10.9734/ijpss/2015/15408](https://doi.org/10.9734/ijpss/2015/15408).
 23. Rejali F. 2017. Familiarity with mycorrhizal fungi and their application in different ecosystems. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Deputy for Extension, Agricultural Education Publication. 154 pages. (In Persian with English abstract)
 24. Rudresh D.L., Shivaprakash M.K., and Prasad R.D. 2005. Effect of combined application of Rhizobium, phosphate solubilizing bacterium and *Trichoderma* spp. On growth, nutrient uptake and yield of chickpea (*Cicer aritenium* L.). *Applied Soil Ecology* 28: 139-146. DOI: [10.1016/j.apsoil.2004.07.005](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.07.005).
 25. Smith S.E., Facelli E., Pope S., and Smith F.A. 2010. Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. *Journal of Plant and Soil* 326: 3-20. DOI: [10.1007/s11104-009-9981-5](https://doi.org/10.1007/s11104-009-9981-5).
 26. Smith S.E., and Read D.J. 2010. Mycorrhizal Symbiosis (San Diego, CA, USA: Academic Press).
 27. Subramanian K.S., Tenshia J.V., Jayalakshmi K., and Ramachandran V. 2011. Antioxidant enzyme activities in arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) fungus inoculated and non-inoculated maize plants under zinc deficiency. *Ind. Journal Microbiology* 51(1): 37-43. DOI: [10.1007/s12088-011-0078-5](https://doi.org/10.1007/s12088-011-0078-5).
 28. Tehranifar A., Kafi M., and Adli M. 2004. Almond cultivation Mashhad Jihad University Press, Mashhad 31 page. (In Persian)
 29. Vafadar F., Amooaghaie R., and Otroshy M. 2014. Effects of plant-growth-promoting rhizobacteria and arbuscular mycorrhizal fungus on plant growth, stevioside, NPK and chlorophyll content of *Stevia rebaudiana*. *Journal Plant Interaction* 9(1): 128-136. DOI: [10.1080/17429145.2013.779035](https://doi.org/10.1080/17429145.2013.779035).
 30. Wu Q.S., Li G.H., and Zou Y.N. 2011. Roles of Arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient acquisition

- of peach (*Prunus persica* L.) seedlings. Animal Plant Science 4: 746-750. DOI: [10.15835/nbha3926232](https://doi.org/10.15835/nbha3926232).
31. Wu Q.S., and Zou Y.N. 2009. Mycorrhiza has a direct effect on reactive oxygen metabolism of drought-stressed citrus, Plant Soil Environment 55(10): 436-442. DOI: [10.17221/61/2009-pse](https://doi.org/10.17221/61/2009-pse).
 32. Xueming Z., Pei Q., Shuwen W., Fugeng Z., Guang W., and Daoliang Y. 2007. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the rooting and growth of beach plum (*Prunus maritime*) cutting. Journal Horticulture Science Biotechnology 82: 863-866. DOI: [10.1080/14620316.2007.11512319](https://doi.org/10.1080/14620316.2007.11512319).
 33. Zarei M., Paymaneh Z., Ronaghi A., Kamgar Haghighi A.A., and Shahsavar A. 2013. Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungus on growth and Physiological parameters of rough Lemon rootstock under drought stress conditions. Journal of Water and Soil 27(3): 485-494. (In Persian with English abstract)



Evaluating the Role of Different Management Systems on Soil Quality Index Using Crop Yield (Case Study: Neyshabour Plain, Iran)

F. Maghami Moghim¹, A. Karimi^{2*}, M. Bagheri Bodaghabadi³, H. Emami⁴

Received: 01-01-2022

Revised: 06-01-2022

Accepted: 23-01-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Maghami Moghim F., Karimi A., Bagheri Bodaghabadi M., and Emami H. 2022. Evaluating the Role of Different Management Systems on Soil Quality Index Using Crop Yield (Case Study: Neyshabour Plain, Iran). Journal of Water and Soil 36(1): 95-112. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74026.1120](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74026.1120)

Introduction

The type of management operations and land use systems are the key parameters affecting the soil quality and sustainable land use. The exploitation systems by efficient use of soil and water recourse can decrease productions costs and increase the yield as well as conserve the natural resources. However, farmers and stakeholders need to be aware that through their management practices, they affect soil quality and, with the short-term goal of production and greater profitability, lead to soil degradation. They can both use the land economically and improve and maintain soil quality by balancing production inputs and refining their management approaches. There are different management systems of productivity in agricultural lands in Neyshabour plain in northeastern Iran. In addition to the water and soil limitations in the study area, the prevalence of the smallholder system and the unwillingness of farmers to integrate smallholder, has further increased the destruction of soils in the study area. The objective of this study was to assess the changes in soil quality index in surface soil and profile (0-100 cm) and calculate the correlation between soil quality index and alfalfa and rapeseed yield in rangeland and agricultural areas managed by smallholders, total owners, and Binalood Company in the study area.

Materials and Methods

A total of 21 soil profiles were described in the total owner, smallholder and Binalood company management system and sampled from the alfalfa and rapeseed lands. Questionnaires were prepared with the help of farmers and experts in the study area based on Analytic Hierarchical analysis (AHP) method. The physical and chemical characteristics of the soil samples were determined. The important soil characteristics affecting plant growth were determined by interviewing farmers and experts study area. Soil quality index in the minimum data set (MDS) was calculated by two methods of principal component analysis (PCA) and expert opinion (EO), by additive and weighted methods in surface soil and profile. To achieve a single value for each soil properties in the soil profile, two methods of weighted mean and weighted factor were used. To evaluate the accuracy of the assessment, the correlation between soil quality index and alfalfa and rapeseed yield was investigated of the various management system.

Result and Discussion

The results showed that the highest additive and weighted soil quality index at both surface and soil profile in both PCA and EO methods were in rangeland. It was due to lack of cultivation and maintaining organic matter comparing to agricultural land. The total owner management system due to its economic power and the use of appropriate and scientific methods comparing to smallholder management system, showed the highest additive

1, 2 and 4- Ph.D Student in Management Soil Resources and Professors Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: karimi-a@um.ac.ir)

3- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

and weighted soil quality index. In all management system, the EO-calculated weight index by weighted factor method had the highest value due to assigning the suitable weight for soil characteristics. The correlation analyses soil quality indices with canola and alfalfa indicated that the EO soil quality calculated by weighted factor for the soil profile were more correlated than surface soil in total owner system and the Binalood company. Weight coefficient method due to the application of different weights to each layer based on their importance, showed a higher soil quality index in both EO and PCA sets than the weighted average method. The reason for better EO performance probably is that the PCA is a reducing the dimensions, meanwhile, the minimum data selection in the EO method is based on regional experts which are familiar with cause-and-effect relationship of the soil properties. Due to the relatively good correlation of the yield of the studied products, with the soil quality index, an appropriate management needs to maintain and improve soil quality, especially in the smallholder system, as well as meeting the nutritional needs of these products.

Conclusion

Soil quality assessment in this study indicated that calculation of the soil quality index only considering the surface soil properties may not provide complete information for the farmers and land managers. Then inclusion of both surface and profile soil properties with farmers' knowledge and study area experts are essential for sustainable soil management. On the other hand, the differences in the management system also affected the soil quality index. Although the smallholder management system due to low input, especially chemical fertilizers, water and agricultural implements, had a high potential concerning environmental issues, but in terms of production, total owner and Binalood company management systems because of their high economic strength had the higher soil quality index. The farmers and stakeholders of the total owner management systems should be considered despite the proper management, however due to high inputs of fertilizer and water, especially in the Binalood company, the production may not be sustainable. Therefore, for further studies, calculating the water consumption in the desired management systems is recommended.

Keywords: Crop yield, Expert opinion, Management system, Principal component analysis, Soil quality index

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۹۵-۱۱۲

ارزیابی نقش سامانه‌های مدیریتی مختلف بر شاخص کیفیت خاک با استفاده از عملکرد محصول (مطالعه موردی: دشت نیشابور)

فرشته مقامی مقیم^۱ - علی رضا کریمی^{۲*} - محسن باقری بداغ آبادی^۳ - حجت امامی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۳

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی شاخص کیفیت خاک در دو سطح لایه شخم و خاک‌رخ (عمق ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر)، در اراضی مرتعی و کشاورزی با مدیریت‌های خرده‌مالک، عمده‌مالک شخصی و اراضی شرکت کشاورزی و دامپروری بینالود در نیشابور انجام شد. ۲۱ خاک‌رخ در سامانه‌های مدیریتی مزبور، حفر و از افق‌های آن‌ها نمونه‌برداری گردید. پرسش‌نامه‌های لازم به کمک کشاورزان و کارشناسان منطقه به روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، تهیه و تحلیل‌های مورد نظر انجام گرفت. از بین ویژگی‌های موثر بر کیفیت خاک، کربنات کلسیم معادل، کربن آلی، درصد رس، شن، سیلت، قابلیت هدایت الکتریکی، pH، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، سدیم و مجموع کلسیم و منیزیم مورد تجزیه آزمایشگاهی قرار گرفت. شاخص کیفیت خاک در مجموعه حداقل داده (MDS) به دو روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و نظر کارشناس (EO) و به دو شیوه تجمعی و وزنی محاسبه شد. برای رسیدن به یک مقدار واحد از هر ویژگی در هر خاک‌رخ، از دو روش میانگین وزنی و ضریب وزنی استفاده گردید و به‌منظور بررسی صحت ارزیابی، ارتباط بین شاخص کیفیت خاک با عملکرد یونجه و کلزا نیز به روش رگرسیون خطی بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین شاخص کیفیت تجمعی و وزنی خاک در هر دو سطح لایه شخم و خاک‌رخ، در هر دو روش PCA و EO مربوط به اراضی مرتعی و سیستم عمده مالک بود. در تمام واحدهای مدیریتی نیز شاخص وزنی محاسبه‌شده به روش EO، بیشترین کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ (به روش ضریب وزنی) را به خود اختصاص داد. ارتباط بین شاخص کیفیت خاک با عملکرد یونجه و کلزا نیز نشان داد که در مجموعه EO، شاخص وزنی خاک‌رخ (به روش ضریب وزنی) نسبت به خاک سطحی، توانسته است ارتباط بیشتری با عملکرد محصول، به‌خصوص کلزا، در سیستم مدیریتی عمده مالک (خاک سطحی) $R^2 = 0.75$ و خاک‌رخ $R^2 = 0.68$ و شرکت بینالود (خاک سطحی) $R^2 = 0.65$ و خاک‌رخ $R^2 = 0.63$ نشان دهد. ارتباط نسبتاً خوب عملکرد محصولات مورد مطالعه، با شاخص کیفیت خاک نشان داد که به‌منظور افزایش عملکرد، نیازمند یک مدیریت اصولی در جهت حفظ و بهبود کیفیت خاک، به‌خصوص در سیستم خرده‌مالکی در جهت تامین نیازهای تغذیه‌ای که نقش مهم‌تری دارند، هستیم.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مؤلفه اصلی، سامانه مدیریتی، شاخص کیفیت خاک، عملکرد محصول، کارشناس خبره

مقدمه

و بیولوژیکی خاک است؛ بنابراین توازن پایدار این فرآیندها به همراه مدیریت مناسب، موجب تداوم باروری خاک می‌شود و هر گونه اقدام در جهت بر هم زدن این تعادل، تخریب خاک را به همراه خواهد داشت. در نتیجه، نوع عملیات مدیریتی و بهره‌برداری از اراضی بایستی با در نظر گرفتن بهبود و حفظ کیفیت خاک انجام گیرد. کارلن و همکاران (Karlen et al., 1997) کیفیت خاک^۵ را به‌عنوان ظرفیت خاک به‌منظور حفظ بهره‌وری گیاهان و حیوانات، حفظ یا افزایش

از آنجا که توان تولید خاک، حاصل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک و استادان گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: karimi-a@um.ac.ir)
* - نویسنده مسئول:

۳ - موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

زیست ضروری است (Lal, 2015). اگر کشاورزان و ذینفعان به این نتیجه برسند که از طریق شیوه‌های مدیریتی خود بر کیفیت خاک تأثیرگذار هستند و با اهداف کوتاه‌مدت تولید و سودآوری، خلاف جهت حفاظت از منابع خاک عمل می‌کنند؛ آن‌گاه از طریق تعادل بین ورودی‌های تولید و کیفیت خاک و در نهایت اصلاح رویکردهای مدیریتی خود، هم به اهداف مورد نظر می‌رسند و هم کیفیت خاک را بهبود داده و حفظ کرده‌اند. به بیان دیگر، راهکارهایی که دانش کشاورزان را در مدیریت زمین دخیل می‌کنند باید توسعه و ترویج یابند؛ زیرا در خیلی از مواقع که امکان تجزیه کمی ویژگی‌های خاک برای کشاورزان مقدور نیست، با ارزیابی‌های دیداری در مزرعه، براساس تجربه و دانش کشاورزان و مشاوران می‌توان تا حدودی وضعیت کیفیت خاک مزرعه را نشان داد و بر اساس آن، مدیریت بهتری در مزرعه اعمال کرد (Abera et al., 2020).

در بین عوامل مؤثر بر مدیریت پایدار و افزایش بهره‌وری محصول، نوع عملیات مدیریتی و نظام بهره‌برداری از اراضی (Yadav et al., 2019) و ادراک و آگاهی کشاورزان (Abera et al., 2020)، هر کدام به نوعی در حفظ و بهبود کیفیت خاک، یک ویژگی مهم تلقی می‌شوند و در تعیین بهترین استفاده از اراضی تأثیرگذار هستند. در این میان، نظام‌های بهره‌برداری به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین مسایل نظام کشاورزی در بعد کلان و یا ساختاری، با مطرح کردن شیوه‌های مدیریت و به‌کارگیری منابع دیگر (مانند سرمایه و نیروی کار) می‌توانند مناسب‌ترین شرایط برای استفاده بهینه از منابع، جلب مشارکت بهره‌برداران، فراهم ساختن زمینه‌های پذیرش فناوری و جلب سرمایه در بخش کشاورزی را فراهم سازند تا با گسترش سامانه مدیریتی بهینه و مناسب با شرایط اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی مناطق، وضعیت مطلوب‌تری از نظر کاهش میزان اتلاف انرژی، هزینه‌های تولید و افزایش عملکرد حاصل شود (Alizadeh, 2015).

دشت نیشابور به‌عنوان جزئی از حوضه کال شور، که مدام تحت تأثیر رسوبات شور و سدیمی آن قرار دارد، یکی از مراکز اصلی تولید محصولات کشاورزی در استان خراسان رضوی محسوب می‌شود. در کنار خیلی از محدودیت‌های آب و خاک که در منطقه وجود دارد، به‌نظر می‌رسد که رواج سامانه خرده‌مالکی و عدم تمایل کشاورزان به یکپارچه شدن اراضی خرد، باعث افزایش بیشتر تخریب خاک‌های منطقه شده است. با توجه به گسترش کشاورزی و دامپروری در منطقه، دو نوع نظام بهره‌برداری در منطقه دایر شده است. این دو نظام شامل دو مجموعه مختلف می‌باشد: ۱- نظام بهره‌برداری تعاونی تولید روستایی که با هدف بهره‌برداری بهینه از منابع، بهبود وضعیت معیشتی و ارتقای توان اقتصادی و اجتماعی اعضاء (خرده‌مالک و عمده مالک) و در نهایت یکپارچه‌سازی و جمع‌آوری اراضی تأسیس شده است (Hoghoghi Esfahani, 2012) و ۲- نظام بهره‌برداری

کیفیت آب و هوا و حمایت از سلامت و سکونت‌گاه انسان در زیست‌بوم‌های طبیعی و مدیریت‌شده تعریف کرده‌اند. پس از آن، کیفیت خاک به‌عنوان ابزاری برای ارزیابی سامانه‌های مختلف تولید محصولات کشاورزی و باغی اهمیت پیدا کرد (Mukherjee and Lal, 2002; Andrews et al., 2014). کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و باید از شاخص‌های مربوطه استنتاج شود. توسعه شاخص کیفیت خاک شامل تعریف و گزینش ویژگی‌ها، نمره‌دهی و ادغام ویژگی‌های خاک می‌باشد (Andrews et al., 2002). با این وجود، ارزیابی کیفیت خاک به‌علت عملکردهای گوناگون و تنوع استفاده از خاک و همچنین تفاوت در ذهنیت و نگرش متعددی که کاربران از خاک دارند، متفاوت است (Vasu et al., 2016).

در ارزیابی‌های اولیه کیفیت پویای خاک، شاخص کیفیت خاک، در خاک سطحی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و بیان شرایط خاک در یک حالت خاص با توجه به کاربری زمین و شیوه‌های مدیریت است و با استفاده از شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اندازه‌گیری می‌شود. کیفیت ذاتی در خاک‌ها بوده و به فرآیندهای خاکسازي یا پدوژنیک بستگی دارد و کمتر به مدیریت خاک وابسته است. ارزیابی خصوصیات خاک سطحی ممکن است آسان باشد ولی اطلاعات ناقصی را ارائه می‌دهد. زیرا اکثر عملکردهای خاک توسط فرآیندهای خاکسازي کنترل می‌شود. لذا برای شناسایی فرآیندهای خاکسازي نیازمند مطالعه خاک‌ها هستیم. به‌علاوه، در اکثر روش‌های ارزیابی کیفیت خاک، برای انتخاب حداقل داده^۱ از بین حجم وسیعی از عوامل و ویژگی‌های مهم و مؤثر بر کیفیت خاک، از روش‌های آماری چند متغیره که به‌طور گسترده پذیرفته شده‌اند، استفاده می‌شود. با این حال، لازم است که این عوامل تأثیرگذار و داده‌های مربوطه، توسط کارشناسانی که رابطه علت و معلولی خاک را درک می‌کنند و از پیچیدگی و عملکرد چند وجهی خاک آگاهی دارند، بر اساس شناختی که از خاک منطقه و سامانه مدیریتی مورد نظر دارند، انتخاب و یا بازنگری شوند (Vasu et al., 2016).

از آنجایی که کشاورزی بطور ذاتی ناپایدار است و باعث تخریب و کاهش بهره‌وری خاک می‌شود (Lal, 1997)؛ اما بسیاری از محققان اعتقاد دارند که کشاورزان، ذینفعان و نوع استفاده از اراضی و سامانه مدیریتی در این بخش، مقصر افزایش نرخ تخریب خاک هستند. بنابراین، باید به دانش و سازگاری کشاورزان توجه کرد (Issanchou et al., 2018). از این رو، آموزش به کشاورزان و افزایش آگاهی عمومی و درک اساسی از فرآیندهای تخریب خاک، هم برای بهره‌وری طولانی‌مدت و هم برای بهبود و حفظ کیفیت خاک و محیط-

نشند (GHaemi et al., 1999). سپس با توجه به سامانه‌های مدیریتی حاکم در منطقه و کاربری‌های متفاوتی که در منطقه مشاهده شد، به کمک گوگل ارث نقشه اولیه واحدهای مدیریتی (شکل ۱) ترسیم و در مجموع ۲۱ خاک‌رخ در (اراضی شرکت بینالود با خاک‌رخ شماره P₂-P₃-P₁₆-P₁₈-P₂₀-P₂₁، اراضی عمده مالک با خاک‌رخ شماره P₇-P₈-P₁₂، اراضی خرده مالک با خاک‌رخ شماره P₆-P₁₉-P₁₃-P₁₄-P₁₅-P₁₉ و اراضی دست نخورده با خاک‌رخ شماره P₁-P₁₇-P₁₀-P₄) در کاربری‌های یونجه و کلزا حفر و پس از تشریح، از افق‌های ژنتیکی نمونه‌برداری شد (شکل ۱). سپس پرسش‌نامه‌های لازم نیز به کمک کشاورزان و کارشناسان منطقه بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ (Bagheri Asgharpoor, 2010) ، (Bodaghabadi et al., 2007) تهیه شد.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌ها پس از هوا خشک شدن و کوبیده شدن، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و برای آزمایش‌های مورد نظر، مورد استفاده قرار گرفتند. از بین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، ۱۲ ویژگی متناسب با شرایط منطقه انتخاب شدند و مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. کربنات کلسیم معادل با استفاده از روش تیتراسیون برگشتی (Piper, 1966)، pH خاک و قابلیت هدایت الکتریکی آن در عصاره گل اشباع (Thomas, 1996)، کربن آلی خاک با استفاده از روش والکی- بلک (Walkly and Black, 1934)، درصد شن و رس و سیلت به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، نیتروژن کل به روش کج‌دلال (Bremner and Mulvaney, 1982)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، پتاسیم قابل استفاده به روش استات آمونیوم (Page et al., 1982) و سدیم محلول به روش شعله‌سنجی و با استفاده از دستگاه فلیمتومتر (Page et al., 1982) و مجموع کلسیم و منیزیم به روش (Page et al., 1982) اندازه‌گیری شدند.

شاخص کیفیت خاک

به‌منظور نشان دادن نقش فعالیت‌های انسان و نوع سامانه مدیریتی در روند کاهش و یا بهبود کیفیت خاک، شاخص کیفیت خاک برای سامانه‌های مدیریتی حاکم در منطقه در دو عمق لایه شخم و خاک‌رخ (صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متر)، در سه مرحله ۱- انتخاب ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، ۲- نمره‌دهی به معیارها به‌منظور هم‌واحدکردن ویژگی‌های مختلف به روش خطی و ۳- ادغام معیارها به دو روش تجمعی و وزنی برای رسیدن به شاخص نهایی انجام شد.

سهامی عام که متعلق به شرکت کشاورزی و دامپروری بینالود (زیرمجموعه هلدینگ بنیاد مستضعفان) است که به‌عنوان واحد خصوصی (مدیریتی - اقتصادی) این منطقه به‌شمار می‌رود، شرکت بینالود با نگرش بهبود مستمر تولید، به دنبال عرضه محصولات با کیفیت در رشته دامپروری و کشاورزی با اجرای طرح یکپارچه‌سازی و تجمیع اراضی می‌باشد. با توجه به بازدیدهای صحرائی و بررسی‌های انجام‌شده، به‌نظر می‌رسد که این تفاوت در سامانه مدیریتی می‌تواند در میزان افزایش عملکرد و کیفیت خاک و کاهش توسعه تخریب خاک اثرگذار باشد. بنابراین، با توجه به لزوم اتخاذ تصمیم‌های صحیح در مصرف عوامل تولید، این مطالعه با هدف بررسی تأثیر سامانه‌های بهره‌وری مختلف بر شاخص‌های کیفیت خاک^۱ در بخش خاک سطحی و خاک‌رخ (عمق ۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر) و ارتباط آن‌ها با عملکرد محصول در دشت نیشابور انجام شد.

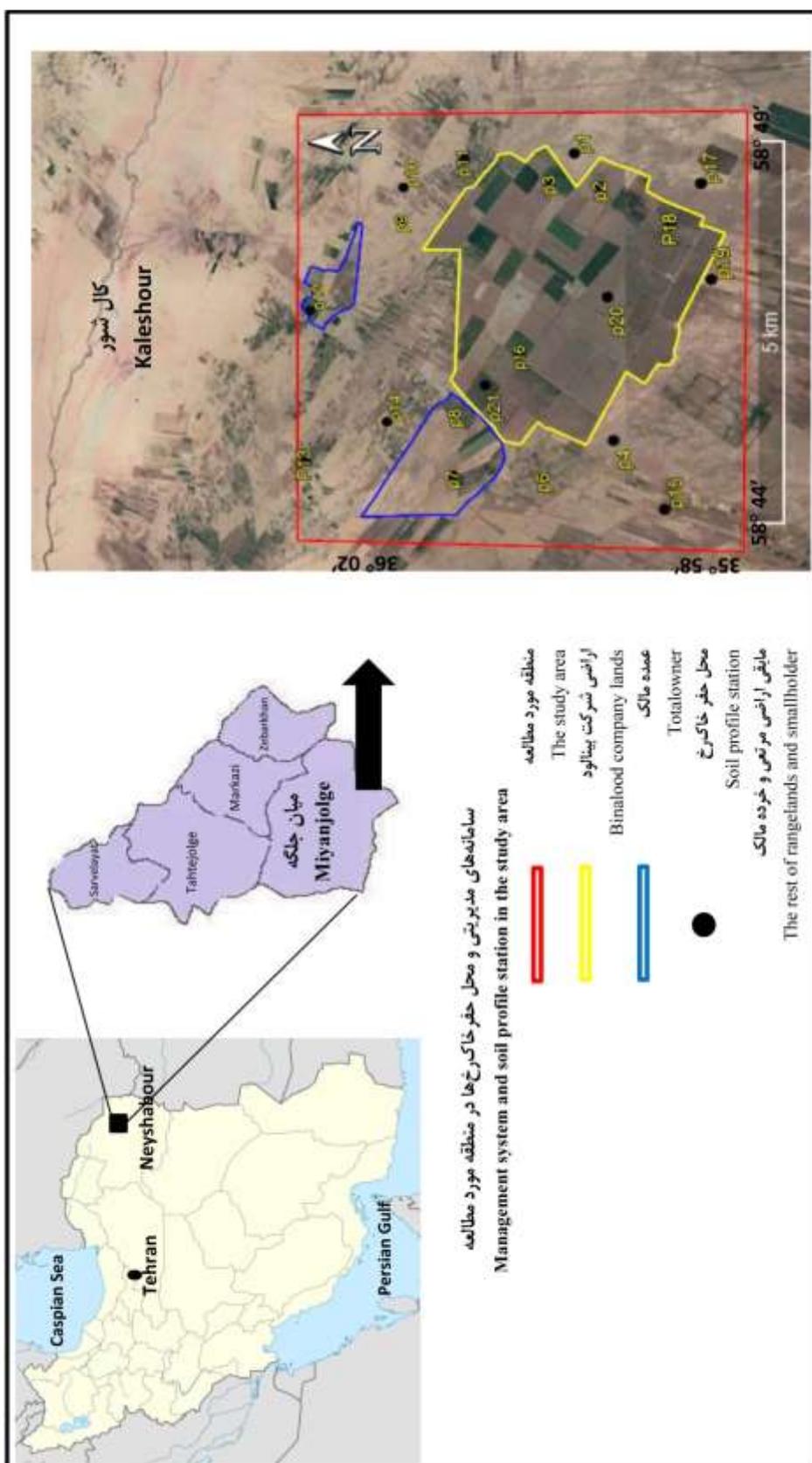
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه به وسعت ۵۱ کیلومتر مربع (۵۱۸۵ هکتار) در مختصات "۰۰'۴۴'۵۸" تا "۳۱'۴۹'۵۸" شرقی و "۱۵'۵۴'۳۵" تا "۲۲'۰۳'۳۶" شمالی قرار دارد (شکل ۱). کاربری عمده منطقه شامل اراضی مرتعی و کشاورزی است. در این محدوده سه واحد مدیریتی خرده‌مالک با مساحت ۲۱۲۷ هکتار (تیپ بهره‌وری پنبه، کلزا و یونجه به‌صورت کشت سنتی)، عمده مالک شخصی با مساحت ۳۴۰ هکتار (تیپ بهره‌وری یونجه و کلزا به‌صورت کشت نیمه‌مکانیزه) و اراضی شرکت کشاورزی و دامپروری بینالود با مساحت ۱۲۱۵ هکتار (تیپ بهره‌وری یونجه، کلزا، ذرت علوفه‌ای و جو به‌صورت مکانیزه) وجود دارد. اقلیم منطقه، نیمه‌خشک با میانگین دمای سالیانه، ۱۴/۳۳ درجه سلسیوس و متوسط بارندگی سالیانه، ۲۴۰ میلی‌متر در یک دوره آماری ۱۰ ساله (۱۳۸۸ تا ۱۳۹۸) می‌باشد. همچنین، میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا، ۱۲۱۳ متر است. وجود سازندهای متشکل از رسوبات تبخیری نتوژن در حاشیه دشت‌ها و اراضی پست باعث ایجاد آبخوان‌های شور در مجاورت آبخوان‌های شیرین در انتهای دشت‌ها شده است. این رسوبات در اکثر دشت‌ها باعث شوری آب‌های زیرزمینی و به دنبال آن، شوری اراضی کشاورزی که با این آب‌ها آبیاری می‌گردند، شده است.

مطالعات ستادی و صحرائی

ابتدا با توجه به نقشه زمین‌شناسی به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، منطقه از نظر ماده مادری بررسی شد و تفاوتی از نظر ماده مادری مشاهده



شکل ۱- موقعیت سامانه‌های مدیریتی و محل حفر خاک‌رخ‌ها در دشت نیشابور، شمال شرق ایران
Figure 1- The location of the soil profile and management system in Neyshabour plain, northeastern Iran

(al., 2019).

تمامی ویژگی‌ها در دو سطح لایه شخم و خاک‌رخ به روش نمره‌دهی خطی، بین صفر تا یک در سه گروه زیر، بخش‌بندی شدند:

۱- هرچه بیشتر، بهتر مانند ماده آلی با استفاده از معادله (۱)

۲- هرچه کمتر، بهتر مانند شوری، سدیم محلول و نسبت جذب سطحی سدیم) با استفاده از معادله (۲)

۳- حد بهینه، مانند pH، درصد شن و سیلت و رس، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده و کربنات کلسیم

سپس ویژگی‌ها، براساس مقادیر بهینه موجود در منابع (Malakoti, 2014) امتیاز دهی شدند. در این حالت، اگر مقدار متغیر از حد بهینه بیشتر بود، از معادله ۲ و اگر مقدار متغیر از حد بهینه کمتر بود، از معادله ۱ برای امتیازدهی استفاده شد. با توجه به اینکه مقادیر pH، شن، رس و کربنات کلسیم معادل در منطقه مورد مطالعه، از حد بهینه بیشتر بودند؛ از معادله ۲ برای این ویژگی‌ها استفاده شد. همچنین برای سیلت، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، با توجه به کمتر بودن مقدار آن‌ها از حد بهینه، از معادله ۱ استفاده گردید.

$$SL = (x - m) / (n - m) \quad (۱) \text{ معادله}$$

$$SL = 1 - ((x - m) / (n - m)) \quad (۲) \text{ معادله}$$

که SL نمره تعلق گرفته به هر ویژگی، x ویژگی مورد نظر، m کمترین و n بیشترین مقدار ویژگی مورد نظر می‌باشند (Askari and Holden, 2015).

بعد از نمره‌دهی و بدون بُعد کردن ویژگی‌ها، به دو روش زیر، ویژگی‌های مزبور تلفیق شدند و شاخص کیفیت خاک (SQI) محاسبه گردید (Liu et al., 2014):

۱- تجمعی ساده

$$SQI_A = \sum_{i=1}^n si / n \quad (۳) \text{ معادله}$$

۲- تجمعی وزنی

$$SQI_W = \sum_{i=1}^n si \times wi \quad (۴) \text{ معادله}$$

که SQI_A و SQI_W به ترتیب، شاخص تجمعی و وزنی کیفیت خاک، S_i نمره تعلق گرفته به هر ویژگی، n تعداد ویژگی و W_i وزن تعلق گرفته به هر ویژگی هستند.

به منظور تعیین وزن تعلق یافته به ویژگی‌های خاک برای مجموعه MDS، سهم هر ویژگی یا واریانس مشترک محاسبه شد. سپس نسبت مقدار سهم هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم کل ویژگی‌ها در مجموعه مورد نظر، به عنوان وزن آن ویژگی برای محاسبه شاخص

برای رسیدن به یک مقدار واحد از هر ویژگی در خاک‌رخ‌های مورد مطالعه، ابتدا به کمک دو روش میانگین وزنی و ضریب وزنی، میانگین ویژگی‌ها محاسبه شد. در روش ضریب وزنی، عمق مورد نظر به چهار قسمت مساوی شامل ۰-۲۵، ۲۵-۵۰، ۵۰-۷۵ و ۷۵-۱۰۰ تقسیم گردید و به هر قسمت، یک شاخص تصحیح عمق که به آن ضریب وزنی می‌گویند اختصاص داده شد (Sys et al., 1991). ضرایب وزنی مورد استفاده برای چهار عمق مذکور، به ترتیب از سطح به عمق خاک، شامل ۱/۷۵، ۱/۲۵، ۰/۷۵ و ۰/۲۵ بودند.

مرحله ۱: انتخاب مجموعه حداقل داده

هدف اصلی انتخاب حداقل داده، کاهش تعداد متغیرها به یک مجموعه کوچک‌تر است، به نحوی که این مجموعه کوچک، بیشترین تغییرات موجود در داده‌ها را تبیین کند و اطلاعات موجود در متغیرها نیز حفظ شود. این مرحله، خود به دو شیوه زیر انجام گرفت:

الف- انتخاب حداقل داده بر اساس نظر کارشناسان خبره

منطقه (EO, MDS-1)

انتخاب حداقل داده در این روش منوط به نظر کارشناس، دید میدانی و آگاهی و تجربه او از روابط پیچیده خاک بود. بر این اساس، بعد از حضور در منطقه و تهیه پرسش‌نامه، متغیرهای مورد نظر توسط کارشناس مربوطه که سال‌هاست در منطقه مورد نظر، فعالیت دارند و در جریان محدودیت‌های بخش کشاورزی (به خصوص آب و خاک) هستند و همچنین در زمینه توزیع نهاده‌های کشاورزی و دامی فعال هستند و از طرفی در جریان مسایل اجتماعی و اقتصادی کشاورزان منطقه می‌باشند، انتخاب شده‌اند و براساس فراوانی متغیرها، برتری‌ها مطابق پرسش‌نامه فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، بین ۱ تا ۹ تعیین شد. با توجه به برتری‌های ارائه شده، اهمیت هر عامل و برتری آن نسبت به عوامل دیگر، تعیین گردید و براساس ماتریس مقایسات زوجی، وزن دهی به هر متغیر انجام شد (Mandal et al., 2020).

ب- انتخاب حداقل داده به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

(PCA-MDS-2)

در این روش، حداقل داده برای لایه شخم و همچنین برای خاک‌رخ، با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۲)، محاسبه شد. به منظور کاهش تعداد مؤلفه‌ها و انتخاب MDS، از آزمون اسکری (Andrews and Carroll, 2001) استفاده شد. در هر مؤلفه اصلی، تنها متغیرهایی که مقادیر قدرمطلق وزنشان، جزء ۱۰ درصد بالاترین وزن متغیر بودند، به عنوان MDS در نظر گرفته شدند (Hemmati et

1- Additive

2- Weighted

کیفیت خاک در نظر گرفته شد (Masto et al., 2008). در انتها، میانگین شاخص کیفیت خاک‌ها معادل با میانگین شاخص کیفیت خاک هر واحد مدیریتی در نظر گرفته شد.

بعد از محاسبه شاخص کیفیت خاک، به منظور صحت ارزیابی و بررسی وضعیت خاک برای تولید، با برقراری یک ارتباط رگرسیونی بین متوسط عملکرد مشاهده شده یونجه و کلزا (تن در هکتار در سال) و شاخص کیفیت خاک در سامانه‌های مدیریتی مورد نظر، سامانه مدیریتی مناسب‌تر، به منظور کنترل تخریب و حفظ و بهبود کیفیت خاک، با توجه به شرایط اجتماعی و اقتصادی منطقه، انتخاب شد.

نتایج و بحث

توصیف آماری ویژگی‌های خاک

خلاصه برخی آماره‌های توصیفی برای ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. از آنجا که ضریب تغییرات کمتر از ۱۰ درصد، دلالت بر تغییرپذیری پایین ویژگی مورد نظر و ضریب تغییرات بالاتر از ۹۰ درصد، بیانگر تغییرپذیری بالای آن دارد (Zhang et al., 2007). بر این اساس، اکثر ویژگی‌های خاک سطحی به جز کربنات کلسیم معادل و pH که در منطقه مورد نظر و اکثر مناطق خشک و نیمه خشک مشابه منطقه مورد مطالعه، توزیع و روند ثابتی دارند و تابع اقلیم و ماده مادری هستند (Salardini, 1739)، تغییرپذیری بیشتری نسبت به ویژگی‌های عمقی دارند. تغییرپذیری نیتروژن، پتاسیم، فسفر و ماده آلی، به عنوان ویژگی‌هایی از خاک که نقش مهمی در عملکرد محصول و کیفیت خاک دارند، بیشتر از سایر ویژگی‌ها تحت تأثیر مدیریت است؛ ولی تغییرپذیری قابلیت هدایت الکتریکی، سدیم محلول و نسبت جذب سطحی سدیم، بیشتر تابع کیفیت آب آبیاری و رسوبات کال شور می‌باشند. انحراف معیار و پراکندگی ویژگی‌های ذکر شده نیز دلالت بر این مهم دارد که رسوبات کال شور، نقش مهمی در تغییرات و پراکندگی آن‌ها در منطقه دارد، تا جایی که با دور شدن از کال شور و همچنین تغییر در سامانه مدیریتی، ویژگی‌های مورد مطالعه توزیع متفاوتی در هر دو سطح دارند (جدول ۲). خاک‌رخ شماره ۱۰ با کاربری مرتع (نزدیکترین خاک‌رخ به کال شور) به علت رسوبات کال شور بیشترین مقدار سدیم، رس و قابلیت هدایت الکتریکی را دارد که با دور شدن از کال شور به تدریج بافت خاک درشت‌تر و شنی می‌شود، ولی قابلیت هدایت الکتریکی خاک با توجه به کیفیت آب آبیاری و مقدار عناصر نیتروژن، پتاسیم و فسفر با توجه به سامانه مدیریتی، به ویژه مقدار و نوع کوددهی تغییر می‌کند. در ادامه همان طور که جدول شماره ۲ نشان می‌دهد، اراضی مرتعی در هر دو سطح، بیشترین میزان ماده آلی را به علت عدم کشت و کار نسبت به اراضی کشاورزی دارند. با این وجود، فقدان ماده آلی در اکثر خاک‌رخ‌ها به عنوان عامل مهمی که در

تأمین رطوبت و پایداری خصوصیات فیزیکی خاک نقش دارد و همچنین نقش مهمی بر کاهش عملکرد خواص هیدرولیکی خاک، نفوذپذیری ریشه و آب و خصوصیات خاک‌رخ و در نهایت بهره‌وری محصول دارد، بایستی مورد توجه کشاورزان و مدیران واقع شود. وجود کربنات کلسیم در خاک، به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک به علت بارندگی کم، نباید خیلی نگران کننده باشد؛ ولی به همراه سدیم، به ویژه در لایه‌های زیرین خاک‌رخ‌های بالادست که بیشتر تحت تأثیر رسوبات کال شور هستند، می‌تواند منجر به تشکیل کربنات سدیم شود؛ در نتیجه، pH خاک افزایش و جذب عناصر کم مصرف کمتر شود. به علت عادت کشاورزان در توجه ویژه به کودهای فسفاته به نسبت سایر کودها، بالابودن مقدار فسفر در اراضی کل مالک و شرکت بینالود، و از طرفی پایین بودن مقدار پتاسیم در این اراضی نیز با توجه به جذب زیاد پتاسیم توسط گیاه یونجه بایستی مورد توجه مدیران و کارشناسان منطقه به منظور توصیه اصولی کود قرار گیرد. کاهش عمق در اراضی بالادست، ریزبودن بافت خاک به علت مقدار بالای رس و نفوذپذیری کم نسبت به ریشه و آب منجر به کاهش رطوبت در طول دوره رشد و اختلال در بهره‌وری محصول می‌شود که این امر نیز بایستی مورد توجه مدیران و کشاورزان قرار گیرد تا با مدیریت آگاهانه و آگاهی داشتن از عملکردهای خاک و نقش مدیریت در این عملکردها، ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک را به محدوده بهینه‌شان نزدیک کنند تا به بهره‌وری مورد نظر همراه با بهبود و یا حفظ کیفیت خاک دست پیدا کنند.

شاخص کیفیت خاک

الف- انتخاب حداقل داده به روش EO

بر اساس نتایج روش EO، از بین ۱۲ ویژگی مؤثر بر کیفیت خاک منطقه (جدول ۱)، به ترتیب برتری، پنج ویژگی قابلیت هدایت الکتریکی، ماده آلی، فسفر قابل استفاده، پتاسیم قابل استفاده و نیتروژن کل به عنوان مهم‌ترین ویژگی‌هایی که نماینده بهتری از عوامل مؤثر بر کیفیت خاک و بهره‌وری محصول در منطقه هستند و از سوی دیگر، سامانه مدیریتی بر تغییرپذیری آن‌ها تأثیرگذارتر از اقلیم و ماده مادری است و می‌تواند تغییرات کیفیت خاک را بهتر توصیف نمایند، توسط کارشناسان خبره، بررسی و انتخاب شدند. کربنات کلسیم معادل و pH با توجه به این که پراکندگی یکنواختی دارند و جزء لاینفک خاک‌های منطقه هستند و بیشتر تابع اقلیم و ماده مادری هستند، توسط کارشناسان به عنوان MDS انتخاب نشدند. افزون بر این، مقدار کربنات کلسیم معادل، به خصوص در خاک‌های منطقه و مناطق مشابه با اقلیم خشک و نیمه خشک، از نظر شیمیایی چندان فعال نیست و نمی‌تواند به اندازه خیلی از عوامل مهم دیگر مانند کم آبی، نوع نگرش و سوء مدیریت کشاورزان، مشاوران و

مسئولان مربوطه، رابطه‌ای با کم شدن عملکرد محصول داشته باشد؛ چرا که خاک‌های مرتعی یا به نوعی مالی‌سول‌ها نشان داده‌اند که با وجود داشتن کربنات کلسیم (آهک) فراوان، جزو بارورترین خاک‌ها هستند (Salardini, 1739). علاوه بر این، با توجه به فیزیوگرافی منطقه و فرآیندهای فرسایش و رسوبی که در منطقه رخ می‌دهد، مقدار شن، سیلت، رس و سدیم محلول نیز به‌عنوان MDS انتخاب نشدند. بنا بر نظر کارشناسان منطقه، تغییر دادن این ویژگی‌ها و نزدیک کردنشان به حد بهینه با توجه به هزینه بالا و مصرف انرژی زیاد، به اندازه بهبود شیوه‌های مدیریتی به‌منظور رسیدن به عملکرد مطلوب و حفظ کیفیت خاک لازم و ضروری نیست و لازم است نگرش کشاورزان و ذینفعان را به این سمت و سو سوق داد که با آب آبیاری شور، در خاکی سدیمی با بافتی درشت یا ریزولی با مدیریت صحیح می‌توان عملکرد را به شرط پایداری افزایش داد.

ب- انتخاب حداقل داده به روش PCA

انتخاب حداقل داده به روش PCA در لایه ششم

در این روش معمولاً مؤلفه‌هایی که مقدار قابل توجهی از پراکندگی داده‌ها را در نظر می‌گیرند و دارای ارزش ویژه بزرگ‌تر یا مساوی یک هستند به‌عنوان مؤلفه‌های اول انتخاب می‌شوند. در این سطح، چهار مؤلفه که دارای مقادیر ارزش ویژه بزرگتر از یک بودند، انتخاب شدند. بر این اساس، هر یک از این مؤلفه‌ها به‌صورت جداگانه به ترتیب ۳۳/۸۸، ۲۲/۹۶، ۱۳/۲۲ و ۱۰/۱۸ درصد از تغییرات واریانس و در مجموع ۸۰/۲۶ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند (جدول ۳).

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 1- Descriptive statistics of the soil properties in the study area

ویژگی‌های خاک Soil properties	سطحی Surface			خاک‌رخ Soil profile				
	میانگین Mean	انحراف معیار Std.dev	دامنه Range	ضریب تغییرات CV (%)	میانگین Mean	انحراف معیار Std.dev	محدوده Range	ضریب تغییرات CV (%)
سدیم Na (meq/l)	6.5	4.2	5.1-13	53	8.1	5.3	8.2-13.60	37
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)	4.2	6.4	3-9.28	69	4.4	1.1	3.3-7.6	24
نیتروژن کل N (mg/kg)	31	5	20-40	50	23	3	10-35	8
فسفر قابل استفاده P (mg/kg)	9	5.5	3-15	51	6	2.17	2-10.5	27
پتاسیم قابل استفاده K (mg/kg)	140	5.50	70-280	56	70	533	50-225	34
سیلت Silt (%)	22.70	7.3	11-38	58	21.84	5.80	13-38	26
شن Sand (%)	68	7.9	50-82	67	58.15	11.75	34-78	20
رس Clay (%)	9.5	6.4	2-25	53	18.96	9.4	7-45	44
کربن آلی OC (%)	0.30	5.1	0.30-0.37	58	0.18	4.8	0.18-0.28	31
کربنات کلسیم معادل CCE (%)	17.6	2.50	12-22	14	15.87	2.3	13-21	14
نسبت جذب سطحی سدیم SAR	2.1	1.70	0.2- 5.40	51	2.82	1.65	1.15-6.20	42
اسیدیته pH	7.80	0.12	7.50 - 8	9	7.7	0.36	6.7-8.4	4

جدول ۲- میانگین ویژگی‌های خاک خاک‌رخ‌های شاهد در مدیریت‌های مختلف

Table 2- Mean values properties of the representative soil profiles in different management systems

شماره پروفیل Soil profile No.	سطحی Surface				خاک‌رخ Soil profile			
	P10	P13	P12	P2	P10	P13	P12	P2
سامانه مدیریتی Management system	اراضی مرتعی Range land	خرده‌مالک Smallholder	عمده مالک total owner	اراضی بینالود Binalood company	اراضی مرتعی Range land	خرده‌مالک Stallholder	عمده مالک total owner	اراضی بینالود Binalood company
سدیم Na (meq /l)	11	5.65	5.4	6.1	7.6	6.40	5.4	6
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/ m)	9.3	4.55	4.1	3.6	4.7	4.3	4.13	3.3
نیترژن N (mg/ kg)	13	21	28	36	13	16	20	30
فسفر P (mg/ kg)	2	4	12	10	5	6	7	8
پتاسیم K (mg/ kg)	63	66	215	230	60	67	180	178
سیلت Silt (%)	10	8	13	18	12	12	10	12
شن Sand (%)	30	34	40	68	40	38	44	53
رس Clay (%)	60	58	47	14	48	50	46	35
کربن آلی OC (%)	0.37	0.30	0.36	0.36	0.28	0.18	0.20	0.20
کربنات کلسیم معادل CCE (%)	21.25	18.5	16.8	15	16.30	15.5	14.30	16.40
نسبت جذب سطحی سدیم SAR	5.45	1.8	1.65	0.9	0.5	0.30	0.20	0.2
pH	8	7.9	7.7	7.7	7.7	7.65	7.75	7.7

دارای بزرگترین بردار ویژه هستند، به‌عنوان حداقل داده انتخاب شدند (جدول ۳).

انتخاب حداقل داده به روش PCA در خاک‌رخ (ضریب وزنی)

در این سطح، پنج مؤلفه به‌عنوان مؤلفه اول انتخاب شدند. هر یک از این پنج مؤلفه، جداگانه ۳۰/۵۵، ۱۹/۱۰۰، ۱۴/۷۹، ۱۰/۲۴، ۹/۴۳ درصد از تغییرات واریانس و در مجموع ۸۴/۱۲ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند (جدول ۵). در مؤلفه اول، سدیم محلول، بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، از بین سایر متغیرها در این مؤلفه، سیلت بیشترین وزن را دارا می‌باشد که در ادامه با توجه به همبستگی ۰/۶۰ بین این دو پارامتر (جدول ۶)، سیلت از مجموعه حداقل داده حذف گردید.

در مؤلفه اول، قابلیت هدایت الکتریکی، بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر (Hemmati et al., 2019)، شن بیشترین وزن را به خود اختصاص داد که در ادامه با استفاده از ضریب همبستگی (جدول ۴)، از میان متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با هم‌دیگر دارند، متغیری که وزن بیشتری دارد، انتخاب و بقیه حذف گردیدند. با توجه به ضریب همبستگی ۰/۵۶ بین مقدار شن و قابلیت هدایت الکتریکی و بالا بودن وزن قابلیت هدایت الکتریکی نسبت به مقدار شن، قابلیت هدایت الکتریکی در مجموعه باقی ماند و شن حذف گردید. در مؤلفه دوم، کربن آلی دارای بیشترین وزن است و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، نیترژن بیشترین وزن را به خود اختصاص داد که در ادامه با توجه به ضریب همبستگی ۰/۶۴ بین آن‌ها و وزن بیشتر کربن آلی نسبت به نیترژن، نیترژن حذف و کربن آلی در مجموعه باقی ماند. در مؤلفه سوم درصد رس و در مؤلفه چهارم pH با توجه به بالا بودن وزنشان، به‌عنوان تنها متغیرهایی که

جدول ۳- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های سطحی مؤثر بر کیفیت خاک برای چهار مؤلفه اول

Table 3- Results of four principal component analysis of the surface soil properties affecting soil quality

Principal components	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4
بردار ویژه Eigen value	4.067	2.756	1.587	1.222
واریانس % Variance	33.88	22.96	13.22	10.18
واریانس تجمعی % Cumulative variance	33.88	56.85	70.07	80.26
Factor loadings (Rotated component matrix)				
سدیم Na (meq/L)	0.607	-0.689	0.185	0.192
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS/m)	<u>0.878</u>	-0.388	-0.104	0.063
سیلت Silt (%)	0.779	0.131	-0.571	-0.056
شن Sand (%)	-0.870	-0.251	-0.005	0.363
رس Clay (%)	0.216	0.189	<u>0.782</u>	-0.456
نیتروژن N(mg/ kg)	0.050	0.762	0.100	0.354
پتاسیم K (mg/ kg)	0.619	0.125	0.197	-0.399
فسفر P (mg /kg)	-0.452	0.567	0.398	0.116
ماده آلی OC (%)	0.414	<u>0.769</u>	0.106	0.070
کربنات کلسیم معادل CCE (%)	0.779	0.250	0.137	0.208
نسبت جذب سطحی سدیم SAR	0.209	-0.623	0.603	0.316
pH	0.505	0.235	0.120	0.627

اعداد پررنگی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است به عنوان MDS انتخاب شده‌اند.

Underlined bold values were selected for MDS.

جدول ۴- ماتریس ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن برای چهار مؤلفه اول

Table 4- Correlations matrix (Pearson) for the highly weighted variables under the first four component

Parameter	EC	Sand	Clay	N	pH	OC
EC	1					
Sand	-0.56**	1				
Clay	-0.02	-0.45*	1			
N	0.31	-0.62*	0.32	1		
pH	0.20	-0.28	0.08	0.15	1	
OC	0.10	-0.51*	0.24	0.64**	0.39	1

** معنی‌دار بودن رابطه همبستگی در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

** Correlation is significant at the 0.01 probability level.

انتخاب حداقل داده به روش PCA در لایه خاکرخ (میانگین وزنی)

در این سطح نیز چهار مؤلفه با مقادیر ارزش ویژه بزرگتر از یک انتخاب شدند. هر یک از این چهار مؤلفه، جداگانه ۳۸/۵۸، ۱۸/۲۸، ۱۱/۸۰، ۱۰/۲۳ درصد از تغییرات واریانس و در مجموع ۷۸/۹۱ درصد از واریانس کل را توجیه می‌کنند (جدول ۷).

در مؤلفه دوم رس، در مؤلفه سوم ماده آلی و در مؤلفه چهارم pH با توجه به بالا بودن وزنشان، به‌عنوان تنها متغیرهایی که دارای بزرگترین بردار ویژه هستند، به‌عنوان حداقل داده انتخاب شدند. در مؤلفه پنجم، فسفر قابل استفاده، بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، از بین سایر متغیرها در این مؤلفه، پتاسیم بیشترین وزن را دارا می‌باشند. در ادامه با توجه به عدم همبستگی بین این دو متغیر و بالا بودن وزن فسفر و اهمیت پتاسیم در تغذیه گیاه، هر دو متغیر به‌عنوان حداقل داده انتخاب شدند (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ویژگی‌های خاکرخ (ضریب وزنی) مؤثر بر کیفیت خاک برای پنج مؤلفه اول

Table 5- Results of five principal component analysis of the soil profile properties (weight factor) affecting soil quality

Principal components	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4	مؤلفه پنجم PC5
بردار ویژه Eigen value	3.66	2.29	1.77	1.23	1.13
واریانس % Variance	30.55	19.100	14.79	10.24	9.43
واریانس تجمعی %Cumulative variance	30.55	49.65	64.43	74.69	84.12
Factor loadings (Rotated component matrix)					
سدیم Na (meq/ l)	<u>0.830</u>	0.201	-0.296	0.256	-0.180
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS /m)	0.555	0.492	-0.392	0.037	0.254
سیلت Silt (%)	0.808	-0.121	0.162	-0.226	-0.053
شن Sand (%)	-0.656	0.680	-0.135	0.081	-0.096
رس Clay (%)	0.239	<u>-0.842</u>	-0.022	0.044	0.133
نیترژن N(mg/ kg)	0.444	0.344	0.555	0.286	-0.0399
پتاسیم K (mg /kg)	0.626	0.110	0.205	-0.485	<u>-0.464</u>
فسفر P (mg/ kg)	-0.344	0.684	0.127	0.132	<u>0.497</u>
کربن آلی OC (%)	0.124	0.225	<u>0.892</u>	-0.107	-0.208
کربنات کلسیم معادل CCE (%)	0.546	0.148	0.259	0.285	0.427
نسبت جذب سطحی سدیم SAR	0.688	0.220	-0.448	0.293	-0.236
pH	-0.121	-0.381	0.243	<u>0.768</u>	0.318

اعداد پررنگی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است به‌عنوان MDS انتخاب شده‌اند.

Bold face factor loadings were considered highly weighted and underlined were retained in MDS.

جدول ۶- ماتریس ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن برای پنج مؤلفه اول

Table 6- Correlation matrix for the highly weighted variables under the first 5 components

Parameter	Na	Silt	Clay	K	P	OC	pH
Na	1						
Silt	0.60**	1					
Clay	0.03	0.18	1				
K	0.23	0.61*	0.08	1			
P	-0.21	-0.30	-0.47*	0.05	1		
OC	-0.08	0.20	-0.13	0.17	0.10	1	
pH	-0.09	-0.07	0.29	-0.25	0.11	-0.08	1

** معنی‌دار بودن رابطه همبستگی در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

**Correlation is significant at the 0.01 probability level.

جدول ۷- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی برای ویژگی‌های خاک‌رخ (میانگین وزنی) مؤثر بر کیفیت خاک برای چهار مؤلفه اول

Table 7- Results of principal component analysis for profile soil quality indicators (weighted average) for the four component

Principal components	مؤلفه چهارم			
	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4
بردار ویژه Eigen value	4.63	2.19	1.41	1.22
واریانس % variance	38.58	18.28	11.80	10.23
واریانس تجمعی % Cumulative variance	38.58	56.87	68.67	78.91
Factor loadings (Rotated component matrix)				
سدیم Na (meq/L)	<u>0.867</u>	0.278	0.270	-0.046
قابلیت هدایت الکتریکی EC (dS /m)	0.672	0.333	0.351	-0.055
سیلت Silt (%)	0.783	-0.277	0.173	-0.113
شن Sand (%)	-0.528	0.800	0.038	-0.035
رس Clay (%)	0.146	<u>-0.821</u>	0.243	0.255
نیترژن N (mg/ kg)	0.558	0.049	-0.384	<u>-0.638</u>
پتاسیم K (mg /kg)	0.616	-0.292	-0.241	-0.441
فسفر P (mg/ kg)	-0.553	0.398	0.037	0.319
کربن آلی OC (%)	0.681	0.084	-0.339	0.546
کربنات کلسیم معادل CCE (%)	0.659	0.457	-0.291	-0.175
نسبت جذب سطحی سدیم SAR	0.787	0.391	0.215	-0.078
pH	0.019	0.044	<u>0.823</u>	0.326

اعداد پررنگی که زیر آن‌ها خط کشیده شده است به عنوان MDS انتخاب شده‌اند.

Bold face factor loadings were considered highly weighted and underlined were retained in MDS

جدول ۸- ماتریس ضرایب همبستگی برای مؤلفه‌هایی با بیشترین وزن برای چهار مؤلفه اول

Table 8- Correlations matrix s for the highly weighted variables under the first 4 component

parameter	Na	Sand	Clay	N	SAR	pH
Na	1					
Sand	-0.27	1				
Clay	0.00	-0.80**	1			
N	0.38	-0.23	0.05	1		
SAR	0.72**	0.34	-0.25	0.08	1	
pH	0.13	0.14	0.15	-0.18	0.21	1

** معنی‌دار بودن رابطه همبستگی در سطح احتمال یک درصد را نشان می‌دهد.

** Correlation is significant at the 0.01 probability level.

وزنی محاسبه شده به روش EO بیشترین کیفیت خاک سطحی را به دلیل اختصاص وزن مناسب برای ویژگی‌های خاک، به خود اختصاص داده است. در مجموعه EO، بیشترین کیفیت خاک سطحی در شاخص تجمعی و وزنی مربوط به مدیریت عمده مالک شخصی و در مجموعه PCA، بیشترین کیفیت خاک سطحی در شاخص تجمعی و وزنی به ترتیب مربوط به اراضی مرتعی به علت عدم کشت و کار و حفظ ماده آلی به نسبت اراضی کشاورزی و سیستم عمده مالک به علت بالا بودن بنیه اقتصادی و به کارگیری روش‌های اصولی و کارشناسی شده به نسبت سیستم خرده‌مالکی است. بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال پنج درصد، در شاخص وزنی کیفیت خاک سطحی، بین سامانه‌های مدیریتی مختلف، تفاوت معنی‌داری وجود دارد (Between groups, p-value = 0.00). در هر واحد مدیریتی نیز بین شاخص وزنی کیفیت خاک هر دو مجموعه با شاخص تجمعی اختلاف معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ مشاهده شد (Within groups, p-value = 0.03).

در مؤلفه اول، سدیم محلول، بیشترین وزن را دارد که بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، نسبت جذب سطحی سدیم، نسبت به سایر متغیرها در این مؤلفه، دارای بیشترین وزن است که با توجه به همبستگی ۰/۷۲ درصد بینشان (جدول ۸)، نسبت جذب سطحی سدیم از مجموعه حذف و سدیم در دسته حداقل داده باقی ماند. در مؤلفه دوم، شن بیشترین وزن را دارد و بر اساس ۱۰ درصد وزن این متغیر، رس بیشترین وزن را به خود اختصاص داد که بر اساس همبستگی بینشان (۰/۸۰ درصد) شن حذف و رس در مجموعه حداقل داده باقی ماند. در مؤلفه سوم، pH و در مؤلفه چهارم، نیتروژن به عنوان تنها متغیرهایی که دارای بزرگترین بردار ویژه هستند، با توجه به بالا بودن وزنشان، به عنوان حداقل داده انتخاب شدند (جدول ۷).

شاخص کیفیت خاک سطحی و خاک‌رخ مجموعه MDS در سامانه‌های مدیریتی مختلف

بر اساس نتایج جدول ۹، در تمام سامانه‌های مدیریتی، شاخص

جدول ۹- شاخص کیفیت خاک در سامانه‌های مدیریتی مختلف در مجموعه MDS

Table 9- Soil quality index of the different management units in the MDS

management system	تجزیه به مؤلفه اصلی				نظر کارشناس							
	PCA				EO							
	خاک‌رخ				خاک‌رخ							
	Soil profile				Soil profile							
	ضریب وزنی		میانگین وزنی		سطحی Surface	ضریب وزنی		میانگین وزنی		سطحی Surface		
	تجمعی Add	وزنی Wi	تجمعی Add	وزنی Wi		تجمعی Add	وزنی Wi	تجمعی Add	وزنی Wi	تجمعی Add	وزنی Wi	
اراضی مرتعی Range lands	0.58	0.59	0.53	0.56	0.64	0.45	1.03	0.46	0.69	0.58	0.58	1.01
اراضی بینالود Binalood company	0.57	0.56	0.49	0.53	0.49	0.48	0.89	0.56	0.88	0.52	0.52	0.86
کل مالک Total owner	0.59	0.59	0.57	0.61	0.52	0.53	1.05	0.58	0.93	0.56	0.56	0.90
خرده‌مالک Small holder	0.55	0.54	0.48	0.52	0.47	0.47	0.90	0.56	0.90	0.50	0.50	0.75

در هر دو مجموعه EO و PCA، شاخص وزنی کیفیت در خاک‌رخ، مربوط به واحد مدیریتی عمده مالک شخصی و اراضی مرتعی در روش ضریب وزنی است. بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن در سطح احتمال پنج درصد، در روش EO بین سامانه‌های مدیریتی مختلف از نظر شاخص وزنی کیفیت خاک‌رخ، تفاوت معنی‌داری وجود دارد (Between groups, p-value = 0.03). در هر واحد مدیریتی نیز بین شاخص وزنی کیفیت خاک‌رخ (میانگین وزنی و ضریب وزنی) روش EO با سایر شاخص‌ها اختلاف معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ مشاهده شد (Within groups, p-value = 0.00) ولی در روش PCA در هر واحد مدیریتی بین شاخص وزنی کیفیت خاک‌رخ (میانگین وزنی و ضریب وزنی) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. در این راستا، هویت (Hewitt, 2004) مشخص کرد که بهره‌وری خاک بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های خاک‌رخ است. واسو و همکاران (Vasu et al., 2017) نیز نشان دادند که با در نظر گرفتن هر دو ویژگی سطحی و خاک‌رخ، می‌توان به سوال ادغام اطلاعات خاک سطحی و زیرسطحی برای ارزیابی کیفیت خاک پاسخ داد. همچنین ایشان نشان دادند که شاخص‌های انتخاب‌شده به‌وسیله دو روش PCA و EO متفاوت بوده و منجر به دقت و معناداری مدل‌ها شده است که راه را برای توسعه شیوه‌های مدیریتی مناسب هموار می‌کند. اما ری و همکاران (Ray et al., 2014) نتایج مشابهی را از روش‌های PCA و EO برای انتخاب شاخص برای خاک‌های هند و گنگ به‌دست آوردند.

بررسی صحت ارزیابی

با توجه به جدول ۱۰، ارتباط عملکرد یونجه و کلزا در سامانه عمده مالک شخصی و شرکت بینالود در مجموعه EO با شاخص وزنی کیفیت خاک، بیشتر از خرده‌مالک بود. کلزا به‌عنوان یک محصولی که در سال‌های اخیر وارد کشت منطقه شده است و با اما اگرها و مقاومت‌هایی به‌منظور کشت آن از طرف کشاورزان، به ویژه خرده‌مالک‌ها روبه‌رو شده است، توانسته است به نسبت یونجه به‌ویژه در واحد مدیریتی شرکت بینالود ارتباط بیشتری با شاخص کیفیت خاک نشان دهد.

با توجه به جدول ۱۱، ارتباط شاخص وزنی کیفیت خاک‌رخ (روش ضریب وزنی) با عملکرد یونجه و کلزا در سامانه عمده مالک شخصی و شرکت بینالود در مجموعه EO بیشتر است و توانسته است رابطه بیشتری با عملکرد نشان دهد. روش ضریب وزنی به‌علت اعمال وزن‌های متفاوت به هر لایه بر اساس اهمیت آن لایه، در عملکرد محصول به نسبت روش میانگین وزنی، توانست شاخص کیفیت خاک بالاتری را در هر دو مجموعه EO و PCA نشان دهد. دلیل این‌که EO توانسته است ارتباط بهتری با عملکرد برقرار کند، شاید این باشد که PCA یک روش آماری کاهش ابعاد داده است؛ در حالی که انتخاب حداقل داده در روش EO توسط متخصصان که در جریان رابطه علت و معلولی خاک هستند، انتخاب شده است.

جدول ۱۰- رابطه (ضریب تبیین R^2) بین عملکرد محصول و شاخص کیفیت خاک سطحی در مجموعه MDS

Table 10- Correlation between Surface soil quality index and crop yield in the MDS

محصول Crop	نظر کارشناس EO		تجزیه به مؤلفه اصلی PCA	
	وزنی Weighted	تجمعی Additive	وزنی Weighted	تجمعی Additive
یونجه بینالود Binalood alfalfa	0.49	0.46	0.17	0.12
یونجه عمده‌مالک Total owner alfalfa	0.52	0.50	0.20	0.13
یونجه خرده‌مالک Smallholder alfalfa	0.35	0.32	0.14	0.09
کلزای بینالود Bbinalood Rapeseed	0.75	0.74	0.58	0.58
کلزای خرده‌مالک Smallholder Rapeseed	0.48	0.45	0.23	0.15
کلزای عمده‌مالک Total owner Rapeseed	0.65	0.60	0.53	0.50

شاخص کیفیت خاک، به منظور افزایش عملکرد نیازمند یک مدیریت اصولی در جهت حفظ و بهبود کیفیت خاک به‌ویژه در سامانه خرده‌مالکی و همچنین تأمین نیازهای تغذیه‌ای این محصولات هستیم. در حال حاضر با توجه به نتایج حاصل، به نظر می‌رسد که سامانه عمده مالک و تجمیع اراضی، بر حفظ و بهبود کیفیت خاک مؤثرتر بوده است که می‌توان به‌عنوان یک سامانه مدیریتی که باعث ارتقای کمی و کیفی تولید و بهبود کیفیت خاک شده است به کشاورزان و مدیران منطقه معرفی کرد (Sherafat Dargani, 2016). به هر حال با توجه به افزایش جمعیت و تأمین نیازهای معیشتی مردم منطقه، تغییر کاربری اراضی مرتعی به کشاورزی، شاید در حال حاضر امری ضروری به‌نظر برسد، ولی مدیریت درست و آگاهی بخشیدن به خرده‌مالکان در راستای این تغییر کاربری، به‌منظور بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد با توجه به شوری آب و خاک و تجمع املاح، به‌منظور داشتن تولید پایدار امری ضروری‌تر است. لذا با توجه به کاهش کیفیت خاک در اراضی با مدیریت خرده‌مالکی و عدم استقبال آنان از پروژه‌های تجمیع اراضی، لازم است که عملیات مدیریتی مناسب همراه با تقویت بنیه اقتصادی و اجتماعی کشاورزان به‌منظور افزایش کیفیت خاک در جهت افزایش سطح پایداری تولید با مصرف بهینه نهاده‌ها اجرا گردد.

در این خصوص واسو و همکاران (Vasu et al., 2016) در هند، ارتباط شاخص کیفیت خاک با نخود را در مجموعه PCA و ارتباط بین شاخص وزنی و تجمعی کیفیت خاک با پنبه و ذرت را در هر دو لایه سطحی و خاک‌رخ در مجموعه EO را بیان کرد. همتی و همکاران (Hemmati et al., 2019) بیشترین مقادیر همبستگی شاخص وزنی و تجمعی کیفیت خاک با عملکرد برنج برای مجموعه MDS هر دو سطح عملکرد بالا و پایین شالیزار به‌دست آورد. موخرجی و همکاران (Mukherjee and Lal, 2014) ضمن مقایسه سه روش تعیین شاخص کیفیت خاک در اوهایو نشان دادند که شاخص‌های وزن‌دار در مقایسه با شاخص ساده کیفیت خاک به‌دلیل اختصاص وزن مناسب برای ویژگی‌های خاک، همبستگی بیشتری با مقدار عملکرد محصول دارند. لیو و همکاران (Liu et al., 2014) با بررسی کیفیت خاک اراضی شالیزاری چین نشان دادند که همبستگی معنی‌دار شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج بیانگر این است که انتخاب ویژگی‌های خاک به‌عنوان MDS توانسته وضعیت خاک برای تولید برنج را به‌خوبی ارزیابی نماید. چروبین و همکاران (Cherubin et al., 2016) نیز عنوان کردند اگرچه مقدار شاخص کیفیت تجمعی و وزنی از نظر آماری مشابه هستند؛ اما توصیه می‌شود به‌ویژه هنگامی که تعداد شاخص‌های شیمیایی، فیزیکی و زیستی نامتعادل است از شاخص‌های وزنی استفاده شود.

با توجه به ارتباط نسبتاً خوب عملکرد محصولات مورد مطالعه، با

جدول ۱۱- رابطه (ضریب تبیین R^2) بین عملکرد محصول و شاخص کیفیت خاک‌رخ در مجموعه MDS
Table 11- Correlation between Profile soil quality index and crop yield in the MDS

محصول Crop	نظر کارشناس EO				تجزیه به مؤلفه اصلی PCA			
	ضریب وزنی		میانگین وزنی		ضریب وزنی		میانگین وزنی	
	Weighted factor		Weighted mean		Weighted factor		Weighted mean	
	وزنی	تجمعی	وزنی	تجمعی	وزنی	تجمعی	وزنی	تجمعی
	Wi	Add	Wi	Add	Wi	Add	Wi	Add
یونجه بینالود Binalood alfalfa	0.44	0.40	0.43	0.40	0.44	0.42	0.31	0.27
یونجه عمده‌مالک Total owner alfalfa	0.66	0.65	0.66	0.63	0.56	0.53	0.62	0.60
یونجه خرده‌مالک Smallholder alfalfa	0.63	0.56	0.60	0.50	0.36	0.38	0.34	0.33
کلزای بینالود Binalood Rapeseed	0.68	0.65	0.60	0.58	0.50	0.46	0.48	0.43
کلزای عمده‌مالک Total owner Rapeseed	0.63	0.62	0.58	0.50	0.51	0.49	0.34	0.33
کلزای خرده‌مالک Smallholder Rapeseed	0.30	0.29	0.49	0.48	0.34	0.32	0.34	0.22

نتیجه‌گیری

خرده‌مالک، کیفیت خاک بالاتری را نشان دادند. در سامانه‌های مدیریتی عمده مالک نیز بایستی این مسئله مورد توجه کشاورزان و ذینفعان نیز قرار گیرد که علاوه بر مدیریت مناسب، به‌علت ورودی‌های زیاد تولید، مثل کود و آب به‌خصوص در اراضی شرکت بینالود، تولید حاصله ممکن است پایدار نباشد. بنابراین در انجام مطالعات آتی، لازم است که نیازی آبی محصولات و میزان مصرف آب در سامانه‌های مدیریتی مورد نظر، محاسبه گردند. با توجه به اینکه در خاک‌رخ، روش ضریب وزنی با اعمال وزن‌های متفاوت به هر لایه بر اساس اهمیت آن لایه، در عملکرد محصول به نسبت روش میانگین وزنی، توانست شاخص کیفیت خاک بالاتری را در هر دو مجموعه EO و PCA نشان دهد، ولی تاکنون چنین مقایسه‌ای صورت نگرفته است، بهتر است به‌منظور نتیجه‌گیری دقیق‌تر، مطالعات بیشتری در این زمینه صورت بگیرد.

ارزیابی کیفیت خاک در دشت نیشابور نشان داد که شاخص کیفیت خاک فقط با استفاده از خصوصیات خاک سطحی، اگرچه نمی‌تواند اطلاعات کاملی را در اختیار کشاورزان و مدیران قرار دهد، ولی گنجاندن ویژگی‌های خاک‌رخ همراه با خصوصیات خاک سطحی در کنار دانش کشاورزان و کارشناسان خبره منطقه به‌منظور مدیریت پایدار اراضی لازم است. از طرفی، تفاوت در سامانه مدیریتی حاکم بر منطقه نیز بر کیفیت خاک منطقه تأثیرگذار بود. سامانه مدیریتی خرده‌مالک با توجه به مصرف کم نهاده، به‌ویژه کودهای شیمیایی، آب و ادوات کشاورزی، شاید از بعد ملاحظات زیست‌محیطی، از پتانسیل بالایی برخوردار باشد؛ ولی از نظر تولید و عملکرد، سامانه‌های عمده مالک و شرکت بینالود با توجه به بالا بودن بینه اقتصادی و اجتماعی و به‌کارگیری روش‌های اصولی و کارشناسی‌شده، به نسبت اراضی

منابع

1. Abera W., Assen M., and Satyal P. 2020. Synergy between farmers' knowledge of soil quality change and scientifically measured soil quality indicators in Wanka watershed, northwestern highlands of Ethiopia. *Environment, Development and Sustainability* 23: 1316–1334. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-020-00622-3>.
2. Andrews S.S., and Carroll C.R. 2001. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agro ecosystem management. *Ecological Applications* 11: 1573-1585.
3. Andrews S.S., Karlen D.L., and Mitchell J.P. 2002. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 90: 25-45.
4. Armenise E., Redmile-Gordon M.A., Stellacci A.M., Ciccicarese A., and Rubino P. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil Tillage Research, Journal Elsevier* 130: 91-98.
5. Askari M.S., and Holden N.M. 2015. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. *Soil and Tillage Research* 150: 57-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.01.010>.
6. Alizadeh K. 2015. The role of exploitation systems in the sustainable development of agriculture in Iran (study area: Central part of Torbate Heydarieh). *Journal of Geographical Science* 22: 71-87. (In Persian)
7. Asgharpoor M.J. 2010. Multiple criteria decision making. University of Tehran Publishers, Iran.
8. Bremner J., and Mulvaney C. 1982. Nitrogen-total. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison 595-624.
9. Bagheri Bodaghabadi M., Amini Fakhodi A., and Esfandiarpour I. 2007. Soil salinity zoning for environmental use of green space using AHP technique and principles of geostatistical (in Kish Island). *Journal of Isfahan University (Humanities)* 22: 101-116.
10. Cherubin M.R., Karlen D.L., Cerri C.E.P., Franco A.L.C., Tormena C.A., Davies C.A., and Cerri C.C. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PLoS One* 11(3): 1-26.
11. GHaemi F., GHaemi F., and Hosseini K. 1999. Geological map (1:100000) of Neyshabour. Geological Survey of Iran Press.
12. Hemmati S., Yaghmaeian mahabadi N., Farhangi M.B., and Sabouri A. 2019. Assessing soil quality indices and their relationships with rice yield in paddy fields of central Guilan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 9(1): 35-150. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org/10.22069/ejsms.2019.15065.1818>.
13. Hewitt A.E. 2004. *Soil Properties Relevant to Plant Growth: A Guide to Recognising Soil Properties Relevant to Plant Growth and Protection*. Manaaki Wenua Press. Lincoln, New Zealand.
14. Hoghoghi- Esfahani M. 2012. Cooperative production societies. Samar publisher Tehran, Iran.
15. Issanchou A., Karine D., Dupraz P., and Ropars-Collet C. 2018. Inter temporal soil management: revisiting the shape of the crop production function. *Journal of Environmental Planning and Management* 62(11): 1845-1863.

16. Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*, second ed. SSSA Book Series No. 5. SSSA and ASA, Madison, Wisconsin, USA 383-412.
17. Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., and Schuman G.E. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society of America Journal* 61: 4-10.
18. Knudsen D., Peterson G., and Pratt P. 1982. Lithium, sodium, and potassium. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Soil Science Society of America Journal* 225-246
19. Lal R. 1997. Soil Quality and Sustainability. In *Methods for Assessment of Soil Degradation*, edited by R. Lal, W. H. Blum, C. Valentine, and B. A. Stewart, 17-30. Boca Raton, FL: CRC Press.
20. Lal R. 2015. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. *Journal Sustainability* 7: 5875-5895.
21. Liu Z., Zhou W., Shen J., He P., Lei Q., and Liang G. 2014. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields south China. *Geoderma* 235-236: 39-47.
22. Mastro R., Chhonkar P., Singh D., and Patra A. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136: 419-435.
23. Mandal V.P., Rehman S., Ahmed R., Masroor M.D., Kumar P., and Sajjad H. 2020. Land suitability assessment for optimal cropping sequences in Katihar district of Bihar, India using GIS and AHP. *Spatial Information Research*.
24. Mukherjee A., and Lal R. 2014. Comparison of soil quality index using three methods. *PLoS One* 9: 1-15.
25. Malakoti M.J. 2014. Optimal fertilizer recommendation for agricultural products in Iran. Mobarlehgan Publishers.
26. Norfleet M.L., Ditzler C.A., Puckett W.E., Grossman R.B., and Shaw J.N. 2003. Soil quality and its relationship to pedology. *Soil Scienc* 168: 149-155.
27. Olsen S.R., and Sommers L.E. 1982. Phosphorus. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America, Madison* 1035-1049.
28. Piper C.S. 1966. *Soil and Plant Analysis*. Reprinted by Hans Publishers, Bombay, India.
29. 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 Society of America, Madison, WI*.
30. Ray S.K., Bhattacharyya T., Reddy K.R., Pal D.K., Chandran P., Tiwary P., et al. 2014. Soil and land quality indicators of the Indo-Gangetic Plains of India. *Current Science* 107: 1470-1486.
31. Sys C., Van- Ranst E., and Debaveye J. 1991. Land evaluation, part I. Principles in Land Evaluation and Crop Production Calculations. General administration for development cooperation, Brussels 40-80
32. Salardini A.A. 1739. Soil fertility. University of Tehran Publishers, Iran.
33. Sherafat -dargani H. 2016. Extra-facilitation, a mechanism for sustainable development. Noruzi Publishers, Gorgan, Iran.
34. Thomas G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity, *Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of America Book Series*.
35. Vasu D., Tiwary P., Chandran P., and Singh S.K. 2016. Soil Quality for Sustainable griculture. *Geoderma* 282: 70-79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.010>.
36. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.
37. Yadav G.S., Lal R., Meena R.S., Babu S.U., Das A., B, S.N., Datta M., Layak J., and Saha, P. 2019. Conservation tillage and nutrient management effects on productivity and soil carbon sequestration under double cropping of rice in north eastern region of India. *Ecological Indicators*.
38. Zhang X.Y., Sui Y.Y., Zhang X.D., Meng K., and Herbert S.J. 2007. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China. *Pedosphere* 17(1): 19-29.



Effect of Organic and Chemical Conditioners on Aggregate Stability, Least Limiting Water Range and Integral Water Capacity under Wheat Cultivation in Saline Soils

A. Nosrati Miandoab¹, H. Emami^{2*}, A.R. Astarai³, M.R. Mosaddeghi⁴, H. Asgarzadeh⁵

Received: 22-01-2022

Revised: 08-02-2022

Accepted: 14-03-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Nosrati Miandoab A., Emami H., Astarai A.R., Mosadeqi M.R., and Askarzadeh H. 2022. Effect of Organic and Chemical Conditioners on Aggregate Stability, Least Limiting Water Range and Integral Water Capacity under Wheat Cultivation in Saline Soils. Journal of Water and Soil 36(1): 113-126. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74361.1128](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74361.1128)

Introduction

Soil salinity has a negative effect on physical, chemical and biological properties of soil. Salinity also affects the relationships between soil and plants, which in turn has a significant effect on plant growth. One of the solutions used to reduce the effects of salinity and improve the physical properties of the soil is application of organic and chemical conditioners. Organic matter as well as calcium improve the structure and physical condition of the soil. Conditioners in saline soils include soluble calcium salts such as gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcium chloride ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) and phosphogypsum (phosphorous gypsum), and acids such as sulfuric acid, sulfur, pyrite, Aluminum sulfate and sulfur lime (calcium polysulfide). Strategies aimed at evaluating and ameliorating the structural quality of soils should be developed to ensure the sustainable use of lands. The least limiting water range (LLWR) attempts to incorporate crop-limiting values of soil strength, aeration, and water supply to plant roots into one effective parameter (on the basis of soil water content). The LLWR can be a useful indicator of soil quality and soil physical constraints on crop production. Therefore, the objective of this research was to study the effects of organic and inorganic conditioners on some structural and hydraulic indices of saline sodic soils.

Material and Methods

In this study, the effect of two types of organic and chemical conditioners and the simultaneous application of them on modifying the physical properties of 5 saline soils around the lake of Urmia were investigated. Treatments included algae, salfit and algae+salfit. The soil samples were transferred to culture boxes ($40 \times 40 \times 40$) according to the bulk density of the sampling site. The soil samples were wetted and dried several times. Conditioners treatments including application of calcium and organic compounds. After reaching the field capacity, wheat seeds were sown and irrigated with water (electrical conductivity 0.28 dS/m and pH= 7.78). It should be noted that irrigation was done at intervals of 8 days. Two months after the beginning the experiment, irrigation was stopped and soil moisture was allowed to reach a permanent wilting point. At this stage, undisturbed soil samples were prepared from the treated soil of each box and the mean weight-diameter of dry (MWD_{dry}) and wet (MWD_{wet}) aggregates were measured. Then the values of least limiting water range in two suctions of 330 and 100 cm and water integral capacity of samples were measured.

Results and Discussion

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

4- Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

5- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

According to the initial analysis, all soils used were saline and the amount of calcium carbonate was high in two soils (number 3 and 5). Soil organic carbon content was also low. The results of salfit analysis also showed that the dissolved calcium and sulfur content were 8 and 3.9%, respectively. The results showed that soil 1 had the highest amount of MWD_{wet} and soil 5 had the lowest amount of MWD_{wet} . The highest and lowest aggregate stability values were obtained in soils 3 and 5, respectively, where soil 5 was very saline soil. The studied soils differed in terms of soil water relations. The highest amount of LLWR330 was found in soil 5, while the lowest amount of LLWR100 and IWC parameters was also obtained in same soil. The results of this study showed that salfit treatment caused the highest increase in aggregate stability (74.9%) LLWR330 (14.5%) and integral water capacity (26.2%) compared to the control and the highest mean weight-diameter of aggregates in both wet and dry conditions was obtained in salfit-algae treatment (52.4% and 40.4% increase, respectively). The results of correlation analysis among the measured parameters showed that the highest correlation was found between aggregate stability and MWD_{wet} . Among the measured parameters, aggregate stability had the highest correlation with other parameters and the correlation of this parameter with LLWR330, LLWR100, IWC and MWD_{wet} were 0.36, 55, 75 and 88 %, respectively. Soil water integral capacity also had a significant correlation ($p < 0.01$) with LLWR330 (0.84) and MWD_{wet} (0.7).

Conclusion

The effect of initial soil properties on studied parameters was significant and the use of conditioners improved studied parameters, and use of conditioners increased indices structural and hydraulic of saline soils. In general, the results of this study showed the positive effect of conditioners on physical properties of the studied soils, in which salfit and salfit-algae have a better effect on studied parameter, and they could be useful to improve soil physical condition. It seems that the application of different rates of conditioners as well as their interaction with each other should be considered according to the basic properties of the soil.

Keywords: Algae, Dry and wet sieve, Mean weight diameter of aggregates, Salfit

تأثیر اصلاح کننده آلی و شیمیایی بر پایداری ساختمان خاک، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی گیاه گندم در خاک‌های شور

اکرم نصرتی میان‌دوآب^۱ - حجت امامی^{۲*} - علیرضا آستارایی^۳ - محمدرضا مصدقی^۴ - حسین عسگرزاده^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

چکیده

شوری خاک بر بیشتر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تأثیر منفی دارد. شوری همچنین بر روابط خاک و گیاه تأثیرگذار بوده و با کاهش دادن مقدار جذب آب رشد گیاه را محدود می‌کند. از راهکارهای مورد استفاده برای کاهش اثرات شوری و اصلاح ویژگی‌های فیزیکی خاک، استفاده از اصلاح کننده‌های آلی و شیمیایی می‌باشد. در این پژوهش اثر دو نوع اصلاح کننده آلی و شیمیایی بر ویژگی‌های فیزیکی ۵ نمونه خاک شور با درجه شوری و سدیمی متفاوت از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری اطراف دریاچه ارومیه بررسی شد. تیمارهای مورد استفاده شامل جلبک، سالفید و جلبک+سالفید بودند. شاخص‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) در دو حالت تر و خشک و پایداری خاکدانه (AS) به عنوان شاخص‌های پایداری ساختمان خاک و دامنه رطوبت با حداقل محدودیت محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) به عنوان شاخص‌های هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد در ۵ نوع خاک مورد مطالعه استفاده از ترکیبات اصلاح کننده باعث افزایش شاخص‌های پایداری ساختمان خاک شد که این افزایش در خاک ۱، ۲ و ۴ بیشترین مقدار بود. همچنین سالفید باعث بیشترین افزایش در مقدار پایداری خاکدانه (۷۴/۹ درصد افزایش)، دامنه رطوبت بدون محدودیت در مکش ۳۳ کیلوپاسکال (LLWR33، ۱۴/۵ درصد افزایش) و گنجایش آب انتگرالی (۲۶/۲ درصد افزایش) نسبت به شاهد شد. بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه در دو حالت تر و خشک نیز در تیمار سالفید+جلبک به ترتیب با ۵۲/۴ و ۴۰/۴ درصد افزایش نسبت به شاهد به دست آمد. تأثیر خصوصیات اولیه خاک بر میزان ویژگی‌های اندازه‌گیری شده معنی‌دار بود و کاربرد اصلاح کننده‌ها باعث بهبود این ویژگی‌ها در خاک‌های مورد مطالعه شد.

واژه‌های کلیدی: الک خشک و تر، جلبک، سالفید، میانگین وزنی قطر خاکدانه

مقدمه

خاک‌های شور به طور گسترده‌ای در سراسر جهان توزیع شده‌اند و حدود ۲۰ درصد از زمین‌های زیر کشت جهان تحت تأثیر نمک است (Schumann and Sumner, 2000). این مشکل شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک را به طور نامطلوبی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Worku et al., 2016). شوری آب آبیاری نه تنها روند شور و قلیایی شدن خاک را تسریع می‌کند، بلکه بر محتوای نیتروژن و معدنی شدن آن، آنزیم‌ها و میکروارگانیسم‌های خاک نیز تأثیرگذار بوده که همه این‌ها می‌توانند بر انتشار N_2O خاک تأثیر بگذارند (Irshad et al., 2005). تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک ناشی از تورم و پراکندگی ذرات کلئیدی در حضور مقادیر بیش از حد سدیم قابل تبادل منجر به اختلال در نفوذ آب، حرکت هوا، ظرفیت نگهداری آب، نفوذ ریشه و مشکلات ظهور گیاهچه می‌شود (

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: emami@um.ac.ir)

۴- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۵- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه مشهد، ارومیه، ایران

خاک نیز شناخته می‌شود. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها اغلب برای ارزیابی اثرات شیوه‌های مدیریتی مختلف بر ساختمان خاک استفاده می‌شود (Six et al., 2000). وجود دلایلی مانند تاثیر مستقیم بر مقاومت در برابر عوامل فرسایشی و تراکم (Chaplot and Cooper, 2015) و امکان جابجایی و ذخیره سازی بهینه گازها، آب و عناصر غذایی در زمان پایداری ساختمان خاک؛ (Gliński et al., 2011) گواه این مطلب بوده که پایداری خاکدانه یک شاخص مفید برای نظارت بر کیفیت خاک می‌باشد (Chaplot and Cooper, 2015).

از جمله مواد اصلاح کننده که در خاک‌های شور به کار می‌روند می‌توان به نمک‌های کلسیم‌دار محلول مانند گچ ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، کلرید کلسیم ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) و فسفوجیسوم (گچ فسفری) (Wang et al., 2009) و اسیدها مانند اسید سولفوریک، گوگرد، پیریت، سولفات آهن، سولفات آلومینیوم و آهک گوگردار (پلی سولفید کلسیم) (Wang et al., 2009; Sadiq et al., 2007) اشاره کرد. تاثیر کاربرد جلبک و سیانوباکتر بر بهبود خاکدانه‌سازی توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است (Falchini et al., 1996; Peng and Bruns, 2019). سیانوباکتر و جلبک‌های خاص می‌توانند از طریق مکانیسم‌های بیوفیزیکی و بیوشیمیایی (چسباندن به وسیله آگزوبلی ساکاریدهای تولیدی)، ذرات خاک را به هم متصل کرده و به عنوان عامل سیمان کننده عمل کنند (Malam et al., 2001). تاثیر آگزوبلی ساکاریدهای تولیدی توسط جلبک بر بهبود پایداری خاک نیز توسط لیو و همکاران (Liu et al., 2005) گزارش شده است.

با توجه به اهمیت مسئله شور شدن خاک استفاده از روابطی برای برآورد آب قابل استفاده که در برگیرنده این اثرات باشد و ارائه راه کارهایی برای افزایش قابلیت دسترسی آب برای گیاهان مانند استفاده از مواد اصلاح کننده خاک که به محیط زیست آسیبی نرساند و مقرون به صرفه باشد، ضرورت دارد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تاثیر اصلاح کننده‌های آلی (جلبک، شیمیایی (سالفید) و کاربرد همزمان این دو اصلاح کننده بر برخی خصوصیات فیزیکی خاک‌های شور زیر کشت گندم بود.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش ۵ نمونه خاک با درجه شوری و سدیمی متفاوت از اطراف دریاچه ارومیه انتخاب و از عمق صفر تا ۳۰ سانتی متری نمونه برداری شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها مانند بافت (Gee and Bauder, 1986)، کربن آلی (Thomas, 1996)، کربنات کلسیم معادل (Loeppert and Suarez, 1996)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی به ترتیب در گل اشباع و عصاره آن (Thomas, 1996) و چگالی ظاهری (Jones, 1983) خاک با استفاده از روش‌های مرسوم آزمایشگاهی اندازه‌گیری

(Murtaza et al., 2009; Peng and Bruns, 2019; Ghafoor et al., 2008). افزایش نمک‌های مختلف در خاک به ویژه افزایش میزان سدیم خاک باعث پراکنده شدن کلوئیدهای خاک، تغییر توزیع اندازه منافذ خاک و فشردگی خاک می‌شود. تغییر توزیع اندازه منافذ خاک توسط شاخص‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک قابل بررسی و شناسایی است. یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک که تحت تاثیر مقدار شوری خاک و حضور سدیم قابل تبادل قرار می‌گیرد چگالی ظاهری (BD) خاک است. افزایش مقدار سدیم قابل تبادل با تخریب خاکدانه‌ها، افزایش فشردگی خاک و کاهش حجم کل خاک، BD را افزایش می‌دهد (Bayat et al., 2013). از جمله اثرات شوری خاک تغییر توزیع اندازه منافذ و افزایش فشار اسمزی محلول خاک بوده که این امر بر روابط آب، خاک و گیاه تاثیرگذار می‌باشد. دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) که برای محاسبه و تعیین مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرند حساسیت بالایی به تغییرات توزیع اندازه منافذ خاک داشته و می‌توانند به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک برای بررسی تاثیر عوامل مختلف بر ساختمان خاک مورد استفاده قرار گیرند. LLWR که توسط داسیلوا و همکاران (da Silva and Kay, 1997) ارائه شد، دامنه‌ای از رطوبت خاک است که رشد گیاه از نظر پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک با حداقل محدودیت روبرو باشد (da Silva et al., 1994). در روش IWC که توسط گرونولت و همکاران (Groenevelt et al., 2001) پیشنهاد گردید، تاثیر عوامل موثر بر آب قابل استفاده خاک به صورت تدریجی در نظر گرفته می‌شود که می‌توان محدودیت‌های فیزیکی که باعث کاهش رشد گیاه در نیمرخ خاک می‌شوند را لحاظ کرد (Groenevelt et al., 2001). نیشابوری و همکاران (Neyshabouri et al., 2014) در ۳۲ خاک مختلف از منطقه آذربایجان شرقی برآورد کرده و گزارش کردند که اثر ویژگی‌های مختلف خاک مانند درصد رس، کربن آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و ... بر LLWR مشابه نبوده و درصد رس، چگالی ظاهری و آهن قابل استخراج با اگزالات آمونیوم بیشترین همبستگی را با LLWR نشان دادند و SAR بر θ_{pwp} و θ_{fc} اثر معنی‌داری داشت، ولی بر LLWR اثر معنی‌داری نشان نداد.

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) و پایداری خاکدانه (AS) به عنوان شاخص‌های پایداری ساختمان علاوه بر LLWR و IWC به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک بسیار حائز اهمیت می‌باشند. پایداری خاکدانه به عنوان شاخص ساختمان خاک در نظر گرفته می‌شود (Six et al., 2000) و به عنوان یک شاخص مهم کیفیت

1- Least Limiting Water Range

2- Integral Water Capacity

شدند.

اساس رابطه ۲ تعیین شد. (and Rosenau, 1986) به استفاده از الک تر و بعد از تصحیح شن بر

$$AS = \frac{WSA - M_{sand}}{M_{sample} - M_{sand}} \times 100 \quad \text{رابطه ۲}$$

WSA: جرم خاکدانه‌های باقی‌مانده بر روی الک ۰/۲۵ میلی - متری؛ M_{sand} جرم شن و M_{sample} جرم نمونه خاک محاسبه LLWR

برای محاسبه LLWR از الگوریتم به کار رفته توسط داسیلوا و همکاران (da Silva et al., 1994) استفاده شد. حد بالایی LLWR، مقدار رطوبت خاک در مکش‌های ماتریک ۱۰ و ۳۳ kPa یا در تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد (هر کدام کمتر بود) و حد پایینی LLWR، مقدار رطوبت خاک در مکش ماتریک ۱۵۰۰ kPa یا در مقاومت مکانیکی ۲ MPa (هر کدام بیشتر بود) در نظر گرفته می‌شود که می‌توان این مراحل را به طور ساده به صورت رابطه ۳ نشان داد:

رابطه ۳

$$: (\theta_{AFP} > \theta_{FC}) \text{ and } (\theta_{PWP} > \theta_{SR}) \Rightarrow LLWR = \theta_{FC} - \theta_{PWP}$$

θ_{FC} رطوبت ظرفیت زراعی، θ_{PWP} رطوبت نقطه پژمردگی دائمی، θ_{AFP} رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای ۱۰ درصد و θ_{SR} رطوبت نظیر مقاومت مکانیکی ۲ MPa می‌باشد.

θ_{AFP} از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\theta_{AFP} = \theta_s - 0.1 = (1 - \frac{D_b}{D_s}) - 0.1 \quad \text{رابطه ۴}$$

که θ_s : رطوبت در نقطه اشباع، D_b : چگالی ظاهری و D_s : چگالی حقیقی است. محاسبه IWC

برای محاسبه IWC از معادله گرانولت و همکاران (Groenevelt et al., 2001) استفاده شد:

$$IWC = \int_0^{\infty} (\prod_{i=1}^m \omega_i(h)) C(h) dh \quad \text{رابطه ۵}$$

$C(h)$ ، گنجایش ویژه آب که شیب منحنی مشخصه رطوبتی می‌باشد و از رابطه ۶ به دست آمد:

$$C(h) = \left| \frac{d\theta}{dh} \right| \quad \text{رابطه ۶}$$

$\omega_i(h)$ ، توابع وزنی چندگانه برای برآورد ویژگی‌های فیزیکی محدود کننده خاک است. تعداد محدودیت‌ها از یک تا m است. در نهایت تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش با استفاده از نرم‌افزار آماری JMP 8 انجام شد و مقایسه میانگین‌ها نیز با استفاده از روش دانکن صورت گرفت.

نتایج و بحث

طرح آماری مورد استفاده در این پژوهش به صورت کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با سه تکرار بود. فاکتورهای مورد آزمایش شامل نوع خاک در پنج سطح و اصلاح کننده در چهار سطح (شاهد، سالفید، جلبک دریایی و سالفید+جلبک دریایی) بودند که به صورت جداگانه در هر خاک اعمال شدند. برای آماده‌سازی، نمونه‌ها با توجه به چگالی ظاهری تعیین شده در محل نمونه‌برداری به جعبه‌های کشت (با ابعاد $40 \times 40 \times 40$) انتقال داده شده و نمونه‌های خاک داخل جعبه‌ها به مدت دو ماه تر و خشک شدند. پس از رسیدن به ظرفیت زراعی بذر گندم به روش خطی و تعداد ۳۵۰ عدد در هر متر مربع کشت شد و در طول مدت آزمایش، آبیاری با آب منطقه (قابلیت هدایت الکتریکی ۰/۲۸ دسی‌زیمنس بر متر و پهاش ۷/۷۸) انجام شد. لازم به ذکر است که آبیاری با فواصل ۸ روز انجام شد. مواد اصلاح کننده که حاوی ترکیبات کلسیمی و ترکیبات آلی بودند، در مرحله تر و خشک شدن و آبیاری به خاک اضافه شدند. نحوه اضافه کردن اصلاح کننده‌ها بدین صورت بوده که ترکیب سالفید با توجه به توصیه شرکت سازنده برای خاک‌های با هدایت الکتریکی بالا، ۶۰ لیتر در هکتار برای دوره رشد اضافه شد که این افزودن در سه مرحله (قبل از کاشت، بعد از جوانه زدن و قبل از مرحله ساقه دهی) انجام شد. پودر جلبک نیز به تمامی خاک‌ها به یک مقدار یکسان و به میزان ۴ کیلوگرم در هکتار اضافه شد. پس از رسیدن گیاهان به مرحله ساقه دهی (دو ماه از شروع آزمایش) آبیاری متوقف شده و اجازه داده شد رطوبت خاک برای گیاه گندم به نقطه پژمردگی دائم برسد. در این مرحله از خاک هر جعبه نمونه‌های دست خورده و دست نخورده تهیه شد و ویژگی‌های میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت خشک (MWD_d) و تر (MWD_w) بر اساس روش کمپر و روسنا (Kemper and Rosenau, 1986) اندازه‌گیری شدند. در این روش در ابتدا خاک هوا خشک شده از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شده بر روی سری الک شامل الک‌های ۰/۲۵، ۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلی‌متری قرار گرفتند. در روش الک تر با سرعت ۳۰ نوسان در دقیقه و به مدت ۳ دقیقه انجام شده و الک خشک با استفاده از دستگاه ویژه الک خشک انجام شده و در نهایت خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک و وزن شد و سپس تصحیح شن انجام شد و MWD_w و بر اساس رابطه ۱ محاسبه گردید.

$$MWD = \sum_{i=1}^k W_i \bar{x}_i \quad \text{رابطه ۱}$$

k : تعداد دامنه اندازه خاکدانه‌ها، \bar{x}_i : میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک، و W_i : نسبت جرم خشک خاکدانه‌های روی هر الک i به جرم خشک کل خاکدانه‌های خاک می‌باشد.

پایداری خاکدانه‌ها (AS) نیز به روش کمپر و روسنا (Kemper

ویژگی‌های اولیه خاک و اصلاح کننده‌ها

نتایج آنالیز اولیه خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است. طبق این نتایج کلیه خاک‌های مورد استفاده شور بوده و مقدار کربنات کلسیم معادل در دو خاک ۳ و ۵ بالاست. مقدار کربن آلی خاک‌ها نیز کم بود. نتایج تجزیه سالفید نیز نشان داد که میزان کلسیم و گوگرد محلول این ترکیب به ترتیب ۸ و ۳/۹ درصد بود.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های آزمایش نشان داد که اثر ساده نوع اصلاح کننده بر IWC معنی‌دار نبود. اثر ساده نوع خاک بر تمام ویژگی‌های اندازه‌گیری شده اثر معنی‌داری داشت و اثر متقابل نوع خاک و اصلاح کننده بر میزان LLWR100 معنی‌دار نبود و بر سایر موارد تاثیر معنی‌دار داشت. مقایسه میانگین اثر ساده اصلاح کننده‌های

مورد استفاده بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۲ نشان داد که کمترین مقدار MWD_w ، MWD_d و پایداری خاکدانه در تیمار شاهد به دست آمد. استفاده از سالفید و همچنین ترکیب سالفید+جلبک بیشترین تأثیر را بر ویژگی‌های مورد اندازه‌گیری داشت. سه تیمار سالفید، سالفید+جلبک و جلبک در مقایسه با شاهد به ترتیب باعث افزایش ۴۶/۶، ۵۲/۴ و ۳۳/۷ درصدی MWD_w شدند و این افزایش در مورد MWD_d به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۱۹/۸ درصد بود. این تیمارها همچنین باعث افزایش ۷۴/۹، ۴۸/۴ و ۶۰/۱ درصدی پایداری خاکدانه‌ها در مقایسه با شاهد شدند. اثر ساده تیمارهای اصلاح کننده بر میزان دو ویژگی LLWR330 و IWC معنی‌دار بود، ولی بر میزان LLWR100 معنی‌دار نبود.

جدول ۱- نتایج آنالیز اولیه خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- Results of initial analysis of studied soils

نوع خاک	چگالی ظاهری	درصد اشباع وزنی	قابلیت هدایت الکتریکی	pH	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	کربنات کلسیم معادل (درصد)	کربن آلی (درصد)	بافت خاک
Soil type	Bulk density	Saturation percent	EC (dSm ⁻¹)		Sand (%)	Clay (%)	Silt (%)	Calcium carbonate equivalent (%)	Organic carbon (%)	Soil texture
خاک ۱ Soil 1	1.42	55.7	4.29	7.85	62	8	30	4.5	0.51	Sandy loam
خاک ۲ Soil 2	1.37	56	5.31	7.95	15	31	54	7.5	0.88	Silty clay loam
خاک ۳ Soil 3	1.27	58.2	4.52	7.83	17	40	43	30.5	0.72	Silty clay loam
خاک ۴ Soil 4	1.63	49	8.45	7.26	74	10	16	7.25	0.18	Sandy loam
خاک ۵ Soil 5	1.56	57.8	24	8.48	25	18	57	14.5	0.04	Silt loam

جدول ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر ساده اصلاح کننده بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 2 - Results of comparison of mean of modifier simple effect on measured parameters

اصلاح کننده	IWC (cm ³ .cm ⁻³)	LLWR330 (cm ³ .cm ⁻³)	AS (%)	MWD _d (mm)	MWD _w (mm)
Conditioner					
سالفید Salfid	0.20 ^a	0.17 ^b	21.81 ^a	2.50 ^b	0.48 ^a
سالفید+جلبک Salfid+algae	0.20 ^a	0.18 ^a	18.50 ^c	2.69 ^a	0.50 ^a
جلبک Algae	0.20 ^a	0.16 ^{bc}	19.97 ^b	2.29 ^c	0.44 ^b
شاهد Control	0.16 ^b	0.15 ^c	12.47 ^d	1.91 ^d	0.33 ^c

در هر ستون تیمارهایی با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, treatments with at least one similar letter are not significant.

جلبک+سالفید و جلبک به ترتیب ۱۳/۳، ۱۹/۷ و ۶/۶ درصد بود. مقدار گنجایش آب انتگرالی نیز تحت تأثیر مواد اصلاح کننده قرار گرفت و حضور این ترکیبات باعث افزایش میزان این ویژگی در مقایسه با

بیشترین مقدار LLWR330 در تیمار جلبک-سالفید مشاهده شده و تیمارهای اصلاح کننده باعث افزایش مقدار این ویژگی در مقایسه با شاهد شدند که مقدار این افزایش در سه تیمار سالفید،

قابلیت هدایت الکتریکی، بیشترین پایداری خاکدانه را دارا بود (جدول ۳). در مورد تأثیر ویژگی‌های خاک بر شاخص‌های پایداری نتایج مختلفی گزارش شده است. به عنوان مثال اعظمی ساردو و محمود آبادی (Azami Sardou and Mahmood Abadi, 2016) گزارش کردند که میانگین وزنی قطر خاکدانه با درصد رس، ماده آلی و سیلت همبستگی مثبت و معنی‌داری داشته در حالی که با ویژگی‌های درصد شن و قابلیت هدایت الکتریکی خاک همبستگی منفی و معنی‌داری داشت. اثر مثبت مواد آلی بر پایداری خاکدانه در مطالعات انجام شده توسط فاتت و همکاران (Fattet et al., 2011)، امادودین و همکاران (Emadodin et al., 2009) و لادو و همکاران (Lado et al., 2004) گزارش شده است که این محققین دلیل این امر را خاصیت پیوند دهنده ذرات خاک توسط ماده آلی و بهبود ساختمان خاک بیان کردند. در مطالعه دیگری گزارش شد که از بین ویژگی‌های خاک رس، کرنات کلسیم و مواد آلی بیشترین ارتباط را با پایداری خاک داشتند (Mbagwu, 2003; To biašová, 2011).

بیشترین مقدار LLWR330 در خاک ۵ مشاهده شد و این در حالی بود که کمترین مقدار دو ویژگی LLWR100 و IWC نیز در این خاک مشاهده شد. نتایج خاک ۵ ممکن است ناشی از تفاوت توزیع اندازه ذرات معدنی باشد، زیرا در این خاک مقدار رس ۱۸ درصد است این مقدار در حد نسبتاً مطلوبی است و درصد شن آن هم نسبتاً کم (۲۵٪) است.

شاهد شدند. البته لازم به ذکر است که بین سه نوع اصلاح کننده اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. میزان افزایش گنجایش آب انتگرالی مشاهده شده در سه تیمار سالفید، سالفید-جلبک و جلبک در مقایسه با شاهد تقریباً ۲۵ درصد بود (جدول ۲).

نتایج مقایسه میانگین اثر ساده نوع خاک مورد مطالعه بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در جدول ۳ نشان داده شده است. طبق این نتایج خاک ۱ دارای بیشترین مقدار MWD_w بود و خاک ۵ دارای کمترین مقدار MWD_w بود. بیشترین و کمترین مقدار پایداری خاکدانه نیز به ترتیب در دو خاک ۳ و ۵ به دست آمد که خاک ۵ اختلاف زیادی با سایر خاک‌های مورد مطالعه داشت. خاک‌های مورد مطالعه از نظر مقادیر روابط آب خاک با یکدیگر تفاوت داشتند. بررسی ویژگی‌های اولیه خاک‌های مورد مطالعه نشان داد که شاخص‌های پایداری ساختمان با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها ارتباط دارند، به طوری که خاک ۵ با کمترین مقدار ماده آلی و بیشترین قابلیت هدایت الکتریکی دارای کمترین مقدار پایداری خاکدانه و میانگین وزنی قطر خاکدانه در حالت تر بود. به نظر می‌رسد در این خاک‌ها به دلیل شوری بالا رشد گیاهان کم شده و در نتیجه بقایای گیاهی کمتری به خاک بر می‌گردد و در واقع کمبود ماده آلی سبب کاهش پایداری ساختمان خاک می‌شود. از سوی دیگر به دلیل شوری زیاد، فعالیت ریزجانداران خاک و نقش آن‌ها در افزایش پایداری ساختمان خاک نیز کاهش می‌یابد. خاک ۱ با دارا بودن کمترین مقدار

جدول ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر ساده نوع خاک بر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 3- Comparison results of the soil type simple mean effect on measured parameters

نوع خاک Soil type	IWC ($cm^3.cm^{-3}$)	LLWR100 ($cm^3.cm^{-3}$)	LLWR330 ($cm^3.cm^{-3}$)	AS (%)	MWD_a (mm)	MWD_w (mm)
خاک ۱ Soil 1	0.234 ^b	0.220 ^{ab}	0.167 ^{bc}	25.058 ^b	1.949 ^d	0.683 ^a
خاک ۲ Soil 2	0.225 ^b	0.244 ^a	0.175 ^{ab}	11.475 ^d	3.224 ^a	0.391 ^b
خاک ۳ Soil 3	0.266 ^a	0.235 ^{ab}	0.163 ^c	34.508 ^a	2.616 ^b	0.665 ^a
خاک ۴ Soil 4	0.229 ^b	0.211 ^b	0.141 ^d	15.150 ^c	1.558 ^e	0.285 ^c
خاک ۵ Soil 5	0 ^c	0.0182 ^c	0.185 ^a	4.733 ^e	2.394 ^c	0.191 ^d

در هر ستون تیمارهایی با حداقل یک حرف مشترک، اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, treatments with at least one similar letter are not significant.

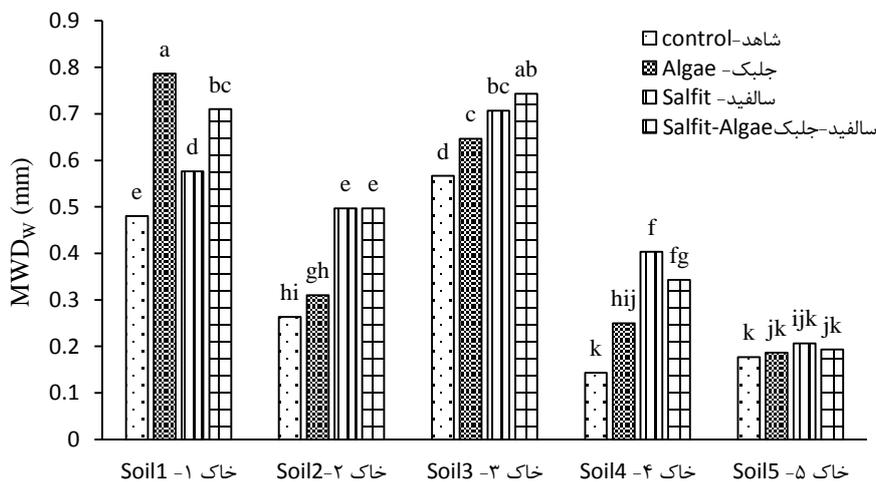
شده باشند. روند مشاهده شده در مورد دو ویژگی LLWR100 و IWC مشابه بوده (همبستگی ۸۴/۵ درصد و معنی‌دار در سطح یک درصد) و این در حالی بود که این روند در LLWR330 برعکس بود.

از سوی دیگر درصد سیلت نیز ۵۷ درصد است که بیشترین فراوانی سیلت در بین خاک مورد بررسی مربوط به این خاک است و از آنجا که ذرات سیلت راحت تر از ذرات رس آب را آزاد کرده و در اختیار گیاه قرار می‌دهند و در مقایسه با ذرات شن نیز قدرت نگهداری آب بیشتری دارند، بنابراین ممکن است باعث افزایش LLWR330

شاخص‌های پایداری خاکدانه

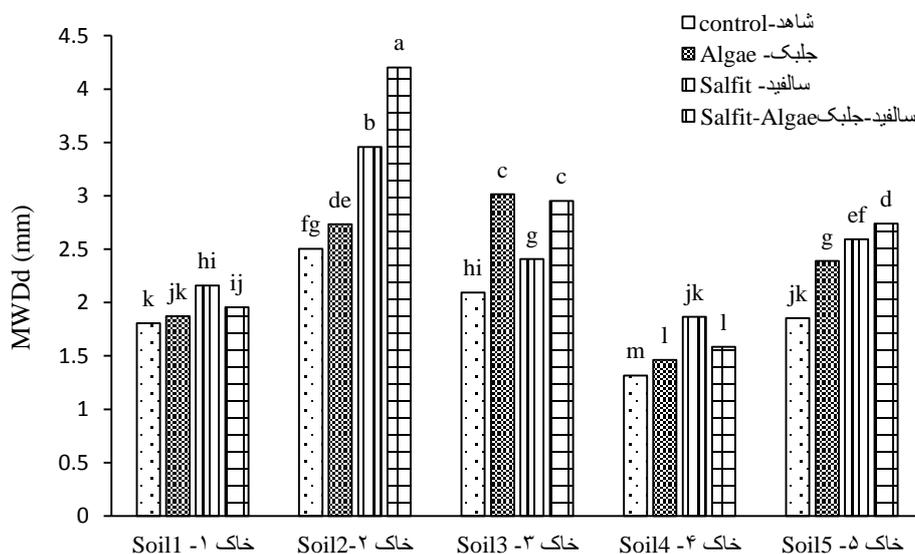
نبود. در خاک ۱ تا ۵ بیشترین افزایش در مقایسه با شاهد به ترتیب در تیمارهای جلبک (۶۲/۵ درصد)، سالفید+جلبک (۸۶/۴ درصد)، سالفید+جلبک (۳۱/۲ درصد)، سالفید (۸۱/۸ درصد) و سالفید (۱۷ درصد) مشاهده شد.

شکل ۱ نتایج اثر متقابل مواد اصلاح کننده و نوع خاک بر MWD_w را نشان می‌دهد. در ۵ نوع خاک مورد مطالعه استفاده از ترکیبات اصلاح کننده باعث افزایش MWD_w شد که این افزایش در خاک ۱، ۲ و ۴ بیشترین مقدار بوده و در خاک ۵ این افزایش معنی دار



شکل ۱- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و ماده اصلاح کننده بر MWD_w

Figure 1- Results of comparison of means for interaction effect of soil type and conditioner on MWD_w



شکل ۲- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و ماده اصلاح کننده بر MWD_d

Figure 2- Results of comparison of means for interaction effect of soil type and conditioner on MWD_d

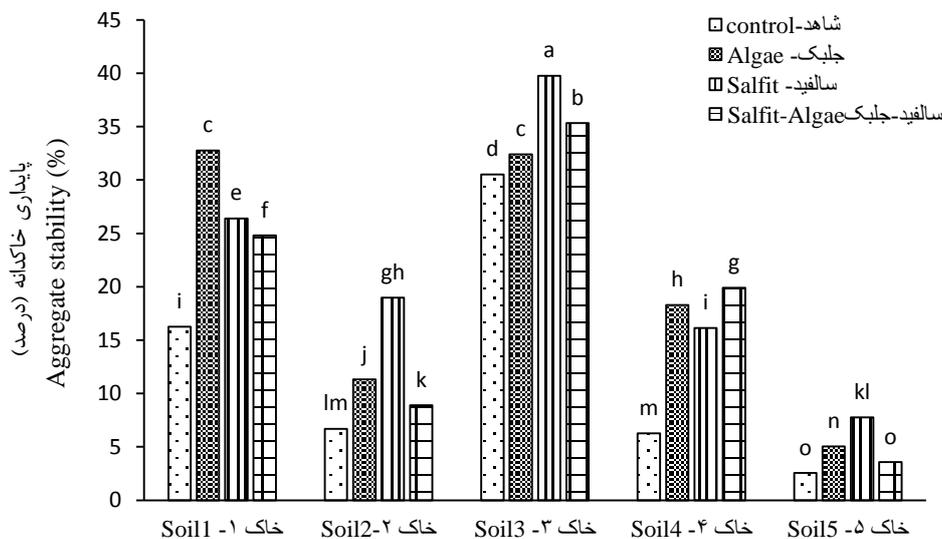
این افزایش تقریباً مشابه هم بود. در خاک ۱ تا ۵ بیشترین افزایش در مقایسه با شاهد به ترتیب در تیمارهای سالفید (۱۹/۶ درصد)، سالفید+جلبک (۶۷/۹ درصد)، جلبک (۴۳/۸ درصد)، سالفید (۴۱/۷ درصد) و سالفید+جلبک (۴۷/۸ درصد) اندازه‌گیری شد.

شکل ۲ نتایج اثر متقابل مواد اصلاح کننده و نوع خاک بر MWD_d را نشان می‌دهد. همانند ویژگی قبل، در ۵ نوع خاک مورد مطالعه استفاده از ترکیبات اصلاح کننده باعث افزایش MWD_d شدند که این افزایش در خاک ۲ بیشترین مقدار بود و در سه خاک ۳، ۴ و ۵

از جمله آگزوپلی ساکاریدها از طرف دیگر توانسته‌اند باعث بهبود خصوصیات فیزیکی خاک و افزایش پایداری شوند. این اثر مثبت در ۵ خاک مورد مطالعه متفاوت بود که دلیل این امر شوری زیاد این خاک و مقدار کم ماده آلی و در نتیجه کاهش فعالیت ریزجانداران در این خاک است. همانطور که گفته شد در خاک ۱ که دارای کمترین شوری بیشترین پایداری خاکدانه (شکل‌های ۱ و ۳) مربوط به تیمار جلبک است. با مقایسه آن با سایر خاک‌ها به ویژه خاک ۵ (با بیشترین شوری) اهمیت تأثیر شوری در کاهش فعالیت ریزجانداران و آماده آلی خاک در پایداری خاکدانه‌ها بیشتر نمایان می‌شود. در مورد تأثیر اصلاح کننده‌های آلی از جمله جلبک بر خصوصیات فیزیکی و پایداری خاکدانه مطالعات مختلف اثر مثبت این اصلاح کننده را نشان داده‌اند. به عنوان مثال در مطالعه انجام شده توسط ال مالکی و ال مسعودی (Al-Maliki and Al-Masoudi, 2018) بر روی تأثیر تفاله چای، جلبک و میکوریزا بر ویژگی‌های فیزیکی در دو خاک شور و غیر شور نتایج نشان داد که حضور این اصلاح کننده‌ها باعث افزایش MWD_w خاک شد. این پژوهشگران دلیل اصلی این امر را بهبود ماده آلی خاک بیان کردند که باعث افزایش پایداری خاکدانه می‌شود.

شکل ۳ نتایج اثر متقابل مواد اصلاح کننده و نوع خاک بر پایداری خاکدانه را نشان می‌دهد. روند مشاهده شده در مورد این پارامتر نیز مانند MWD_i و MWD_w بود و در ۵ نوع خاک مورد مطالعه استفاده از ترکیبات اصلاح کننده باعث افزایش پایداری خاکدانه شد که این افزایش در خاک ۱، ۲، ۴ و ۵ بیشترین مقدار بود. در خاک ۱ تا ۵ بیشترین افزایش در مقایسه با شاهد به ترتیب در تیمارهای جلبک (۱۰۱ درصد)، سالفید (۱۸۲ درصد)، سالفید (۳۰/۲ درصد)، سالفید+جلبک (۲۱۷ درصد) و سالفید+جلبک (۲۰۳ درصد) اندازه‌گیری شد.

نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان از اثر مثبت تیمارهای به کار برده شده بر میانگین وزنی قطر و پایداری خاکدانه‌ها داشت. با وجود افزایش مقدار ویژگی‌های ذکر شده در مقایسه با شاهد ولی با این حال روند مشاهده شده در خاک‌های مورد مطالعه یکسان نبوده و در هر خاک و هر ویژگی اندازه‌گیری شده یک کدام از اصلاح کننده‌ها را می‌توان به عنوان بهترین تیمار انتخاب کرد. دلیل این امر را می‌توان به وجود خصوصیات مختلف و برهمکنش این خصوصیات با اصلاح کننده‌های مورد مطالعه دانست. به نظر می‌رسد که کلسیم موجود در ترکیب سالفید از یک طرف و ترکیبات تولیدی توسط جلبک



شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و ماده اصلاح کننده بر پایداری خاکدانه

Figure 3- Results of comparison of means for interaction effect of soil type and conditioner on aggregate stability

استفاده (سالفید) در این تحقیق شامل ترکیبی با مقدار زیاد کلسیم بود که به نظر می‌رسد کلسیم موجود در این ترکیب باعث بهبود ویژگی‌های خاک در مقایسه با شاهد شده است. در مورد نقش کلسیم در بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک بریدیس و همکاران (Briedis et al., 2012) و روولی و همکاران (Rowley et al., 2018) این گونه

یوشیکاوا و همکاران (Yoshikawa et al., 2018) نیز اثر مثبت ماده آلی بر پایداری خاکدانه را گزارش کردند. سیکس و همکاران (Six et al., 2004) گزارش کردند که به طور خاص، واکنش فاز جامد بین کانی‌های خاک، کاتیون‌های قابل تبادل و کربن آلی موجود در خاک منجر به تشکیل خاکدانه می‌شود. دیگر اصلاح کننده مورد

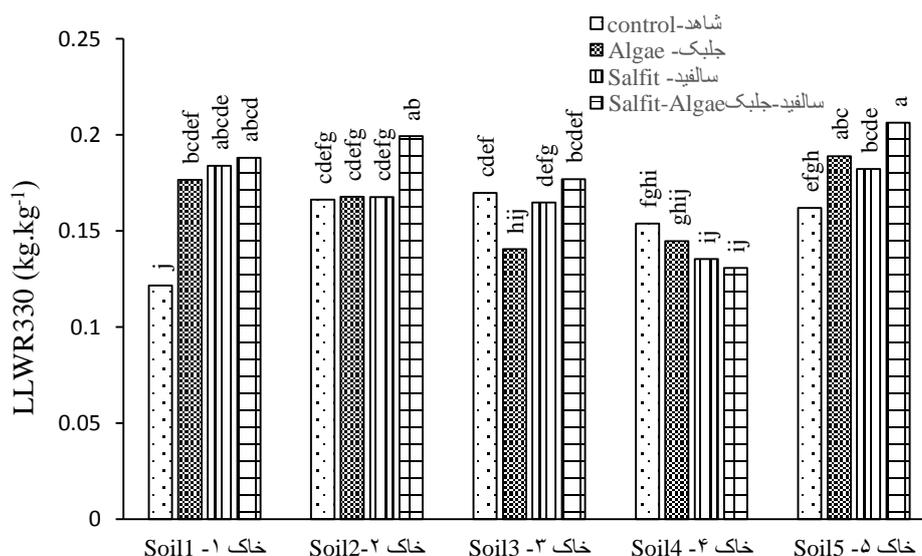
تیمار جلبک، سالفید و سالفید-جلبک در خاک ۵ در مقایسه با شاهد به ترتیب ۱۲/۴، ۱۶/۷ و ۱۳/۶ درصد بود (شکل ۴).

تأثیر اصلاح کننده های شیمیایی و آلی کاربرد همزمان این دو در خاک های مورد مطالعه اثرات متفاوتی بر دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت داشت. تاثیر مثبت این تیمارها در دو خاک ۱ و ۵ مشاهده شد که اختلاف معنی داری با شاهد داشتند. در خاک ۲ تنها سالفید اثر مثبتی داشته و این در حالی بود که در دو خاک ۳ و ۴ کاربرد اصلاح کننده ها باعث کاهش دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت شد. مطابق با نتایج به دست آمده؛ مشخص شد که در ۵ خاک مورد مطالعه مقادیر اولیه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت متفاوت بود که علت این امر احتمالا در تفاوت بین خصوصیات شیمیایی و فیزیکی اولیه خاکها باید بررسی شود. در ارتباط بودن میزان LLWR با خصوصیات اولیه خاک توسط محققینی همچون داسیلوا و کی (da Silva et al., 1997) و چان و همکاران (Chan et al., 2011) نیز گزارش شده است. در این مطالعه نیز کمترین میزان LLWR330 در خاک ۴ مشاهده شده که این خاک دارای بیشترین وزن مخصوص ظاهری در مقایسه با سایر خاکها بود.

بیان کردند که توانایی اصلاح ویژگی های فیزیکی خاک به این دلیل است که یون کلسیم پیوندهای الکترواستاتیکی بین ذرات رس و مواد آلی تشکیل می دهد. تأثیر اصلاح کننده های بر پایه کلسیم بر افزایش پایداری خاکدانه ها، کاهش پراکنش رس و کاهش رواناب و تلفات خاک گزارش شده است (Aye et Norambuena et al., 2014; al., 2016).

دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت و گنجایش آب انتگرالی

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و مواد اصلاح کننده بر LLWR330 نشان داد که در پنج نوع خاک مورد مطالعه بیشترین مقدار این ویژگی در خاک ۵ بود (شکل ۴). استفاده از سه نوع اصلاح کننده مورد مطالعه در این تحقیق نیز تنها در دو خاک ۵ توانست اختلاف معنی داری با شاهد ایجاد کند و در چهار خاک دیگر بین تیمارهای اصلاح کننده و شاهد اختلاف معنی داری مشاهده نشد. با این وجود در دو خاک ۱ و ۲ نیز روند مانند خاک ۵ بوده و تیمارهای اصلاح کننده باعث افزایش LLWR330 شده و البته اختلاف این تیمارها با شاهد معنی دار نبود. میزان افزایش اندازه گیری شده در سه



شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و ماده اصلاح کننده بر LLWR330

Figure 4- Results of comparison of means for interaction effect of soil type and conditioner on LLWR330

منحنی مشخصه رطوبتی خاک شد. این محققین علت ارتباط بین مقادیر میانگین وزنی قطر خاکدانه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت را این گونه بیان کرد که میانگین وزنی قطر خاکدانه جز شاخص های ساختمان خاک به شمار می رود و از سمت دیگر حدود دامنه رطوبتی نیز وابستگی زیادی به ساختمان خاک دارند. روند مشاهده شده در مورد گنجایش آب انتگرالی بدین صورت

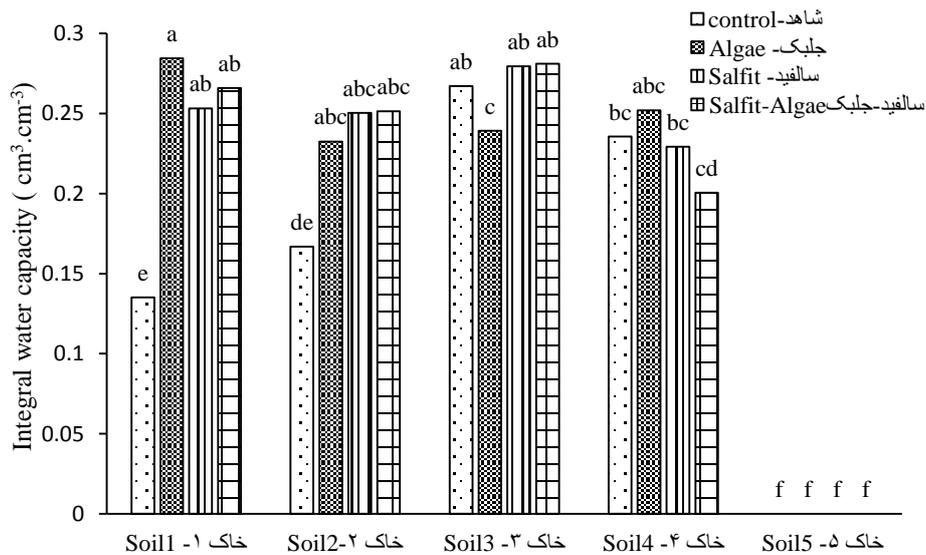
در مورد علت افزایش و بهبود دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در دو خاک ۱ و ۵ این گونه می توان گفت که به نظر می رسد در این دو خاک تیمارهای مورد مطالعه باعث افزایش پایداری خاکدانه شده که این امر باعث افزایش مقادیر این دامنه در این دو خاک شده است. در پژوهش انجام شده توسط بیات و همکاران (Bayat et al., 2013) نیز گزارش شد که بهبود میانگین وزنی قطر خاکدانه باعث بهبود

خاک‌های مختلف بر میزان گنجایش انتگرالی آب متفاوت بود. در مورد علت صفر بودن این مقادیر در خاک ۵ این گونه می‌توان گفت که قابلیت هدایت الکتریکی بسیار بالا در این خاک (جدول ۱) احتمالاً علت این امر می‌باشد. محمدی و ختار (Mohammadi and Khataar, 2018) نیز در مطالعه خود گزارش کردند که شوری با کاهش انرژی آب در خاک در تمام دامنه منحنی رطوبتی باعث کاهش جذب آب می‌شوند.

نتایج بررسی همبستگی بین پارامترهای اندازه‌گیری شده نشان داد که بیشترین میزان همبستگی بین AS و MWD_w مشاهده شد. در بین پارامترهای اندازه‌گیری شده، پایداری خاکدانه بیشترین میزان همبستگی با سایر ویژگی‌ها را دارا بود و میزان همبستگی این ویژگی با $LLWR330$ ، $LLWR100$ ، IWC و MWD_w به ترتیب ۳۶، ۵۵، ۷۵ و ۸۸ درصد بود. گنجایش انتگرالی آب خاک نیز با دو ویژگی $LLWR330$ (۸۴٪) و MWD_w (۷٪) همبستگی معنی‌دار در سطح یک درصد داشت (جدول ۴). وجود رابطه مثبت و معنی‌دار بین دو پارامتر $LLWR100$ و IWC نشان دهنده هماهنگی بین روش‌های اندازه‌گیری این پارامترها دارد.

بود که این ویژگی در خاک ۵ دارای کمترین مقدار بوده و ۴ خاک دیگر اختلاف زیادی با این خاک داشتند. تیمارهای اصلاح کننده به طور کلی باعث بهبود میزان گنجایش آب انتگرالی شدند و البته در خاک ۴ دو تیمار سالفید و سالفید-جلبک باعث کاهش این ویژگی شده که البته این کاهش در مقایسه با شاهد معنی‌دار نبود. بیشترین اختلاف مشاهده شده در بین تیمارهای اصلاح کننده با شاهد در دو خاک ۱ و ۲ مشاهده شد. میزان افزایش اندازه‌گیری شده در گنجایش آب انتگرالی در سه تیمار جلبک، سالفید و سالفید-جلبک در خاک ۱ به ترتیب ۳۲/۱، ۲۵/۶ و ۲۸/۳ درصد بود. این افزایش در خاک ۲ به ترتیب ۲۷/۸، ۳۴/۷ و ۳۵/۱ درصد بود (شکل ۵).

مفاهیمی همچون LLWR و IWC علاوه بر تعیین آب قابل استفاده خاک، می‌توانند به عنوان شاخص کیفیت ساختمان خاک در ارزیابی قابلیت خاک برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرند (Asgarzadeh et al., 2010). از طرف دیگر طبق گزارش عسگرزاده و همکاران (Asgarzadeh et al., 2010) IWC رفتار پدیده‌های طبیعی در خاک را بهتر نشان داده و می‌توان از آن برای مدیریت مناسب آبیاری استفاده کرد. تأثیر تیمارهای آزمایش در این مطالعه در



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع خاک و ماده اصلاح کننده بر گنجایش آب انتگرالی

Figure 5- Results of comparison of means for interaction effect of soil type and conditioner on IWC

جدول ۴- نتایج همبستگی ویژگی‌های مورد مطالعه

Table 4- Correlation results of studied parameters

	LLWR330	LLWR100	IWC	MWD_w	MDW_d	AS
LLWR330	1					
LLWR100	-0.03 ^{ns}	1				
IWC	-0.15 ^{ns}	0.84 ^{**}	1			
MWD_w	-0.17 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.70 ^{**}	1		
MDW_d	0.41 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.23 ^{ns}	1	
AS	-0.36 ^{**}	0.55 ^{**}	0.75 ^{**}	0.88 ^{**}	0.06 ^{ns}	1

بهتری داشته و به نظر می‌رسد انتخاب نوع اصلاح کننده باید با توجه به هدف نهایی و پارامتر خاص مورد نظر انتخاب شود. اصلاح کننده های مورد استفاده در این تحقیق با تأثیر مثبت بر میانگین وزنی قطر خاکدانه و پایداری خاکدانه توانستند در بهبود سایر خصوصیات مورد اندازه‌گیری نیز مفید واقع شوند. به نظر می‌رسد که کاربرد سطوح مختلف اصلاح کننده‌ها و همچنین بررسی برهمکنش آن‌ها با یکدیگر باید با توجه به خصوصیات اولیه خاک مورد بررسی قرار گیرد.

از طرف دیگر نتایج این مطالعه نشان دهنده‌ی تأثیر مثبت تیمارهای آزمایشی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده بود. که این اثر مثبت در تمام خاک های مورد مطالعه مشاهده شد.

نتیجه‌گیری

به طور کلی نتایج این تحقیق اثر مثبت ترکیبات اصلاح کننده بر خصوصیات فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه را نشان داد که در این بین در هر کدام از پارامترهای مورد بررسی یک اصلاح کننده تأثیر

منابع

1. Al-Maliki S., and Al-Masoudi M. 2018. Interactions between Mycorrhizal fungi, tea wastes, and algal biomass affecting the microbial community, soil structure, and alleviating of salinity stress in corn yield (*Zea mays* L.). *Plants* 7(3):63. <https://doi.org/10.3390/plants7030063>.
2. Asgarzadeh H., Mosaddeghi M.R., Mahboubi A.A., Nosrati A., and Dexter A.R. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil* 335: 229–244. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0410-6>.
3. Aye N.S. Sale P.W., and Tang C. 2016. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. *Biology and Fertility of Soils*, 52(5): 697-709. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1111-y>.
4. Azami Sardou R., and Mahmood Abadi M. 2016. Relationship between mean weight of aggregate diameter with some physical and chemical properties of soil in different cultivation systems. Fourth National Conference on the Application of New Technologies in Engineering Sciences. (In Persian)
5. Barik K.M., Canbolat Y., Yanik R., and Rafiq K. 2011. Compressive behavior of soil as affected by aggregate size with Different textures in turkey. *Journal of Animal and Plant Sciences* 21(2): 186-192.
6. Bayat H., Ebrahimi I., Rastgo M., Zare abyaneh H., and Davatghar N. 2013. Fitting Different Soil Water Characteristic Curve Models on the Experimental Data of Various Textural Classes of Guilan Province Soils. *Water and Soil Science* 23(3): 151-167.
7. Briedis C., de Moraes Sá J.C., Caires E.F., de Fátima Navarro J., Inagaki T.M., Boer A., and Dos Santos J.B. 2012. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. *Geoderma*, 170: 80-88. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.011>.
8. Chan K.Y., Conyers M.K., Li G.D., Helyar K.R., Poile G., Oates A., and Barchia I.M. 2011. Soil carbon dynamics under different cropping and pasture management in temperate Australia: Results of three long-term experiments. *Soil Research* 49(4): 320-328. <https://doi.org/10.1071/SR10185>.
9. Chaplot V., and Cooper M. 2015. Soil aggregate stability to predict organic carbon outputs from soils. *Geoderma* 243: 205-213. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.12.013.
10. Emadodin I., Reiss S., and Bork H.R. 2009. A study of the relationship between land management and soil aggregate stability (case study near Albersdorf, Northern-Germany). *Journal of Agriculture and Biological Sciences* 4(4): 48-53.
11. Falchini L., Sparvoli E., and Tomasell L. 1996. Effect of Nostoc (Cyanobacteria) inoculation on the structure and stability of clay soils. *Biology and Fertility of Soils* 23: 346–352. DOI:10.1007/BF00335965.
12. Fattet M., Fu Y., Ghestem M., Ma W., Foulonneau M., Nespoulous J., Bissonnais Y.L., and Stokes A. 2011. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena* 87: 60-69. <https://hal.inrae.fr/hal-02649976>.
13. Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: A. Klute (Ed), *Agronomy Handbook no 9. Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 363–375.
14. Ghafoor A., Murtaza G., Ahmad B., and Boers T.H.M. 2008. Evaluation of amelioration treatments and economic aspects of using saline-sodic water for rice and wheat production on salt-affected soils under arid land conditions. *Journal of soil and Irrigation Drainage* 57: 424-434. DOI: 10.1002/ird.377.
15. Gliński J., Gliński J., Horabik J., and Lipiec J. 2011. Agrophysical objects (soils, plants, agricultural products, and food). *Encyclopedia of Agrophysics* (Eds J. Gliński, J. Horabik, J. Lipiec), Springer Press, Dordrecht-Heidelberg-London-New York. DOI: 10.2478/ssa-2013-0012.

16. Groenevelt P.H., Grant C.D., and Semetsa S. 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research* 39(3): 577-598. DOI: [10.1071/SR99084](https://doi.org/10.1071/SR99084).
17. Irshad M., Honna T., Yamamoto S., Eneji A.E., and Yamasaki N. 2005. Nitrogen mineralization under saline conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36(11-12): 1681-1689. <https://doi.org/10.1081/CSS-200059116>.
18. Jones C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1208-1211. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700060029x>.
19. Kemper W.D., and Rosenau R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part I. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edition. ASA Madison, WI, pp. 425-442.
20. Lado M., Paz A., and Ben-Hur M. 2004. Organic matter and aggregate size interaction, seal formation, and soil loss. *Soil Science Society America Journal* 68: 935-942. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.9350>.
21. Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and gypsum. In: Sparks D.L. (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America Journal and ASA, Madison, WI. p. 437-474.
22. Liu A., Ma B.L., and Bomke A.A. 2005. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon, and polysaccharides. *Soil Science Society of America Journal* 69(6): 2041-2048. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0032>.
23. Malam Issa O., Le Bissonnais Y., Défarge C., and Trichet J. 2001. Role of a cyanobacterial cover on structural stability of sandy soils in the Sahelian part of western Niger. *Geoderma* 101: 15-30. DOI: [10.1016/S0016-7061\(00\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00093-8).
24. Mbagwu J. 2003. Aggregate stability and soil degradation in the Tropics. *Geoderma*, pp. 3-21.
25. Mohammadi M.H., and Khataar M. 2018. A simple numerical model to estimate water availability in saline soils. *Soil Research* 56(3): 264-274. <https://doi.org/10.1071/SR17081>.
26. Muhammad Siddique S., Anwar H., and Abdul R. 2002. Effect of salt on bulk density, particle density and porosity of different soil series, *Asia Journal of Plant Sciences* 5 (1): 5-6. DOI: [10.3923/ajps.2002.5.6](https://doi.org/10.3923/ajps.2002.5.6).
27. Murtaza G., Ghafoor A., Owens G., Qadir M., and Kahlon U.Z. 2009. Environmental and economic benefits of saline- sodic soil reclamation using low quality water and soil amendments in conjunction with a rice-wheat cropping system. *Journal of Agronomy Crop Science* 195: 124-136. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00350.x>.
28. Neyshabouri M.R., Kazemi Z., Oustan S., and Moghaddam M. 2014. PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma*, 226: 179-187. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.02.008](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.02.008).
29. Norambuena M., Neaman A., Schiappacasse M.C., and Salgado E. 2014: Effect of liquid humus and calcium sulphate on soil aggregation. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14: 701-709. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162014005000056>.
30. Pearson K.E. 2004. The basic effects of salinity and sodicity effects on soil physical properties. http://waterqualityMontana.edu/docs/methane/basics_highlight_t.shtml.
31. Peng X., and Bruns M.A. 2019. Development of a nitrogen-fixing cyanobacterial consortium for surface stabilization of agricultural soils. *Journal of Applied Phycology*, 31: 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1597-9>.
32. Rowley M.C., Grand S., and Verrecchia E.P. 2018: Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon. *Biogeochemistry* 137: 27-49. DOI: [10.1007/s10533-017-0410-1](https://doi.org/10.1007/s10533-017-0410-1).
33. Schumann A.W., and Sumner M.E. 2000. Chemical evaluation of nutrient supply from fly ash-biosolids mixtures. *Soil Science Society of America Journal* 64: 419-426. DOI : [10.2136/sssaj2000.641419x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.641419x).
34. Sadiq M., Hassan G., Mehdi S.M., Hussain N., and Jamil M. 2007. Amelioration of saline sodic soil with tillage implements and sulphuric acid application. *Pedosphere* 17:182-190. DOI: [10.1016/S1002-0160\(07\)60024-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60024-1).
35. da Silva A.P., Kay B.D., and Perfect E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1775-1781. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>.
36. da Silva A.P., and Kay B.D. 1997. Estimating least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal* 61: 877-883. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100030023x>.
37. Six J., Paustian K., Elliott E.T., and Combrink C. 2000. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal* 64(2): 681-689. DOI: [10.2136/sssaj2000.642681x](https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642681x).
38. Six J., Bossuyt H., Degryze S., and Deneff K. 2004: A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Tillage Research* 79: 7-31. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>.
39. Tobiášová E. 2011. The effect of organic matter on the structure of soils of different land uses. *Soil and Tillage Research* 114(2): 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.003>.

40. Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis. Part 3*(875): 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.
41. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29-38. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
42. Wang Y.Q., Zhang X.C., Zhang J.L., and Li S.J. 2009. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 19: 486–495. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60141-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60141-7).
43. Worku A., Minaleshewa M., and Kidan H.G. 2016. Impact of Gypsum and Sulfuric Acid Application on Cotton Yield under Saline Sodic Soil Condition in Melka Sadi Irrigated Farm. *Academia Journal Agriculture Research* 4(2): 091-095.38- DOI: [10.15413/ajar.2015.0190](https://doi.org/10.15413/ajar.2015.0190).
44. Yoshikawa S., Kuroda Y., Ueno H., Kajiura M., and Ae N. 2018. Effect of phenolic acids on the formation and stabilization of soil aggregates. *Soil Science and Plant Nutrition* 64(3): 323-334. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1431011>.



Spring Frost Early Warning for Apple Orchards Using WRF Model

S.M. Ebnehejazi¹, H. Yazdanpanah^{2*}, S. Movahedi³, M.A. Nasr-Esfahani⁴, M. Moradizadeh⁵

Received: 11-11-2021

Revised: 13-12-2021

Accepted: 28-02-2022

Available Online: 20-05-2022

How to cite this article:

Ebnehejazi SM., Yazdanpanah H., Movahedi S., Nasr Esfahani MA., and Moradizadeh M. 2022. Spring Frost Early Warning for Apple Orchards Using WRF Model. Journal of Water and Soil 36(1): 127-144. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.73254.1107](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.73254.1107)

Introduction

Agricultural products frost in spring imposes heavy financial losses to agriculture particularly in northwest of Iran's orchards. Not only temperature is one of the most important climate parameters but also it is a very crucial element in the agricultural sector. Untimely temperature fluctuations and rise and fall which are usually unexpected will cause shock and heavy damages. Therefore taking into consideration the agricultural products frost and offering an approach would be of great importance for reducing relevant damages. In studies carried out by Omidvar and Dehghan Banadoki (2012) and Hesari et al. (2015) characteristics and different types of frosts have been considered in relation to the agricultural products. Different models were introduced to predict flowering date in different investigated regions. In more studies, in addition to determining the best model for predicting the date of occurrence of flowering stage, probable date of last frost has been estimated as well. Investigating long term temperature changes is a method which applied by Martínez-Lüscher (2017) and Vitasse et al. (2018) to find out about established changes in flowering date and also changes in the last frost date. Nasr Esfahani and Yazdanpanah (2019) realized that 48-hour early warning for frost occurrence can be performed with adequate precision. Despite all studies in the field of products frost particularly during flowering date, it seems a rapid frost warning system must be established and provided to make early warning for each orchard. In this essay, since our goal is to make such early warning three days before frosting, so we have to investigate accuracy and validity of 72-hour minimum temperature simulation using WRF model. On the other hand, we must know phenological stage of each product in each orchard to inform the farmer about frost hazards based on critical temperature, therefore the second goal of this research is to detect phenological stages through Landsat 7 and Landsat 8 images.

Materials and Methods

In order to achieve the aim of current study, 72-hour minimum temperature simulation through the Weather Research and Forecasting (WRF) model was investigated and values of vegetation index were derived for a 30 meters pixel at an experimental orchard in Kahriz, West Azerbaijan Province, in 2016-2107. Computational grid for 2 meters temperature simulation using WRF model contains of three nested grid with horizontal resolution of 27, 9 and 3 kilometers. Horizontal resolution of terrain height and land use data is equal to 30 second (about 1 km). The initial and 3-h boundary conditions with 0.5° horizontal resolution from the Global Forecast System (GFS) were obtained from National Centers for Environmental Information (NCEI). Based on the previous research KFMJY physical scheme configuration for WRF model were used in this research. Model's hindcasts at 03:00 UTC hour for each of 51 synoptic weather stations of northwest of Iran in internal computational grid were interpolated by MATLAB software with interp 3 function using linear method, then the obtained values

1, 2 and 3- Ph.D. Student of Agricultural Climatology and Associate Professors, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: h.yazdan@geog.ui.ac.ir)

4- Assistant Professor, Department of Irrigation, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

5- Assistant Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

were compared to minimum temperature observed in the stations by using MAE, MSE, RMSE and MSSS indicators. Phenological statistics, the time of beginning and end of growth stages were obtained from Iran Meteorological Organization. Besides, 77 Landsat 7 satellite images of ETM+ sensor, and 41 Landsat 8 images of OLI sensor were downloaded from United States Geological Survey website from March to September 2007-2016 with a spatial resolution of 30 meters. In this research, atmospheric and radiometric correction were performed with the FLAASH method on the metadata file in the ENVI software environment and then vegetation index was calculated using NDVI index.

Results and Discussion

Examining the evaluation indicators of the WRF model, results revealed a significant correlation and regression model between 2 meters temperature variable from WRF model output and minimum temperature variable observed in the entire stations for 72-hour simulation. As a result WRF model can be applied in 72-hour temperature simulation in the area of study. Another finding of this research indicated that in comparison to the field-recorded data, NDVI values gained from Landsat images properly indicates changes of phenology stages in the relevant apple orchard. In this study, the indicators used to evaluate the model error showed model hindcasts are more accurate for 24-hour and then 48-hour simulations than for 72-hour simulation, but the 72-hour simulation accuracy is not much different from 24-hour and 48-hour simulations. In northwestern Iran, which is a mountainous region, it is very difficult to simulate airflow in areas with complex topography, therefore the total correlation coefficient of all stations in all three simulations is in the range of 0.5, and the error rates of MAE and RMSE, respectively reaches about 2.8 and 3.8 Celsius. According to the second finding of this research, the NDVI indicator obtained from Landsat 7 and Landsat 8 satellite images can show the progress and changes in the phenological stages of apple trees.

Conclusion

This study showed the efficiency of the WRF model for 72-hour simulation of the minimum temperature as well as the potential of Landsat 7 and Landsat 8 images in detecting apple phenological stages in the study area. Therefore, by using the WRF model for 72-hour minimum temperature simulation and recognizing the phenological stages from Landsat images, if the temperature in any orchard reaches a critical level in the next 72 hours due to the phenological stage, frost warning can be announced and then frost mitigation should be done by the farmer.

Keywords: Early warning system, Identification of phenological stages, NDVI, Spring frost, WRF model

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۱۲۷-۱۴۴

پیش‌آگاهی سرمازدگی بهاره باغات سیب با استفاده از مدل WRF

سیده محبوبه ابن حجازی^۱ - حجت اله یزدان پناه^{۲*} - سعید موحدی^۳ - محمدعلی نصر اصفهانی^۴ - مینا مرادی زاده^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

چکیده

سرمازدگی محصولات کشاورزی در فصل بهار، همه‌ساله زیان‌های سنگین مالی را به بخش کشاورزی به‌ویژه در باغات شمال غرب ایران وارد می‌کند. هدف این مقاله، ارزیابی سیستمی برای پیش‌آگاهی سرمازدگی با استفاده از شبیه‌سازی دمای حداقل ۷۲ ساعته به‌وسیله مدل WRF و تشخیص مراحل فنولوژی سیب از تصاویر لندست است تا با شناخت مراحل فنولوژی محصول و دمای بحرانی در آن مرحله چنانچه دمای حداقل در ۷۲ ساعت آینده به دمای بحرانی برسد پیش‌آگاهی سرمازدگی صورت گیرد. داده‌های دمای ۲ متری خروجی مدل WRF برای شبکه محاسباتی داخلی، در ۵۱ ایستگاه سینوپتیک با دمای حداقل مشاهداتی در ایستگاه‌ها مقایسه شد. مقادیر شاخص NDVI نیز با استفاده از تصاویر لندست ۷ و ۸ سنجنده‌های ETM+ و OLI در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ برای باغ سیب واقع در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهرزی ارومیه محاسبه و با زمان مراحل فنولوژی ثبت‌شده در محل مقایسه شد. نتایج نشان داد که معنی‌داری همبستگی و مدل رگرسیونی بین متغیر دمای ۲ متری خروجی مدل WRF و متغیر دمای حداقل مشاهداتی در مجموع کل ایستگاه‌ها برای شبیه‌سازی ۷۲ ساعته وجود دارد. در نتیجه می‌توان از مدل WRF در شبیه‌سازی ۷۲ ساعته دما در منطقه مورد مطالعه بهره برد. یافته دیگر این تحقیق نشان داد که در مقایسه با داده‌های زمینی ثبت‌شده در منطقه، مقادیر NDVI به‌دست‌آمده از تصاویر لندست به‌خوبی گویای تغییرات مراحل فنولوژی در باغ سیب مورد مطالعه است.

واژه‌های کلیدی: تشخیص مراحل فنولوژیکی، سرمازدگی بهاره، سیستم هشدار سریع، مدل WRF، NDVI

مقدمه

دما علاوه بر آن که یکی از پارامترهای مهم اقلیمی است عنصری بسیار تأثیرگذار در بخش کشاورزی نیز می‌باشد. نوسانات و افت‌وخیزهای ناهمگام دمایی که اغلب دور از انتظار است باعث غافلگیری و بروز خسارت سنگین می‌شود (Khosravi et al., 2008). هرگاه در فصل بهار که زمان رویش برگ‌های جدید و

پرطراوت است دما به زیر نقطه انجماد برسد خسارت سرمازدگی بهاره رخ می‌دهد (Hiratsuka and Zalasky, 1993). در بیشتر مواقع این حالت در شب یا صبح، در اثر ریزش هوای سرد (اغلب قطب شمال) بر روی آسمان بدون ابر یا به دلیل سرد شدن لایه هوای نزدیک به سطح زمین در نتیجه تابیدن گرما از سطح زمین به جو اتفاق می‌افتد. ماهیت خسارت سرمازدگی به مرحله‌ای از رشد گیاه بستگی دارد که سرمازدگی در آن رخ می‌دهد. به‌طور کلی در ابتدای رشد و نمو گیاه مقاومت آن به سرمازدگی بسیار کم است (Graczyk and Szwed, 2020). یکی از مراحل فنولوژیکی بحرانی در درختان میوه خزان‌کننده مرحله شکوفه دهی است زیرا در این مرحله گیاه به تنش‌های محیطی به‌ویژه سرما و یخبندان بسیار حساس است؛ بنابراین چنانچه دمای محیط در مرحله شکوفه‌دهی کمتر از مقدار بحرانی گردد، بسته به تداوم سرما (طول مدتی که دما کمتر از آستانه تحمل است) محصول دچار صدمه شده و گاهی خسارت ناشی از سرما اقتصاد کشاورزی یک منطقه را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kamali et

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری آب و هواشناسی کشاورزی و دانشیاران، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: h.yazdan@geog.ui.ac.ir)

۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.73254.1107

(al., 2007).

در ایران اگرچه آمار دقیقی از میزان خسارت سرمازدگی در سال‌های مختلف در دست نیست ولی با تحلیل گرامت‌هایی که هر ساله توسط صندوق بیمه کشاورزی پرداخت می‌شود می‌توان برآوردی از حداقل زیان‌های وارده به کشاورزی کشور از این رهگذر را به دست آورد. از بین ۱۲ محصول استراتژیک که زیر پوشش بیمه بوده‌اند بیشترین خسارت مربوط به سرمازدگی است که به‌طور متوسط ۳۴/۸ درصد کل گرامت پرداختی بوده است (Khalili, 2014). بر اساس گزارش معاونت باغبانی در اثر پدیده سرمازدگی در سال ۹۶ بالغ‌بر ۷۱۰۰ میلیارد تومان (در سطح ۶۶۱ هزار هکتار) و در سال ۹۷ بیش از ۱۱۰۰۰ میلیارد تومان خسارت (در سطح ۶۳۵ هزار هکتار) به باغات کشور وارد گردیده است به طوری که ۴۷۳۰ تن محصول باغی کشور از بین رفته است (Agricultural Mechanization Development Center 2018). در سال ۱۳۹۸ در ایران بیشترین میزان تولید در بین محصولات باغی مربوط به سیب با تولید حدود ۴ میلیون تن و سهم ۱۷/۱ درصد از کل میزان تولید محصولات باغی بوده که استان آذربایجان غربی با سهم ۲۷/۵ درصدی در رتبه اول تولیدکنندگان سیب کشور قرار داشته است (Ahmadi et al., 2020). میزان خسارت سرمازدگی در سال ۹۷ در استان آذربایجان غربی ۷۹۸۱ میلیارد ریال (در سطح ۱۱ هزار و ۳۹۰ هکتار) بوده است (Agricultural Mechanization Development Center 2018). بنابراین پرداختن به موضوع سرمازدگی محصولات کشاورزی و ارائه راهکاری برای کاهش خسارت‌های ناشی از آن اهمیت زیادی دارد. به دلیل اهمیت موضوع در پژوهش‌هایی که به‌عنوان مثال توسط امیدوار و دهقان بنادکی (Omidvar and Dehghan Banadoki, 2012) و حصارى و همکاران (Hesari et al., 2015) صورت گرفته به تحلیل ویژگی‌ها و انواع یخبندان در ارتباط با محصولات کشاورزی پرداخته شده و یخبندان‌ها از لحاظ شدت در ارتباط با محصولات کشاورزی دسته‌بندی و بر مبنای آن تحلیل مکانی - زمانی سرمازدگی انجام شده و نقشه‌های وقوع سرمازدگی برای مناطق مورد مطالعه تهیه شده است. با توجه به اهمیت پیش‌بینی تاریخ‌های فنولوژیکی برای پیشگیری از خسارت‌های ناشی از متغیرهای هوا، مدل‌سازی پیش‌بینی زمان وقوع مراحل فنولوژیکی محصول از اقداماتی است که مورد توجه قرار گرفته است و از روش‌های مختلفی مانند روش شبکه عصبی مصنوعی (Yazdanpanah et al., 2010)، (Safa et al., 2014) و روش تشخیص مراحل فنولوژیکی محصولات از طریق تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های پوشش گیاهی (Shuai et al., 2013)، (Von Bennwitz Alvarez et al., 2018) استفاده شده است. پیش‌بینی تاریخ دقیق رخداد گلدهی نیز نقش مهمی در کاهش خسارت ناشی از دماهای پایین دیررس بهاره دارد. تاکنون محققان مدل‌هایی مانند M1، M2 (Chmielewski et al., 2011) و

دینامیکی (Fallah Ghalhari and Ahmadi, 2017) را برای پیش‌بینی زمان گلدهی ارائه داده‌اند. هور و آهن (Hur and Ahn, 2015) نیز با تلفیق دو مدل فنولوژی و هواشناسی (مدل WRF)، تاریخ اولین گلدهی گیلاس، هلو و گلابی را در کره جنوبی پیش‌بینی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که روش مذکور نمی‌تواند تاریخ شروع گلدهی را در منطقه مورد مطالعه به‌درستی پیش‌بینی کند.

در مطالعات دقیق‌تر، علاوه بر تعیین بهترین مدل برای پیش‌بینی گلدهی، تاریخ احتمال وقوع آخرین یخبندان نیز برآورد شده است (Kamali et al., 2007)، (Farajzadeh et al., 2010)، (Valashedi and Sabziparvar, 2016). بررسی روند تغییرات درجه حرارت در بلندمدت، روشی است که برای پی بردن به تغییرات ایجادشده در تاریخ وقوع گلدهی و نیز تغییرات در تاریخ وقوع آخرین یخبندان توسط مارتینز - لوسچر (Martínez-Lüscher, 2017) و ویتاسه و همکاران (Vitasse et al., 2018) استفاده شده است. نصر اصفهانی و یزدان پناه (Nasr Esfahani and Yazdanpanah, 2019) دریافتند که می‌توان با کمک مدل فنولوژی و شبیه‌سازی دما به‌وسیله مدل WRF، هشدار سریع ۴۸ ساعته رخداد سرمازدگی در باغات منطقه مورد مطالعه را با دقت کافی انجام داد. هدف اصلی و نهایی همه تحقیقاتی که در زمینه سرمازدگی صورت گرفته کم کردن خسارت ناشی از سرمازدگی است این تحقیق نیز در راستای همین هدف انجام شده است. باوجود پژوهش‌های زیادی که در زمینه سرمازدگی به محصولات به‌ویژه در زمان گلدهی صورت گرفته است اما همچنان لزوم ایجاد یک سیستم هشدار سریع وجود دارد تا برای هر باغ بتوان پیش‌آگاهی را انجام داد پس چون می‌خواهیم پیش‌آگاهی از سه روز قبل انجام شود یکی از اهداف این پژوهش ارزیابی دقت و صحت شبیه‌سازی‌های ۷۲ ساعته دما به‌وسیله مدل WRF است. از طرف دیگر باید بدانیم در هر باغ محصول در کدام مرحله فنولوژیکی قرار دارد تا بر اساس دمای بحرانی هر مرحله اعلان خطر سرمازدگی به کشاورز انجام شود. بنابراین دومین هدف این پژوهش تشخیص مراحل فنولوژیکی از طریق تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ است.

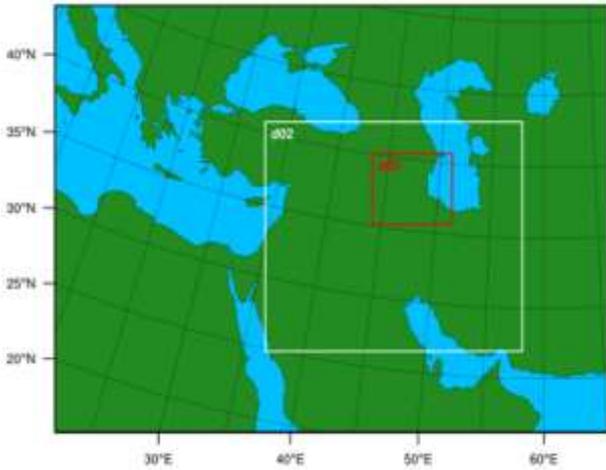
مواد و روش‌ها

مناطق مطالعاتی

منطقه مطالعاتی در ارزیابی مدل WRF

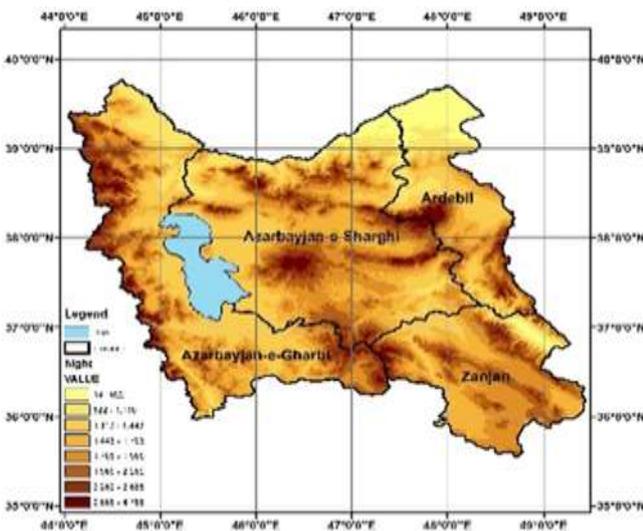
این مطالعه کارایی مدل WRF را در منطقه شمال غرب ایران (کوچک‌ترین شبکه مدل) مورد بررسی قرار می‌دهد. این منطقه شامل استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل و زنجان است. در این مطالعه از ۵۱ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در شمال غرب ایران استفاده شد.

ب) شبکه‌های محاسباتی انتخابی برای پیش‌بینی وضع هوا
b) Selective computational grids for numerical weather prediction (NWP)

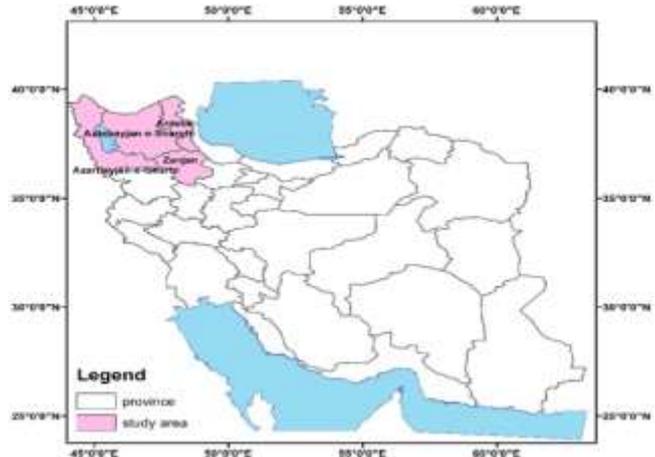


د) مدل رقومی ارتفاع

d) Digital Elevation Model (DEM)



الف) موقعیت جغرافیایی کوچک‌ترین شبکه مدل
a) Geographical location of the smallest model's grid



ج) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک

c) Synoptic stations location



شکل ۱- الف) موقعیت جغرافیایی کوچک‌ترین شبکه محاسباتی - شمال غرب ایران - که ارزیابی شبیه‌سازی مدل WRF در محدوده این شبکه انجام شد. ب) شبکه‌های محاسباتی مدل WRF. ج) موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک که برای ارزیابی شبیه‌سازی‌های مدل WRF استفاده شدند. د) مدل رقومی ارتفاع شمال غرب ایران (<https://girs.ir>).

Figure 1- a) Computational grids of WRF model, b) Geographical location of the smallest computational grid, northwest of Iran, in which hindcast assessment of WRF model carried out. c) Northwest of Iran digital elevation model, d) Location of synoptic stations were used to assess simulation of WRF model (<https://girs.ir>).

در مرکز باغ آزمایشی سیب در اداره تحقیقات کشاورزی کهرزی استان آذربایجان غربی در شمال غرب ایران (37° 53' 30.80"N, 45° 00' 5.72"E) برای سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۱۷ استخراج شد (شکل ۲). بر اساس آمار بلندمدت ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهرزی ارومیه طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۶۵ میانگین بیشینه دما ۱۷/۴ درجه سلسیوس، میانگین حداقل دما ۷/۳ درجه سلسیوس، میانگین رطوبت

شکل‌های ۱ الف، ۱ ج و ۱ د موقعیت جغرافیایی، موقعیت شبکه ایستگاه‌های سینوپتیک و نقشه مدل رقومی ارتفاع شمال غرب ایران مورد استفاده برای ارزیابی مدل را نشان می‌دهد.

منطقه مطالعاتی در ارزیابی تصاویر لندست

مقادیر شاخص پوشش گیاهی برای یک پیکسل ۳۰ متری واقع

عددی WRF، متشکل از سه شبکه تودرتو (لانه‌ای) است (شکل ۱ الف) که مشخصات آن به شرح زیر است:

شبکه بزرگ دارای تفکیک افقی ۲۷ کیلومتر است و محدوده ۵۰-۲۰ درجه شمالی و ۶۱-۲۰ درجه شرقی را پوشش می‌دهد. تعداد نقاط این شبکه ۱۶۷×۱۲۲ نقطه است که مساحتی بالغ بر ۳۲۹۴km^۲×۴۵۰۹km را شامل می‌شود. شبکه متوسط دارای تفکیک افقی ۹ کیلومتر است و محدوده ۴۲-۲۶ درجه شمالی و ۵۵-۳۶ درجه شرقی را پوشش می‌دهد. تعداد نقاط این شبکه ۲۳۳×۱۹۶ نقطه است که مساحتی بالغ بر ۱۷۶۴ km^۲×۲۰۸۸km را فرامی‌گیرد. شبکه کوچک دارای تفکیک افقی ۳ کیلومتر است و محدوده ۴۰-۳۵ درجه شمالی و ۵۰-۴۴ درجه شرقی را پوشش می‌دهد. تعداد نقاط این شبکه ۱۸۱×۲۱۷ نقطه است که مساحت آن بالغ بر ۵۴۹km^۲×۶۶۰km است. تفکیک افقی داده‌های ناهمواری و کاربری زمین برابر ۳۰ ثانیه (حدود ۱ کیلومتر) است. شرایط اولیه و مرزی از داده‌های سامانه مدل‌سازی تمام کره‌ای موسوم به GFS در بازه‌های ۳ ساعته و با تفکیک افقی نیم درجه از مرکز ملی داده‌های محیطی (NCEI) گرفته شد. مدل GFS (The Global Forecast System)، یک مدل پیش‌بینی است که توسط مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) تهیه می‌شود. تعداد زیادی از متغیرهای جوی و زمین - خاک در این مجموعه داده موجود است، از دماها، بادهای و بارش تا خاک، رطوبت و غلظت ازن اتمسفری (NOAA). بر پایه پژوهش‌های پیشین پیش‌بینی عددی وضع هوا در ایران (Zoljoodi et al., 2013)، (Ghafarian and Barakati, 2013)، (Zakeri et al., 2014)، (Azadi et al., 2012) از طرح‌واره‌های فیزیکی پیکربندی KFMYJ برای مدل WRF در این تحقیق استفاده شد (جدول ۱).

نسبی ۵۵ درصد و مجموع بارش سالانه ۲۸۹/۶ میلی‌متر است (http://www.azmet.ir/in/station/station.htm). نوع خاک آن سیلتی لومی است. این منطقه یک ناحیه کوهستانی با فرورفتگی وسیع و شیب ملایم است. تراکم باغ سیب رقم مالینگ ۸۳۳ اصله در هکتار (فاصله ردیف‌های کاشت ۴ متر و فاصله درختان روی ردیف ۳ متر) و تاریخ کاشت درختان در سال ۱۳۸۰ بوده است (مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهریز ارومیه، ۱۳۹۵).

داده‌ها

داده‌ها و مدل WRF

مدل پیش‌بینی و تحقیق وضع هوا (WRF) نسل بعدی سیستم پیش‌بینی عددی میان‌مقیاس آب و هوایی برای کاربردهای تحقیق و پیش‌بینی جوی است. WRF می‌تواند شبیه‌سازی‌ها را بر مبنای شرایط جوی واقعی (به عبارت دیگر بر پایه مشاهدات و تحلیل‌ها) و شرایطی که به صورت ایده آل و دلخواه ایجاد شده است، تولید کند (NCAR/UCAR).

این مطالعه توانایی شبیه‌سازی دمای حداقل به وسیله مدل WRF را در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار داد. با توجه به هدف پژوهش که پیش‌آگاهی سرمازدگی است، ارزیابی پیش‌بینی مدل برای دمای ۲ متری در ساعت ۳ UTC انجام گرفت. به دلیل اینکه درختان سیب در فصل بهار و در طول دوره گلدهی در معرض دماهای پایین و خطر یخبندان قرار دارند شبیه‌سازی ۳ روزه (۷۲ ساعته) دما با مدل WRF-ARW نسخه ۴، برای ۱۹ روز نمونه از یک هفته قبل از شروع دوره گلدهی از ساعت ۱۲ روز ۲۸ مارس تا ۱۶ آوریل ۲۰۱۲ انجام شد. ۱۲ ساعت اول برای زمان تنظیم (spin-up) در نظر گرفته شد. شبکه محاسباتی برای شبیه‌سازی دمای ۲ متری به وسیله مدل



شکل ۲- تصویر سمت چپ: باغ آزمایشی سیب اداره تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهریز استان آذربایجان غربی منبع تصویر: Google Earth. تصویر سمت راست موقعیت جغرافیایی باغ مطالعاتی در نقشه ایران

Figure 2- On the left: apple experimental orchard of Kahriz, West Azerbaijan Province Agricultural Weather Research Center. Image source: Google Earth. On the right: geographical location of the apple experimental orchard in Iran's map

جدول ۱- طرح‌واره‌های فیزیکی انتخاب‌شده جهت مدل‌سازی با مدل WRF
Table 1- Selected physical schemes for modeling by WRF

فیزیک مدل Physical scheme	KFMYJ
طرح‌واره میکرو فیزیک Microphysics	Lin et al. scheme
طرح‌واره تابش طول موج بلند Longwave radiation	RRTM scheme
طرح‌واره تابش طول موج کوتاه Shortwave radiation	Goddard Shortwave scheme
طرح‌واره لایه سطحی Surface-layer	Eta Similarity scheme
طرح‌واره سطح زمین Land-surface model	Noah
طرح‌واره لایه مرزی سیاره‌ای Planet boundary-layer	Mellor Yamada
طرح‌واره همرفت Cumulus convection	Kain-Fritsch
گام زمانی Time step	160s
تعداد ترازهای قائم No of vertical levels	27
طبقه‌بندی کاربری اراضی Land cover classification	USGS

معادله‌های ۲ تا ۷ تعریف می‌شوند:

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (O_t - F_t)^2}{n} \quad (۳) \quad MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{t=1}^n |O_t - F_t| \quad (۲)$$

$$MSSS = 1 - \frac{RMSE_F}{RMSE_O} \quad (۵) \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (O_t - F_t)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \left(\sum_{t=1}^n F_t - \sum_{t=1}^n O_t \right) \quad (۶)$$

$$R = \frac{\sum_{t=1}^n [(O_t - \bar{O}_t) \times (F_t - \bar{F}_t)]}{\sqrt{[\sum_{t=1}^n (O_t - \bar{O}_t)^2 \times \sum_{t=1}^n (F_t - \bar{F}_t)^2]}} \quad (۷)$$

در معادله‌های فوق O_t مقادیر دیده‌بانی شده و F_t مقادیر پیش‌یابی شده و n تعداد داده‌ها است. \bar{O}_t میانگین مقادیر مشاهداتی و \bar{F}_t میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده است.

MAE، MSE، RMSE و MSSS هرکدام به شیوه‌ای مقدار اختلاف بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات را نشان می‌دهند و هرچه مقادیر کمتر باشد یعنی کارایی مدل بیشتر است. شاخص MBE

با استفاده از پیکربندی منتخب (جدول ۱) شبیه‌سازی دمای ۲ متری با مدل WRF برای ۷۲ ساعت (۳ روز) انجام و مقادیر به‌دست‌آمده در کوچک‌ترین شبکه در ساعت ۳ UTC برای هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک شمال غرب ایران - که داده‌های آن از سازمان هواشناسی ایران (IRIMO) اخذ شد- در نرم‌افزار متلب با تابع interp3 و با روش linear درون‌یابی شد (معادله ۱). البته روش‌های دیگری نیز برای درون‌یابی مورد ارزیابی قرار گرفت که روش مذکور بهترین عملکرد را داشت.

$$Vq = \text{interp3}(X, Y, Z, V, Xq, Yq, Zq, \text{method}) \quad (۱)$$

که X عرض جغرافیایی، Y طول جغرافیایی، Z زمان و V متغیری است که درون‌یابی برای آن انجام می‌شود و در این مطالعه منظور دمای ۲ متری است، Xq و Yq طول و عرض جغرافیایی مکان و Zq زمان موردنظر برای درون‌یابی متغیر است. به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل از مفاهیم آماری مانند میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، خطای میانگین مربعات (MSE)، مجذور خطای میانگین مربعات (RMSE)، شاخص امتیاز مهارتی (MSSS)، شاخص میانگین اریبی (MBE)، ضریب همبستگی (R) استفاده شده که با استفاده از

شاخص نرمال شده تغییرات پوشش گیاهی (NDVI) (معادله ۹) پرکاربردترین شاخص در مطالعات مربوط به پوشش گیاهی است (Shuai *et al.*, 2013)، (Von Bennewitz Alvarez *et al.*, 2018)، (Saheb Jalal and Dashtekian, 2013)، (McFeeters, 1996). شاخص NDVI بر اساس نسبت باندهای مادون قرمز و قرمز محاسبه می‌گردد و دامنه تغییرات آن بین یک و منفی یک است (Fazel Dehkordi *et al.*, 2016). فرمول ذیل برای محاسبه NDVI استفاده می‌شود (۳۰).

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED}) \quad (9)$$

R نشان‌دهنده انعکاس در هر ناحیه مشخص از طیف‌های جمع‌آوری شده است (Raper *et al.*, 2013). در این تحقیق شاخص NDVI با استفاده از داده‌های لندست ۷ سنجنده ETM+ و لندست ۸ سنجنده OLI در طی دوره رشد درخت سیب در ماه‌های مارس تا سپتامبر سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ برای منطقه مطالعاتی در نرم‌افزار ENVI محاسبه شد.

نتایج و بحث

ارزیابی پیش‌یابی دما

با بررسی شاخص‌های ارزیابی مدل WRF چنین نتیجه‌گیری می‌شود که میزان صحت شبیه‌سازی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته در مجموع ایستگاه‌های منطقه شمال غرب ایران تفاوت زیادی باهم ندارند ولی به‌طور کلی از نظر صحت، شبیه‌سازی ۲۴ ساعته در رتبه اول و شبیه‌سازی‌های ۴۸ و ۷۲ ساعته در رتبه‌های بعدی قرار دارند (جدول ۳). شکل ۳ نشان می‌دهد هر چه زمان شبیه‌سازی افزایش می‌یابد پراکندگی نقاط حول خط رگرسیون بیشتر می‌شود.

علاوه بر دارا بودن علامت مثبت (بیش برآوردی مدل) یا منفی (کم برآوردی مدل) مقدار انحراف از مقادیر دیده‌بانی شده را نیز نشان می‌دهد (Nasr-Esfahani *et al.*, 2019). R معادله خطی بین شبیه‌سازی مدل و داده مشاهداتی را نشان می‌دهد (Gholami *et al.*, 2017). مقادیر ضریب همبستگی همواره عددی بین ۱ و -۱ است. هر قدر ضریب همبستگی به ۱ نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل در شبیه‌سازی تغییرات پارامتر بهتر است.

داده‌ها و ارزیابی تصاویر لندست

در این مطالعه از آمار فنولوژی - زمان شروع و پایان مراحل رشد - که به‌صورت سالانه در باغ سیب اداره تحقیقات هواشناسی کشاورزی به ثبت رسیده (جدول ۲) استفاده شده است.

به‌علاوه ۷۷ تصویر ماهواره‌ای لندست ۷ سنجنده ETM+ و ۴۱ تصویر لندست ۸ سنجنده OLI از سایت <https://earthexplorer.usgs.gov> در ماه‌های مارس تا سپتامبر سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ (مطابق با مراحل فنولوژی سیب در ایستگاه کهرئز) با مشخصات شماره گذر و ردیف به ترتیب ۱۶۹ و ۳۴ و قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دانلود شد. در این تحقیق پیش‌پردازش‌هایی شامل تصحیح اتمسفری و رادیو متریک با روش FLAASH بر روی تصاویر ماهواره‌ای در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شد.

محاسبه شاخص پوشش گیاهی از طریق شاخص NDVI انجام شد. اغلب شاخص‌ها می‌توانند برای نمایش دادن اشتقاق بازتاب سطحی با توجه به طول موج تعمیم داده شوند. این اشتقاق تابع خصوصیات نوری برگ‌ها و ذرات خاک است (Myneni *et al.*, 1995). علائم بازتاب طیفی، اطلاعاتی را در مورد وضعیت ترکیبات بیوشیمیایی و ساختار برگ و تاج پوشش گیاهی آشکار می‌سازد (Huete, 2012).

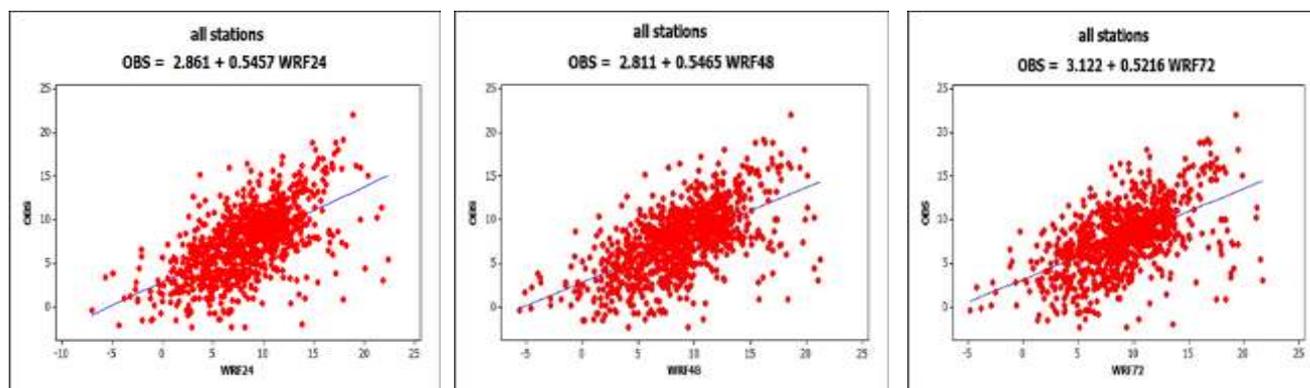
جدول ۲- زمان وقوع مراحل فنولوژیکی باغ سیب ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهرئز بر اساس داده‌های زمینی

Table 2- Time of phenological stages of apple orchard of Kahriz Agrometeorological Research Station based on field data

سال Year	روز سال Date of year (DOY)				
	تشکیل جوانه Bud formation	شکفتن جوانه Blossoming	گل دادن Flowering	رشد میوه Fruit growing	رسیدن میوه Fruit ripening
2007	95	109	121	135	251
2008	83	90	97	104	236
2009	89	96	103	124	257
2010	69	76	97	118	258
2011	94	103	115	125	259
2012	97	106	115	132	251
2013	69	84	96	104	259
2014	69	90	97	114	254
2015	73	92	100	118	275
2016	82	93	107	121	272
میانگین (Mean)	82	94	105	120	257

جدول ۳- نتایج شاخص‌های مورداستفاده در ارزیابی شبیه‌سازی مدل WRF
Table 3- Results of indices used in evaluating of WRF model simulations

مدت شبیه‌سازی (Simulation duration)	MAE	MSE	RMSE	MSSS	MBE
۲۴ ساعته (24-hour)	2.848	14.319	3.784	0.548	0.909
۴۸ ساعته (48-hour)	2.882	14.385	3.792	0.554	1.167
۷۲ ساعته (72-hour)	2.878	14.708	3.835	0.558	1.211



شکل ۳- معادله و نمودار خط رگرسیون داده‌های مدل WRF و داده‌های مشاهده‌شده در منطقه شمال غرب ایران در شبیه‌سازی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته

Figure 3- Equation and regression line diagram of WRF model minimum temperature data hindcast and minimum temperature data observed in synoptic stations in northwestern Iran in 24, 48 and 72 hour simulations

جدول ۴- خلاصه مدل

Table 4- Model Summary

Model Summary	R	P-Value	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
خلاصه مدل		مقدار p-	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل‌شده	خطای استاندارد برآورد
wrf 24	0.588 ^a	0.000	0.346	0.345	3.12655
wrf 48	0.599 ^b	0.000	0.359	0.359	3.06821
wrf 72	0.553 ^c	0.000	0.306	0.305	3.11100

a. Predictors (پیش‌بینی کننده‌ها) (Constant) (ثابت), wrf 24 b. Predictors (پیش‌بینی کننده‌ها) (Constant) (ثابت), wrf 48 c. Predictors (پیش‌بینی کننده‌ها) (Constant) (ثابت), wrf 72

تغییرات متغیر وابسته است.

جدول ۶ ضرورت وجود هر یک از متغیرها و به عبارت دیگر معنی‌داری ضرایب متغیرهای مستقل در مدل‌های رگرسیونی برای شبیه‌سازی‌های مختلف را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در ستون Significant جدول مذکور مشاهده می‌شود ضریب ثابت (constant) و ضریب متغیر هر دو برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته معنادار هستند و می‌توان از آن‌ها در معادله رگرسیون استفاده کرد. با توجه به اینکه هدف اصلی در این تحقیق ارزیابی شبیه‌سازی دمای حداقل ۷۲ ساعته است، توزیع جغرافیایی شاخص‌های محاسبه‌شده برای ارزیابی شبیه‌سازی متغیر مذکور در ایستگاه‌های منطقه شمال غرب ایران در شکل ۴ نشان داده‌شده است. الگوی نقشه شاخص‌های خطا مطابق با کوهستانی بودن منطقه است و با تحلیل نقشه‌ها به صورت استانی این نتایج به دست آمد:

میزان ضریب همبستگی و ضریب تعیین بین متغیرهای مقادیر دمای حداقل به دست آمده از مدل WRF در کل ایستگاه‌ها و مقادیر مشاهده‌شده در جدول ۴ نشان داده‌شده است. منطقه شمال غرب ایران یک منطقه کوهستانی است و مدل WRF در مناطق کوهستانی در شبیه‌سازی کارایی کمتری دارد، این امر باعث شده تا در مجموع مقدار ضریب همبستگی در روزهای مورد مطالعه در حد بالایی نباشد، با این حال معیار معنی‌دار بودن یا نبودن میزان همبستگی، مقدار احتمال آن است که باید با سطح خطای ۰/۰۵ مقایسه شود با توجه به اینکه در جدول ۴ مقدار P-Value از ۰/۰۵ کمتر است در نتیجه میزان همبستگی شبیه‌سازی‌های ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته با دمای مشاهداتی معنی‌دار است. همچنین در جدول ۵ با توجه به اینکه مقدار P-Value یا همان Significant کمتر از ۰/۰۵ است می‌توان گفت مدل رگرسیونی ارائه‌شده معنی‌دار است و مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی

جدول ۵- تحلیل واریانس^(a)

Table 5- ANOVA^(a)

Model ANOVA مدل تحلیل واریانس	Sum of Squares مجموع مربعات پراکندگی	df	Mean Square میانگین مربعات	F	Sig. سطح معنی داری
Regression WRF 24 رگرسیون WRF 24	4954.502	1	4954.502	506.839	0.000 ^(b)
Residual WRF 24 باقیمانده WRF 24	9374.503	959	9.775		
Total WRF 24 کل WRF 24	14329.005	960			
Regression WRF 48 رگرسیون WRF 48	5069.033	1	5069.033	538.461	0.000 ^(c)
Residual WRF 48 باقیمانده WRF 48	9037.373	960	9.414		
Total WRF 48 کل WRF 48	14106.406	961			
Regression WRF 72 رگرسیون WRF 72	4097.111	1	4097.111	423.329	0.000 ^(d)
Residual WRF 72 باقیمانده WRF 72	9291.183	960	9.678		
Total WRF 72 کل WRF 72	13388.294	961			

a. Dependent Variable (متغیر مستقل): observed (مشاهده شده) b. Predictors (پیش‌بینی کننده‌ها): (Constant) (ثابت), wrf 24 c. Predictors (پیش‌بینی کننده‌ها): (Constant) (ثابت), wrf 48 d. Predictors: (Constant) (ثابت), wrf 72

جدول ۶- جدول ضرایب^(a)

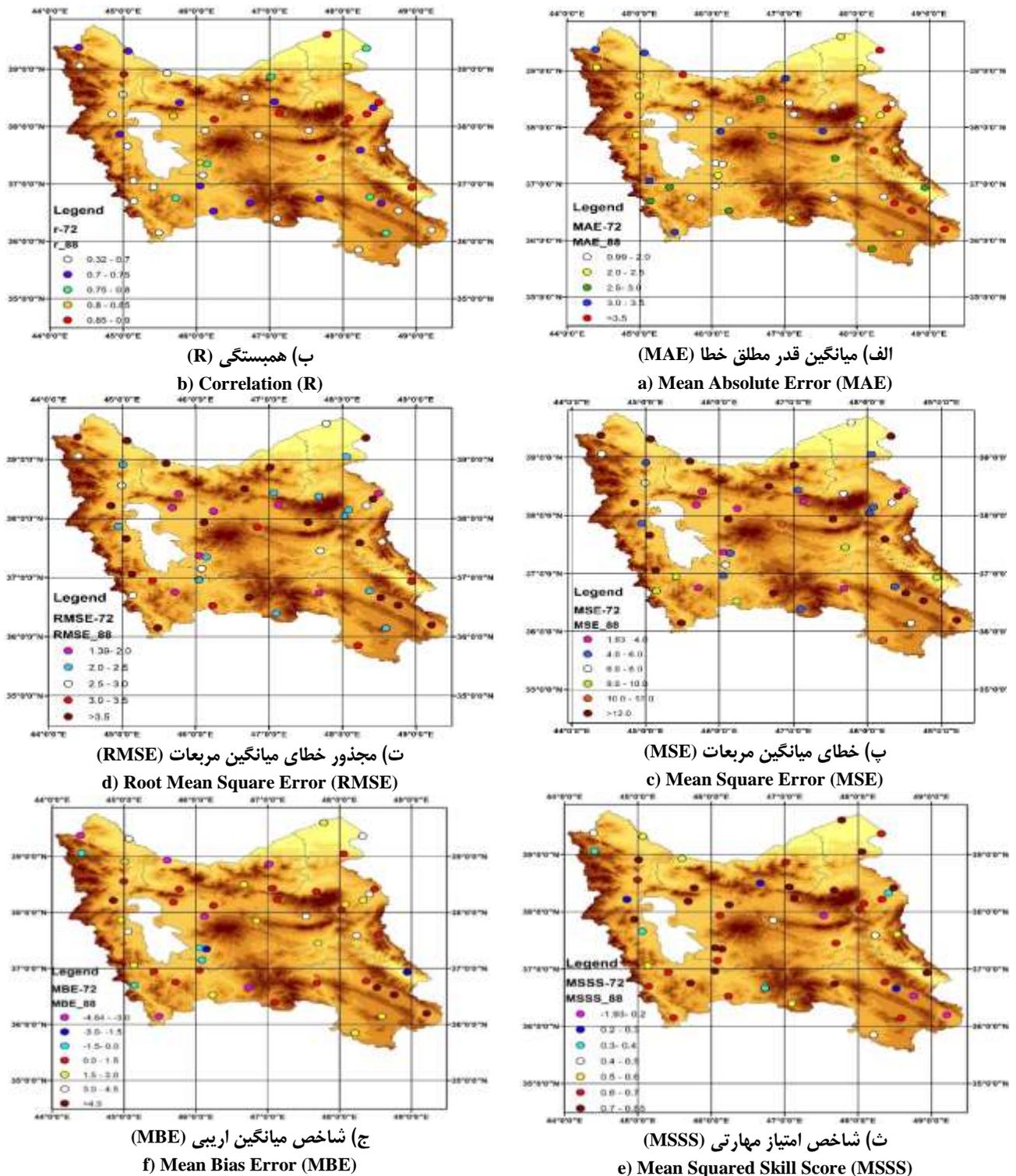
Table 6- Coefficients^(a)

Model Coefficients ضرایب مدل	Unstandardized Coefficients (ضرایب استاندارد نشده)		Standardized Coefficients (ضرایب استاندارد شده)		Sig. سطح معنی داری
	B	Std. Error خطای استاندارد	Beta	t	
(Constant) (ثابت)	2.861	0.227		12.619	0.000
WRF 24	0.546	0.024	0.588	22.513	0.000
(Constant) (ثابت)	2.811	0.229		12.270	0.000
WRF 48	0.547	0.024	0.599	23.205	0.000
(Constant) (ثابت)	3.122	0.251		12.461	0.000
WRF 72	0.522	0.025	0.553	20.575	0.000

a. Dependent Variable (متغیر مستقل): observed (مشاهده شده)

در شرق و سه‌پند در مرکز از میزان همبستگی کاسته شده و خطای شبیه‌سازی بالا می‌رود. به‌نحوی که در ایستگاه جلفا که بلندترین قله رشته کوهستانی قره داغ در آن قرار دارد میزان همبستگی به ۰/۶۴ و میزان خطای MAE مدل به بیش از ۳/۵ درجه سلسیوس می‌رسد. در استان اردبیل، در اکثر ایستگاه‌ها ضریب همبستگی بالای ۰/۷۵ و خطای MAE مدل تا ۲/۵ درجه سلسیوس است. در استان زنجان در ایستگاه‌های بین کوه‌های طارم و سلطانیه خطای MAE مدل بالای ۳/۵ درجه سلسیوس است.

ناهمواری‌های عمده در استان آذربایجان غربی در قسمت غربی آن یعنی در نواحی مرزی ایران با ترکیه و عراق واقع گردیده است. ارتفاعات عمده این ناحیه را کوه‌های مرزی ماکو، قطور، خوی در شمال استان و کوه‌های غرب ارومیه، اشنویه، پیرانشهر و سردشت در جنوب استان تشکیل می‌دهند ([Plan and Budget Organization, 2018](#)). به سمت نواحی کوهستانی مذکور همبستگی اغلب به کمتر از ۰/۷ و خطای MAE مدل به بیش از ۲/۵ درجه سلسیوس می‌رسد. در استان آذربایجان شرقی به سمت کوه‌های قره داغ در شمال تا سبلان



شکل ۴- نقشه توزیع جغرافیایی شاخص‌های محاسبه‌شده در ارزیابی پیش‌یابی ۷۲ ساعته: (الف) MAE، (ب) R، (پ) MSE، (ت) RMSE، (ث) MSSS، (ج) MBE

Figure 4- Geographical distribution map of the indices calculated in the WRF model 72-hour hindcast evaluation: a) MAE, b) R, c) MSE, d) RMSE, f) MBE, e) MSSS

سنجنده OLI به دست آمد. به طور کلی در منطقه مورد مطالعه مقدار NDVI در مرحله خواب به حدود ۰/۲، با شکفتن جوانه به ۰/۳، در حین گل دادن به ۰/۴ و ۰/۵ و در دوره رشد میوه به بیشترین مقدار می‌رسد (جدول ۷ و ۸). با توجه به مقادیر NDVI می‌توان نتیجه گرفت که مراحل فنولوژی ثبت شده از باغ سیب ایستگاه کهرزی با داده‌های شاخص پوشش گیاهی تطابق دارد. همان گونه که انتظار می‌رفت بعد از پایان دوره گلدهی با توجه به رشد برگ و نیز بالا رفتن مقدار کلروفیل در ماه‌های گرم سال مقادیر بالاتری از شاخص NDVI را نسبت به دوره‌های خواب، شکفتن جوانه و گلدهی شاهد هستیم.

توزیع مقادیر خطای RMSE در ایستگاه‌های مختلف، با خطای MAE هماهنگی دارد ولی به طور کلی مقدار خطای بیشتری را نسبت MAE نشان می‌دهد. در ایستگاه‌هایی که خطای مدل کمتر باشد شاخص MSSS به ۱ نزدیک‌تر است همچنین هر چه مقدار خطای مدل کمتر باشد شاخص MBE به صفر نزدیک‌تر و در نتیجه پیش‌بینی واقعی‌تر است.

تشخیص مراحل فنولوژی باغ سیب از تصاویر ماهواره‌ای

مقادیر شاخص NDVI برای یک پیکسل ۳۰ متری در مرکز باغ سیب ایستگاه هواشناسی کشاورزی ارومیه، مطابق با آمار مراحل فنولوژی ثبت شده در ایستگاه در سال‌های ۲۰۱۶-۲۰۰۷ و با استفاده از تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ سنجنده ETM+ و لندست ۸

جدول ۷- مراحل فنولوژی سیب ثبت شده در باغ سیب ایستگاه مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهرزی ارومیه و شاخص پوشش گیاهی ndvi

به دست آمده از تصاویر Landsat 7 ETM+

Table 7- Recorded apple phenological stages in apple orchard of Kahriz Station and NDVI vegetation index gained from Landsat 7 ETM+ images

تاریخ Date	مراحل رشد Growth stages	NDVI (Landsat 7 ETM+)	تاریخ Date	مراحل رشد Growth stages	NDVI (Landsat 7 ETM+)	تاریخ Date	مراحل رشد Growth stages	NDVI (Landsat 7 ETM+)
20.4.2007	شکفتن جوانه Blossoming	0.304	1.4.2012	خواب Dormancy	0.292	26.4.2015	گل دادن Flowering	0.650
6.5.2007	گل دادن Flowering	0.381	3.5.2012	گل دادن Flowering	0.553	12.5.2015	رشد میوه Fruit growing	0.566
22.5.2007	رشد میوه Fruit growing	0.391	4.6.2012	رشد میوه Fruit growing	0.657	13.6.2015	رشد میوه Fruit growing	0.534
7.6.2007	رشد میوه Fruit growing	0.467	20.6.2012	رشد میوه Fruit growing	0.690	29.6.2015	رشد میوه Fruit growing	0.497
23.6.2007	رشد میوه Fruit growing	0.627	6.7.2012	رشد میوه Fruit growing	0.709	15.7.2015	رشد میوه Fruit growing	0.451
25.7.2007	رشد میوه Fruit growing	0.724	22.7.2012	رشد میوه Fruit growing	0.743	31.7.2015	رشد میوه Fruit growing	0.405
10.8.2007	رشد میوه Fruit growing	0.632	7.8.2012	رشد میوه Fruit growing	0.718	16.8.2015	رشد میوه Fruit growing	0.39
11.9.2007	رسیدن میوه Fruit ripening	0.626	23.8.2012	رشد میوه Fruit growing	0.654	17.9.2015	رشد میوه Fruit growing	0.415
5.3.2008	خواب Dormancy	0.237	8.9.2012	رسیدن میوه Fruit ripening	0.684	14.5.2016	رشد میوه Fruit growing	0.432
24.5.2008	رشد میوه Fruit growing	0.552	6.5.2013	رشد میوه Fruit growing	0.559	30.5.2016	رشد میوه Fruit growing	0.544
9.6.2008	رشد میوه Fruit growing	0.448	7.6.2013	رشد میوه Fruit growing	0.686	15.6.2016	رشد میوه Fruit growing	0.499
25.6.2008	رشد میوه Fruit growing	0.536	23.6.2013	رشد میوه Fruit growing	0.728	17.7.2016	رشد میوه Fruit growing	0.486
27.7.2008	رشد میوه Fruit growing	0.572	9.7.2013	رشد میوه Fruit growing	0.691	2.8.2016	رشد میوه Fruit growing	0.440
11.7.2008	رشد میوه Fruit growing	0.598	25.7.2013	رشد میوه Fruit growing	0.669	18.8.2016	رشد میوه Fruit growing	0.461

28.8.2008	رسیدن میوه Fruit growing	0.525	10.8.2013	رشد میوه Fruit growing	0.643
13.9.2008	رسیدن میوه Fruit growing	0.567	26.8.2013	رشد میوه Fruit growing	0.622
27.5.2009	رشد میوه Fruit growing	0.46	11.9.2013	رشد میوه Fruit growing	0.624
28.6.2009	رشد میوه Fruit growing	0.548	27.9.2013	رسیدن میوه Fruit ripening	0.667
14.7.2009	رشد میوه Fruit growing	0.643	22.3.2014	تشکیل جوانه Bud formation	0.427
30.7.2009	رشد میوه Fruit growing	0.55	7.4.2014	گل دادن Flowering	0.414
15.8.2009	رشد میوه Fruit growing	0.574	25.5.2014	رشد میوه Fruit growing	0.685
31.8.2009	رشد میوه Fruit growing	0.567	10.6.2014	رشد میوه Fruit growing	0.733
14.5.2010	رشد میوه Fruit growing	0.46	26.6.2014	رشد میوه Fruit growing	0.627
30.5.2010	رشد میوه Fruit growing	0.411	12.7.2014	رشد میوه Fruit growing	0.650
15.6.2010	رشد میوه Fruit growing	0.466	13.8.2014	رشد میوه Fruit growing	0.659
1.7.2010	رشد میوه Fruit growing	0.588	29.8.2014	رشد میوه Fruit growing	0.610
17.7.2010	رشد میوه Fruit growing	0.609	14.9.2014	رسیدن میوه Fruit ripening	0.570
18.8.2010	رشد میوه Fruit growing	0.549			
3.9.2010	رشد میوه Fruit growing	0.6			
19.9.2010	رسیدن میوه Fruit ripening	0.659			
30.3.2011	خواب Dormancy	0.299			
15.4.2011	شکفتن جوانه Blossoming	0.345			
17.5.2011	رشد میوه Fruit growing	0.581			
21.8.2011	رشد میوه Fruit growing	0.673			
6.9.2011	رشد میوه Fruit growing	0.704			
22.9.2011	رسیدن میوه Fruit ripening	0.718			

جدول ۸- مراحل فنولوژی سیب ثبت شده در باغ سیب ایستگاه مرکز تحقیقات هواشناسی کشاورزی کهرئز ارومیه و شاخص پوشش گیاهی ndvi

به دست آمده از تصاویر Landsat 8 OLI

Table 8- Recorded apple phenological stages in apple orchard of Kahriz Station and NDVI vegetation index gained from Landsat 8 OLI images

تاریخ Date	مراحل رشد Growth stages	NDVI	تاریخ Date	مراحل رشد Growth stages	NDVI
2.4.2013	شکفتن جوانه Blossoming	0.450	18.4.2015	گل دادن Flowering	0.555
12.4.2013	گل دادن Flowering	0.546	20.5.2015	رشد میوه Fruit growing	0.608
28.4.2013	رشد میوه Fruit growing	0.569	5.6.2015	رشد میوه Fruit growing	0.712
30.5.2013	رشد میوه Fruit growing	0.721	21.6.2015	رشد میوه Fruit growing	0.560
15.6.2013	رشد میوه Fruit growing	0.757	7.7.2015	رشد میوه Fruit growing	0.513
1.7.2013	رشد میوه Fruit growing	0.727	23.7.2015	رشد میوه Fruit growing	0.451
17.7.2013	رشد میوه Fruit growing	0.719	8.8.2015	رشد میوه Fruit growing	0.417
2.8.2013	رشد میوه Fruit growing	0.706	24.8.2015	رشد میوه Fruit growing	0.374
18.8.2013	رشد میوه Fruit growing	0.669	9.9.2015	رشد میوه Fruit growing	0.502
3.9.2013	رشد میوه Fruit growing	0.635	25.9.2015	رسیدن میوه Fruit ripening	0.463
19.9.2013	رسیدن میوه Fruit ripening	0.712	20.4.2016	گل دادن Flweing	0.581
1.5.2014	رشد میوه Fruit growing	0.754	6.5.2016	رشد میوه Fruit growing	0.640
17.5.2014	رشد میوه Fruit growing	0.767	22.5.2016	رشد میوه Fruit growing	0.598
18.6.2014	رشد میوه Fruit growing	0.714	7.6.2016	رشد میوه Fruit growing	0.501
4.7.2014	رشد میوه Fruit growing	0.727	23.6.2016	رشد میوه Fruit growing	0.529
20.7.2014	رشد میوه Fruit growing	0.701	9.7.2016	رشد میوه Fruit growing	0.534
5.8.2014	رشد میوه Fruit growing	0.685	25.7.2016	رشد میوه Fruit growing	0.424
21.8.2014	رشد میوه Fruit growing	0.667	10.8.2016	رشد میوه Fruit growing	0.472
6.9.2014	رشد میوه Fruit growing	0.645	26.8.2016	رشد میوه Fruit growing	0.426
22.9.2014	رسیدن میوه Fruit growing	0.616	11.9.2016	رشد میوه Fruit growing	0.431
			27.9.2016	رشد میوه Fruit growing	0.439

از خسارت سرمازدگی در منطقه ارزیابی شد پیش آگاهی به کشاورز از طریق شبیه سازی دمای کمینه برای سه روز آینده با استفاده از مدل WRF، قبل از زمان جوانه زنی بود که در نتیجه آن کشاورز بتواند با

در تحقیقات مرتبط با سرمازدگی محصولات، بر اساس آمار و احتمال و داده های دوره آماری بلندمدت، تاریخ احتمال وقوع آخرین یخبندان برآورد شده است اما روشی که در این مقاله برای پیشگیری

در مجموع کل ایستگاه‌ها ضریب همبستگی در هر سه شبیه‌سازی در حد ۰/۵ و مقدار خطای MAE و RMSE به ترتیب به حدود ۲/۸ و ۳/۸ درجه سلسیوس می‌رسد.

محققین دیگری نیز در تحقیقات خود به نتیجه مشابه فوق رسیده‌اند به‌عنوان مثال لی یو و همکاران (Liu *et al.*, 2019) نیز حساسیت دمای هوای نزدیک سطح را به فیزیک سطح زمین نسبت به شرایط اولیه و مرزی بیشتر دانسته‌اند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد که عملکرد مدل در پیش‌بینی دمای نزدیک سطح به پیچیدگی توپوگرافی محلی هر ایستگاه بستگی دارد. دوآن و همکاران (Duan *et al.*, 2018) نیز نتیجه گرفتند که ارتفاعات و انواع کاربری اراضی به همراه تغییرات فصلی به شدت بر پیش‌بینی متغیرهای نزدیک به سطح زمین تأثیر می‌گذارد. باین‌حال در تحقیق حاضر، طبق جدول ۴ و ۵ در هر سه شبیه‌سازی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته، معنی‌داری همبستگی و معنی‌داری مدل رگرسیونی بین متغیر دمای حداقل خروجی مدل WRF و متغیر دمای حداقل مشاهداتی در مجموع کل ایستگاه‌ها وجود دارد. البته با در نظر گرفتن شاخص‌های بررسی شده برای ارزیابی پیش‌بینی مدل WRF در هر ایستگاه، ایستگاه‌هایی هم هستند که ضریب همبستگی در آن‌ها به بیش از ۰/۸۵ و مقدار خطاهای MAE و RMSE به کمتر از ۱/۵ درجه سلسیوس می‌رسد (شکل‌های ۴ الف، ب و ت).

بر طبق دومین یافته این تحقیق، شاخص NDVI به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ قادر است پیشرفت و تغییرات در مراحل فنولوژیکی سیب را نشان دهد. رشد برگ هم‌زمان با شکفتن جوانه در درخت سیب آغاز می‌شود و تا مرحله رشد میوه ادامه می‌یابد. شاخص نرمال شده تغییرات پوشش گیاهی (NDVI) که از انعکاس تابش قرمز و مادون قرمز محاسبه می‌شود، به ویژگی‌های پوشش گیاهی شامل شاخص سطح برگ، ظرفیت جذب نور و پتانسیل فتوسنتز ارتباط دارد. به‌طور کلی مقدار NDVI با افزایش LAI یا غلظت کلروفیل افزایش می‌یابد (Yoder and Waring, 1994). نکته‌ای که در روند مقادیر NDVI در این پژوهش دیده می‌شود این است که از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲ در اواخر ژوئن تا اواخر سپتامبر مطابق با فصل تابستان در ایران مقادیر بالاتری از شاخص NDVI به‌دست‌آمده است ولی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ بیشترین مقادیر در فصل بهار (اواخر مارس تا اواخر ژوئن) بوده است. مطالعات دیگری نیز به نتایج مشابهی رسیده‌اند به‌عنوان مثال نتایج تحقیق خیر و همکاران (Khare *et al.*, 2019) پتانسیل ماهواره سنچس‌ازدور برای تعیین زمان درست رخدادهای فنولوژیکی جوانه با استفاده از سری‌های زمانی NDVI واسنجی شده در مناطق وسیعی که دور هستند یا دسترسی محدودی دارند را نشان داد. ژنگ و همکاران (Zheng *et al.*, 2016) با ترکیب شاخص NDVI تصاویر SPOT5 و مودیس، نتیجه گرفتند که پارامترهای فنولوژیکی به میزان زیادی با داده‌های

توجه به دمای بحرانی، فرصت کافی برای مدیریت وضعیت پیش‌رو داشته باشد. همچنین در مطالعات پیشین، بیشترین تمرکز بر روی تشخیص و پیش‌بینی مراحل فنولوژی به‌ویژه گلدهی بوده که نقش مهمی در پیش‌آگاهی سرمازدگی دارد این در حالی است که در ایران ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی اندک است و تاریخ دقیق مراحل فنولوژی محصولات مختلف در همه باغات ثبت نشده و در نتیجه آماری وجود ندارد تا بر مبنای آن مدلی برای پیش‌بینی گلدهی و سایر مراحل فنولوژی ارائه شود لذا در این تحقیق استفاده از تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص مراحل فنولوژی سیب در ایستگاه هواشناسی کشاورزی کهریز ارومیه مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان از تصاویر ماهواره‌ای برای تشخیص مراحل فنولوژی در مناطق فاقد ایستگاه هواشناسی کشاورزی در محدوده شهرستان ارومیه استفاده کرد.

بنابراین این مقاله به بررسی امکان به کار بردن شبیه‌سازی ۳ روزه دمای حداقل با استفاده از مدل WRF و نیز تصاویر ماهواره‌ای لندست برای پیش‌آگاهی سرمازدگی دیررس بهاره باغات سیب شهرستان ارومیه پرداخته است. یافته‌های پژوهش حاضر نشان داد که همبستگی و معادله رگرسیونی معنی‌داری بین دو متغیر دمای حداقل به‌دست‌آمده از مدل WRF در کل ایستگاه‌ها و مقادیر مشاهده‌شده در ایستگاه‌ها وجود دارد. یافته دیگر این پژوهش، قابلیت تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ در تشخیص تغییر مراحل فنولوژیکی درختان سیب را تأیید نمود.

هرچه پیش‌آگاهی سرمازدگی زودتر انجام شود کشاورز بهتر می‌تواند برای مقابله با آن آماده شود به همین دلیل در این مقاله شبیه‌سازی ۳ روزه دمای حداقل مدنظر قرار گرفت و ارزیابی برای کل منطقه شمال غرب ایران انجام شد. معمولاً به دلیل اینکه ویژگی‌های سینوپتیکی دائماً در حال تغییر هستند، پیش‌بینی‌ها با افزایش مدت‌زمان پیش‌بینی صحت کمتری پیدا می‌کنند (Yáñez-Morroni *et al.*, 2018) در این تحقیق نیز شاخص‌های مورد استفاده برای ارزیابی خطای مدل نشان داد پیش‌بینی‌های مدل ابتدا برای شبیه‌سازی ۲۴ ساعته و سپس ۴۸ ساعته دقت بیشتری نسبت به شبیه‌سازی ۷۲ ساعته دارد ولی با این حال دقت آن با شبیه‌سازی‌های ۲۴ و ۴۸ ساعته اختلاف چندانی ندارد. مولر و همکاران (Müller *et al.*, 2016) نیز هرچند کارایی مدل WRF را برای شبیه‌سازی هوای ۷ روز آینده تأیید کردند ولی به این نتیجه رسیدند که همبستگی و خطای مدل از پیش‌بینی ۱ روزه به سمت پیش‌بینی ۷ روزه کاهش می‌یابد. نصر اصفهانی و همکاران (Nasr Esfahani *et al.*, 2019) نتیجه‌گیری مشابهی داشتند آن‌ها به این نتیجه رسیدند که صحت پیش‌بینی ۲۴ ساعته نسبت به ۴۸ ساعته بیشتر است. در شمال غرب ایران که یک منطقه کوهستانی است، شبیه‌سازی جریان هوا در نواحی با توپوگرافی پیچیده بسیار مشکل است و به همین دلیل

شاخص‌های ارزیابی، کارایی مدل WRF را برای شبیه‌سازی دمای حداقل در منطقه شمال غرب ایران نشان داد. در گام دوم قابلیت تصاویر ماهواره‌های لندست ۷ و ۸ در تشخیص مراحل فنولوژی سیب مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه NDVI به‌دست‌آمده از تصاویر با مراحل فنولوژی ثبت‌شده در ایستگاه هواشناسی کشاورزی کهریز مشخص شد که تصاویر مذکور می‌تواند مراحل فنولوژی سیب در ایستگاه کهریز ارومیه را شناسایی کند.

این تحقیق کارایی مدل WRF برای شبیه‌سازی ۷۲ ساعته دمای حداقل و نیز پتانسیل تصاویر لندست ۷ و ۸ در تشخیص مراحل فنولوژی سیب در محدوده مورد مطالعه را نشان داد؛ بنابراین با به‌کارگیری خروجی شبیه‌سازی دمای حداقل ۷۲ ساعته مدل WRF و تشخیص مراحل فنولوژی از تصاویر لندست، چنانچه در هر باغی با توجه به مرحله فنولوژی، دما در ۷۲ ساعت آینده به حد بحرانی برسد می‌توان هشدار سرمازدگی را اعلام کرد تا اقدامات مربوط به پیشگیری از سرمازدگی توسط کشاورز انجام شود. البته به‌منظور کسب نتایج بهتر و دقیق‌تر پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از روش استفاده‌شده در این پژوهش در باغ‌هایی با مساحت خیلی بزرگ‌تر استفاده شود.

زمینی همبستگی دارد. برخلاف نتایج گفته‌شده ون بنویتز آلوارز و همکاران (Von Bennewitz Alvarez *et al.*, 2018) به این نتیجه رسیدند که شاخص‌های پوشش گیاهی به‌دست‌آمده از Landsat ETM+ نمی‌تواند بین مراحل فنولوژیکی متوالی که در آن اندازه برگ فقط کمی متمایز است تفاوت قائل شود. البته در تحقیق حاضر سعی شده تا با استفاده از تعداد تصاویر و سال‌های مطالعاتی بیشتر دقت بررسی مراحل فنولوژی و نتیجه‌گیری در مورد قابلیت تصاویر ماهواره‌ای لندست افزایش یابد.

نتیجه‌گیری

این مقاله در پی ارزیابی یک سیستم هشدار سریع سرمازدگی در باغات سیب شهرستان ارومیه بر مبنای شبیه‌سازی ۳ روزه دمای حداقل و نیز تشخیص مراحل فنولوژی سیب از طریق تصاویر ماهواره‌ای در سال‌های گذشته است. در اولین گام توانایی مدل WRF در شبیه‌سازی دمای حداقل ۷۲ ساعته بررسی شد. مدل برای شمال غرب ایران با تفکیک ۳ کیلومتر مطابق با زمان گلدهی سیب اجرا و برونداد دمای حداقل مدل با مشاهدات ۵۱ ایستگاه سینوپتیک شمال غرب ایران مقایسه شد. با وجود کوهستانی بودن منطقه

منابع

1. Agricultural Mechanization Development Center. 2019. Frost and hail damage reduction plan using new mechanization technologies. Ministry of Agriculture-Jahad, Agricultural Mechanization Development Center: 10 p. Available at <http://www.agmdc.ir> (visited 22 December 2020).
2. Ahmadi K., ebadzadeh HR., Hatami F., Hoseinpour R., and Abdshah H. 2020. Amarnameh Keshavarzi 2019- 3: Horticultural products. Ministry of Agriculture-Jahad, Deputy of Planning and Economy, Information and Communication Technology Center, Tehran: 156 p. Available at <https://www.maj.ir> (visited 10 November 2020).
3. Azadi M., Taghizadeh E., and Memarian MH. 2012. Verification of WRF precipitation forecast over IRAN country during NOV.2008-JUN.2009. *Iran-Water Resources Research*, 8(2): 48-59. (In Persian with English abstract)
4. Chmielewski F., Blumel K., Henniges Y., Blanke M., Weber R., and Zoth M. 2011. Phenological models for the beginning of apple blossom in Germany. *Meteorologische Zeitschrift* 20(5): 487-496. <https://doi.org.10.1127.0941-2948.2011.0258>.
5. Duan H., Li Y., Zhang T., PU Z., ZHAO C., and LIU Y. 2018. Evaluation of the forecast accuracy of near-surface temperature and wind in northwest China based on the WRF model. *Journal of Meteorological Research* 32: 469-490. <http://dx.doi.org.10.1007.s13351-018-7115-9>.
6. Fallah Ghalhari GA., and Ahmadi H. 2017. Trend analysis of phenological stages length and chilling requirements of apple tree (Case study: Karaj station). *Journal of Agricultural Meteorology* 5(1): 57-70. (In Persian with English abstract)
7. Farajzadeh M., Rahimi M., Kamali GA., and Mavrommatis T. 2010. Modelling apple tree bud burst time and frost risk in Iran. *Meteorological Applications* 17(1): 45-52. <https://doi.org.10.1002.met.159>.
8. Fazel Dehkordi L., Azarnivand H., Zare Chahouki M., Mahmoudi Kohan F., and Khalighi Sigaroudi S. 2016. Drought Monitoring Using Vegetation Index (NDVI) (Case study: Rangelands of Ilam Province). *Journal of Range and Watershed Management*, 69(1): 141-154. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org.10.22059/jrwm.2016.61739>.
9. Ghafarian P., and Barekati SM. 2013. Verification of the weather research and forecasting model (WRF) for the heavy precipitation forecasting in the Karun basin. A case study (8-9 February 2006). *Journal of Climate Research* 4(15): 129-149. (In Persian with English abstract)
10. Gholami S., Ghader S., Khaleghi Zavareh H., and Ghafarian P. 2018. Verification of WRF wind field hindcast forced by different initial and boundary conditions over the Persian Gulf: Comparison with synoptic data and

- QuikSCAT and ASCAT satellites data. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1): 227-243. (In Persian with English abstract)
11. Graczyk D., and Szwed M. 2020. Changes in the occurrence of late spring frost in Poland. *Agronomy* 10(11): 2-14. <https://doi.org.10.3390.agronomy10111835>.
 12. Hesari B., Rezaee R., Nikanfar R., and Tayefe Neskili N. 2015. Study and preparation of frost maps for field and orchard crops in West Azerbaijan. *Journal of Geography and Environmental Hazards* 4(14): 117-135. (In Persian with English abstract)
 13. Hiratsuka Y., and Zalasky H. 1993. Frost and other climate-related damage of forest trees in the prairie provinces. Forestry Canada, Northwest Region, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Information Report NOR-X-331: 25 p. Available at <https://doi.org.10.1111.j.1749-8198.2012.00507.x>.
 14. Huete AR. 2012. Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring. *Geography Compass* 6(9): 513-532. <https://doi.org.10.1111.j.1749-8198.2012.00507.x>.
 15. Hur J., and Ahn JB. 2015. Seasonal prediction of regional surface air temperature and first-flowering date over South Korea. *International Journal of Climatology* 35: 4791-4801. <https://doi.org.10.1002.joc.4323>.
 16. Kamali Gh., Rahimi M., Mohammadian N., and Mahdavian A. 2007. Prediction of flowering time of Golden apple cultivar based on cumulative chilling requirements for preventing frost damage in Golmakan area of Khorasan. *Journal of Humanities the University of Isfahan* 1(22): 171-182. (In Persian with English abstract)
 17. Khalili A. 2014. Quantitative evaluation of spring frost risk to agricultural and horticultural crops in Iran and modeling. *Journal of Agricultural Meteorology* 2(1): 17-31. (In Persian with English abstract)
 18. Khare S., Drolet G., Sylvain JD., Paré MC., and Rossi S. 2019. Assessment of Spatio-Temporal Patterns of Black Spruce Bud Phenology across Quebec Based on MODIS-NDVI Time Series and Field Observations. *Remote Sensing* 11(23): 2745. [https://doi.org.10.3390.rs11232745](https://doi.org.10.3390/rs11232745).
 19. Khosravi M., Habibi No Khandan M., and Esmaeli R. 2008. Zonation of late chilblain risk impacts on orchards case study: Mahvalat region. *Geography and Development Iranian Journal* 6(12): 145-162. (In Persian with English abstract)
 20. Liu L., Ma Y., Menenti M., Zhang X., and Ma W. 2019. Evaluation of WRF Modeling in Relation to Different Land Surface Schemes and Initial and Boundary Conditions: A Snow Event Simulation Over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124: 209-226. <https://doi.org.10.1029/2018JD029208>.
 21. Martínez-Lüscher J., Hadley P., Ordidge M., Xu X., and Luedeling E. 2017. Delayed chilling appears to counteract flowering advances of apricot in southern UK. *Agricultural and Forest Meteorology* 237-238: 209-218. <https://doi.org.10.1016/j.agrformet.2017.02.017>.
 22. McFeeters SK. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing* 17(7): 1425-143. <https://doi.org.10.1080/01431169608948714>.
 23. Müller OV., Lovino MA., and Berbery EH. 2016. Evaluation of WRF model forecasts and their use for hydroclimate monitoring over southern south America. *Weather and Forecasting* 31(3): 1001-1017. <https://doi.org.10.1175/WAF-D-15-0130.1>.
 24. Myneni RB., Hall FG., Sellers PJ., and Marshak AL. 1995. The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 481-486.
 25. Nasr Esfahani M., and Yazdanpanah H. 2019. Prognosis of frosting occurrence almond orchards in Najafabad region. *Physical Geography Research Quarterly* 51(3): 497-512. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org.10.22059.JPHGR.2019.281346.1007380>.
 26. Nasr Esfahani M., Yazdanpanah H., and Nasr Esfahani MA. 2018. Evaluation of WRF model for temperature forecast and frosting occurrence in Zayandeh Rud Basin. *Physical Geography Research Quarterly* 51(1): 163-182. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org.10.22059.JPHGR.2019.262062.1007258>.
 27. Omidvar K., and Dehghan Banadoki Z. 2013. Studying and Analyzing Strong Spring Frostbite Phenomenon of Pistachio Orchards in Yazd Province. *Journal Of Geography and Regional Development Reseach* 10(19): 237-253. (In Persian with English abstract)
 28. Plan and Budget Organization, Management and Planning Organization of Azerbaijan-e-Gharbi Province, Statistical Year book of West Azerbaijan Province-2018. Available at <https://azgharbi.mporg.ir> (visited 11 October 2020).
 29. Raper TB., Varco JJ., and Hubbard KJ. 2013. Canopy-based normalized difference vegetation index sensors for monitoring cotton nitrogen status. *Agronomy Journal* 105(5): 1345-1354. <https://doi.org.10.2134.agronj2013.0080>.
 30. Rouse JW., Haas RH., Schell JA., and Deering DW. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Specefic Publication 351: 309-317.
 31. Safa B., Khalili A., Teshnehlab M., and Liaghat A. 2014. Artificial Neural Networks (ANNs) application to predict occurrence of phenological stages in wheat using climatic data. *International Journal of Agricultural Policy and Research* 2(10): 352-361. <http://dx.doi.org.10.15739.IJAPR.007>.
 32. Sahebjalal E., and Dashtekian K. 2013. Analysis of land use-land covers changes using normalized difference

- vegetation index (NDVI) differencing and classification methods. *African Journal of Agricultural Research* 8(37): 4614-4622. <https://doi.org.10.5897.AJAR11.1825>.
33. Shuai Y., Schaaf C., Zhang X., Strahler A., Roy D., Morisette J., Wang Z., Nightingale J., Nickeson J., Richardson AD., Xie D., Wang J, Li X., Strabala K., and Davies JE. 2013. Daily MODIS - 500 m reflectance anisotropy direct broadcast (DB) products for monitoring vegetation phenology dynamics. *International Journal of Remote Sensing* 34(16): 5997-6016. <https://doi.org.10.1080.01431161.2013.803169>.
 34. Valashedi RN., and Sabziparvar AA. 2016. Evaluation of winter chill requirement models using the observed apple tree phenology data in Kahriz (Urmia, Iran). *Iranian Horticultural Science* 47(3): 561-570.. (In Persian with English abstract). <https://doi.org.10.22059.IJHS.2016.59818>.
 35. Vitasse Y., Schneider L., Rixen C., Christen D., and Rebetez M. 2018. Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology* 248: 60-69. <https://doi.org.10.1016.j.agrformet.2017.09.005>.
 36. Von Bennewitz Alvarez E., Cazanga-Solar R., and Carrasco-Benavides M. 2018. Studying phenological stages of cherry (*Prunus avium* L.) using field observations and satellite-derived vegetation indexes. *IDESIA* 36(1): 65-71. <http://dx.doi.org.10.4067.S0718-34292018000100065>.
 37. Yáñez-Morrón G., Gironás J., Caneo Marta., Delgado R., and Garreaud R. 2018. Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model for Precipitation Forecasting in an Andean Region with Complex Topography. *Atmosphere* 9(8): 304. <https://doi.org.10.3390.atmos9080304>.
 38. Yazdanpanah H., Ohadi D., and Soleimanitabar M. 2010. Forecasting different phenological phases of apple using artificial neural network. *Journal of Research in Agricultural Science* 6(2): 97-106. (In Persian with English abstract)
 39. Yoder BJ., and Waring RH. 1994. The normalized difference vegetation index of small Douglas-Fir canopies with varying chlorophyll concentrations. *Remote Sensing of Environment* 49: 81-91. [https://doi.org.10.1016.0034-4257\(94\)90061-2](https://doi.org.10.1016.0034-4257(94)90061-2).
 40. Zakeri Z., Azadi M., and Sahraeiyan F. 2014. Verification of WRF forecasts for precipitation over Iran in the period Feb-May 2009. *Nivar*, 38(87-86): 3-10. (In Persian with English abstract)
 41. Zheng Y., Wu B., Zhang M., and Zeng H. 2016. Crop Phenology Detection Using High Spatio-Temporal Resolution Data Fused from SPOT5 and MODIS Products. *Sensors*, 16(12), 2099. <https://doi.org.10.3390.s16122099>
 42. Zoljoodi M., Ghazi Mirsaeed M., and Seifari Z. 2013. Verification of WRF model on accuracy and precision of various schemes and evaluation of precipitation forecast in Iran. *Geographical Research* 28(2): 187-194. (In Persian with English abstract)



Spatiotemporal Estimation of Precipitation Using GPM Satellite Data in Jazmourian Catchment

K. Raispour¹, B. Salahi^{2*}, B. Abad³

Received: 11-11-2021

Revised: 15-12-2021

Accepted: 14-03-2022

Available Online: 21-05-2022

How to cite this article:

Raeispour K., Salahi B., and Abad B. 2022. Spatiotemporal Estimation of Precipitation using GPM Satellite Data in Jazmourian Catchment. Journal of Water and Soil 36(1): 145-165. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.73483.1113](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.73483.1113)

Introduction

Precipitation is the most important element of water level that recognizing its temporal-spatial characteristics at different scales is an important step towards better understanding and modeling of the hydrological cycle and related phenomena such as floods. Drought, landslides, snow and climate change are on a regional and global scale. Despite the large number of studies conducted in this field, there is still a lot of research need in many parts of the world for reasons such as lack of weather stations to access ground observation data and the non-uniform spatial distribution of these stations. Nowadays, with significant technological advances, including the advent of various satellites, access to a variety of precipitation data has been greatly facilitated. Among the latest precipitation products of various satellites, we can refer to the Global Precipitation Measurement (GPM) satellite data. Related to the subject of the present study, it is stated that most of the studies on rainfall in the Jazmourian catchment area have been based on station data, which due to the poor distribution of meteorological stations; it is not possible to estimate the temporal-spatial distribution of precipitation in the study basin. In this study, the temporal-spatial analysis of precipitation using GPM satellite precipitation products as one of the most important climatic parameters in the basin. Due to the undeniable importance of rainfall in this basin, it seems that the analysis of variable rainfall can provide valuable climatic information to researchers and planners. To pave the way for new study platforms.

Materials and Methods

In this study, satellite data (GPM) with a spatial resolution of 0.1×0.1 degrees from January 2001 to December 2019 have been used for spatiotemporal analysis of precipitation in the Jazmourian catchment. The GPM satellite provides more accurate and realistic estimates than other TRMM satellites. In this study, a calibrated precipitation product of level 3 of 6 GPM satellite versions was used. Relevant data are in NCDF format and have UTM image system with WGS84 datum, which after quality control and preprocessing, by specialized software (ENVI, ArcGIS and EXCELL) is converted into network data and data tables and the necessary outputs based on the geographical boundary of the catchment was extracted. The average monthly rainfall was extracted from the average daily rainfall belonging to each month and the seasonal average was extracted from the average of three months related to each season. Spatially, the values of each pixel are the conditions of the average amount of precipitation related to each time series (monthly, seasonal and annual) during the statistical period.

Results and Discussion

Based on the results, the average rainfall in the Jazmourian catchment was estimated as 144 mm, the spatial distribution of which ranged from 83 to 232 mm. The maximum rainfall occurred in the northern and western parts and the minimum occurred in the central and eastern parts of the basin. Furthermore; based on the annual

1- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2 and 3- Professor and Ph.D. Graduated of Department of Physical Geography, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: bromand416@yahoo.com)

distribution of rainfall during the statistical period under study, the highest rainfall was in 2019 with 239 mm and the lowest with 53 mm in 2001. In terms of seasonal distribution, winter and spring with values of 118 and 88 mm, respectively, showed the highest and autumn and summer with values of 22 and 45 mm, showed the lowest values of precipitation. Also, during the statistical period under study, winter 2005 with 193 mm had the highest and autumn 2003 with 1 mm had the lowest seasonal rainfall in the basin. In addition, an interesting point is the spatial displacement of high-pressure nuclei in different seasons of the year; so that these nuclei are observed in the cold seasons of the year in the northern and western parts and in the warm seasons of the year in the southwestern and southeastern parts of the basin. The spatial distribution of monthly precipitation indicates the occurrence of the highest monthly precipitation in February and March and the lowest in May and September. Also, the monthly rainfall time series indicates the maximum incidence of precipitation in February 2001 (94 mm) and its minimum in January 2001 (no precipitation).

Conclusion

Precipitation as a source of fresh water on Earth is one of the most important hydrological parameters, the importance of which is undeniable in the survival of human communities and natural ecosystems. Due to the large temporal-spatial variations of precipitation, its study seems necessary. But one of the main challenges for studying this phenomenon is the lack of ground stations as well as their improper distribution. Today, with advancement of technology and remote sensing, a diverse range of satellite data has become available to environmental scientists. In this regard, in the present study, using GPM satellite data and in the statistical period 2001-2019, the temporal-spatial distribution of precipitation in the Jazmourian catchment area in southeastern Iran has been investigated. In general, the high variability of rainfall in Jazmourian catchment in different months and seasons of the year, shows the dominance of arid and low climate in this basin. Therefore, due to the rainfall situation and its high fluctuations under climate change conditions, in the near future, this basin will face serious challenges and crises in water resources management and the sustainability of natural ecosystems. The GPM satellite data used in this study showed appropriate and expected results from the spatial-temporal distribution of precipitation in the Jazmourian catchment and showed a good correlation with meteorological stations. In general, the use of GPM satellite data in the present study is appropriate, which due to its appropriate spatio-temporal separation, gives reliable and satisfactory results. On the other hand, inadequate spatial coverage of meteorological stations and their large statistical vacuum in such a relatively large basin justify the use of this valuable and useful satellite data.

Keywords: GPM satellite, Jazmourian Catchment, Precipitation, Spatiotemporal

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۱، ص ۱۴۵-۱۶۵

برآورد زمانی - فضایی بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM در حوضه‌ی آبریز جازموریان

کوهزاد رئیس پور^۱ - پرومند صلاحی^{۲*} - بهروز آباد^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۳

چکیده

بارش به عنوان مهم‌ترین متغیر در چرخه‌ی هیدرولوژیکی تأمین کننده‌ی آب، نقش مهمی در تداوم حیات سیاره‌ی زمین ایفا می‌کند. پایداری اکوسیستم‌های مختلف گیاهی و جانوری در حوضه‌ی آبریز جازموریان وابستگی بسیار زیادی به مقدار بارش دارد. تغییرپذیری بالای بارش، تاب‌آوری این حوضه را با چالشی جدی روبرو نموده است. با توجه به کمبود ایستگاه‌های زمینی و پراکنش نامناسب آن‌ها در این حوضه، در تحقیق حاضر به واکاوی تغییرات زمانی - فضایی بارش طی دوره‌ی (۲۰۱۹-۲۰۰۱) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی سنجنش جهانی بارش (GPM) پرداخته شد. در ابتدا داده‌های بارش مورد نیاز با تفکیک فضایی 0.1×0.1 درجه و تفکیک زمانی ماهانه، فصلی و سالانه فراهم گردید. پس از انجام پیش پردازش‌های لازم در محیط نرم‌افزارهای گرافیکی و آماری، با استفاده از روش‌های زمین آماری نرم‌افزار GIS به پهنه بندی توزیع فضایی بارش اقدام و در نهایت به تفسیر خروجی‌های مربوطه پرداخته شد. براساس نتایج، توزیع فضایی بارش حوضه‌ی آبریز جازموریان در دوره‌ی آماری مورد مطالعه از ۲۳۲-۸۳ میلی‌متر متغیر بوده است. بیشینه‌ی بارش در بخش‌های شمالی و غربی و کمینه‌ی آن در نواحی مرکزی و شرقی حوضه رخ داده است. به لحاظ توزیع فصلی، مقدار بارش در زمستان ۷۳، بهار ۴۷، تابستان ۱۲ و پاییز نیز ۱۲ میلی‌متر برآورد گردید. واکاوی بارش ماهانه نیز بیان‌گر رخداد بیش‌ترین مقدار بارش در ماه‌های مارس (۳۳ میلی‌متر) و فوریه (۳۲ میلی‌متر) و کم‌ترین آن در ماه‌های سپتامبر (۱ میلی‌متر) و می، ژوئن و اکتبر (۳ میلی‌متر) است. به طور کلی، نتایج حاکی از تغییرپذیری بالای بارش و حاکمیت شرایط خشک در حوضه‌ی آبریز جازموریان است.

واژه‌های کلیدی: بارش، حوضه‌ی آبریز جازموریان، زمانی - فضایی، ماهواره‌ی GPM

مقدمه

متغیرهای اساسی برای ارزیابی موجودیت بالقوه‌ی منابع آب به شمار می‌رود. آب حاصل از بارندگی عامل اصلی تبادل گرما در فضای جو - زمین و حفظ تعادل انرژی در اندرکنش گردش‌های جوی - اقیانوسی می‌باشد. این پدیده به عنوان منبع تأمین آب شیرین، چرخه‌های آب و انرژی روی زمین را به هم پیوند می‌دهد. آگاهی از زمان، مکان و چگونگی رخداد بارندگی برای مطالعات علمی و همچنین جامعه از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. علاوه بر این‌ها؛ براساس پژوهش (Dobson et al., 1997)، به لحاظ اهمیت و کاربرد در بین موضوعات علوم محیطی، این متغیر (بارش) به عنوان یکی از ارکان اصلی مطالعه‌ی تغییر اقلیم می‌باشد؛ زیرا به طور مستقیم بر روی

بارش به عنوان متغیر حیات‌بخش سیاره‌ی زمین، یکی از

۱- استادیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

۲ و ۳- به ترتیب استاد و دانش آموخته دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: bromand416@yahoo.com

DOI: 10.22067/JSW.2022.73483.1113

تکنیک‌های سنجش از دور، پوشش وسیع و قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب داده‌های آن است که تخمین دقیق و معتبری از تغییرات پدیده‌ی مذکور ارائه داده و داده‌های بارشی ارزشمندی را از نواحی دوردست و فاقد داده مانند کوهستان‌ها، اقیانوس‌ها و بیابان‌ها فراهم می‌نماید (Maussion et al., 2021). در این میان از جدیدترین داده‌های بارش ماهواره‌های مختلف، در پژوهش کریساتوم و همکاران (Kirschbaum et al., 2017) به داده‌های ماهواره‌ی سنجش جهانی بارش (GPM) اشاره شده است. این ماهواره با پوششی جهانی، جزئیات چگونگی رخداد بارش و توزیع مکانی آن و همچنین تغییرات الگوهای بارش را در در مقیاس زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه بررسی می‌کند. علاوه بر این‌ها؛ محصولات ماهواره‌ی مذکور برای مدل‌سازی و تخمین تأثیرات مخاطرات (از قبیل سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها)، بلاپای جوی، پیش‌بینی کشاورزی و هشدارهای قحطی به طور وسیعی استفاده شده‌است. به طور کلی ماهواره‌ی GPM به جمع‌آوری داده‌های ضروری برف و باران در راستای انجام مطالعات کاربردی می‌پردازد. بنابراین، با توجه به محدودیت کمی و همچنین قدرت تفکیک فضایی پایین داده‌های ایستگاهی، امروزه مطالعات زیادی به ارزیابی تغییرات بارش با استفاده از محصولات ماهواره‌ای پرداخته‌اند. برای نمونه در پژوهشی که به وسیله‌ی کانون و همکاران (Cannon et al., 2018) جهت صحت-سنجی داده‌های ماهواره‌ای بارش، به مقایسه‌ی داده‌های زمینی با داده‌های بارش ماهواره‌های GPM و مدل MERRA در حوضه‌ی آبریز کشف‌رود پرداخته شد، داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM در تخمین بارش روزانه در منطقه‌ی مورد مطالعه، نسبت به داده‌های بارش مدل MERRA از دقت بسیار بالاتری برخوردار بودند. به استناد این مطالعه، داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM همبستگی بسیار خوبی با داده‌های بارش ایستگاهی نشان داده و از توانایی کافی برای پایش توزیع زمانی-فضایی بارندگی برخوردار بودند. در تحقیق علی بخشی و همکاران (Ali-bakhshi et al., 2018) که با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM بر روی همین حوضه انجام شده است، یافته‌ها حاکی از دقت بالای داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM در مقیاس زمانی ماهانه بوده‌است. براساس نتایج دیگر پژوهشگران، داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM از دقت کافی برای برآورد رفتار فضایی بارش غرب ایران برخوردار بوده و همچنین توانایی بهتر این ماهواره در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر (ماه و سال) نیز آشکار شده‌است (Sadeghi et al., 2019). در تحقیق رحیمی و همکاران (Rahimi et al., 2010) که به صحت‌سنجی داده‌های بارش روزانه‌ی حاصل از داده‌های ماهواره‌های TRMM، ERA- و Interim، پرداخته شده‌است، نتایج حاکی از همبستگی مناسب داده‌های GPM با مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک بوده‌است. همچنین امامی و همکاران (Emami et al., 2020) دقت و عملکرد

ویژگی‌های اقلیم جهانی و سیستم چرخه‌ی بیوشیمیایی زمین تأثیرگذار است. در همین راستا، براساس تحقیق یاراحمدی و همکاران (Yarahmadi et al., 2015)، بارش به عنوان یکی از بنیادی‌ترین متغیرهای آب و هواشناختی، از یک سو از سامانه‌های گردش عمومی جو و از سوی دیگر از عوامل محلی از قبیل ناهمواری‌ها، موقعیت جغرافیایی و موقعیت ریاضی و ویژگی‌های زمین‌شناسی و فیزیکی سطح زمین تأثیر می‌پذیرد. یاتاگا و همکاران (Yataga et al., 2012) پدیده‌ی بارش را به دلیل اهمیت انکارناپذیر در تأمین منابع آبی و متعاقب آن تأثیر مستقیم و غیرمستقیم بر زندگی انسان و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی، به عنوان یکی از موضوعات بسیار مهم در بین محققان علوم محیطی قلمداد کردند. همچنین در پژوهش سروچت و همکاران (Crochet et al., 2007) بارش به عنوان مهم‌ترین متغیر تراز آب مشخص شده است که شناخت ویژگی‌های زمانی-فضایی آن در مقیاس‌های مختلف، گامی مهم در جهت درک و مدل‌سازی بهتر چرخه‌ی هیدرولوژی و پدیده‌های مرتبط با آن از قبیل سیلاب، خشکسالی، زمین لغزش، برف و تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی می‌باشد. با این وجود؛ در تحقیق حلبیان (Halabian, 2016)، بارش از جمله رخدادهای جوی است که به دلیل شرایط پیچیده و تأثیرپذیری از عوامل گوناگون و ناشناخته، هنوز هم ابهامات زیادی در درک و پیش‌بینی آن وجود دارد. بر همین اساس، ایگوچی و همکاران (Iguchi et al., 2020) به تغییرپذیری بسیار زیاد این پدیده نسبت به سایر عناصر اقلیمی اشاره کرده‌اند. زیرا در زمان و فضا و به ویژه در مناطق مرتفع کوهستانی نوسان زیادی را نشان می‌دهد. در همین راستا مطالعات پرشماری در جهان و ایران با استفاده از روش‌های متنوعی بر روی بارش به انجام رسیده است که در این میان می‌توان به مطالعات مبتنی بر تحلیل آماری بارش (Tongal H. 2019; Verma et al. 2019) Kiani et al., 2020؛ تحلیل همیدی بارش (Chavoshian and Katiraie- Rousta et al., 2020 Boroujerdy, 2019; Vélez et al., 2019; Poorzaydi, 2019 Lussana, 2021؛) اشاره نمود. علی‌رغم تعدد مطالعات انجام شده در این خصوص، هنوز هم در بسیاری از نقاط جهان از جمله نواحی مرتفع کوهستانی و صعب‌العبور و همچنین بیابان‌های پهناور و دوردست، به دلایلی از قبیل خلأ ایستگاه‌های هواشناسی جهت دستیابی به داده‌های مشاهدات زمینی و توزیع فضایی غیریکنواخت این ایستگاه‌ها، نیازهای تحقیقاتی زیادی وجود دارد. با این وجود؛ امروزه با پیشرفت‌های شتابان و چشم‌گیر تکنولوژیکی از جمله پیدایش انواع ماهواره‌ها، دستیابی به داده‌های متنوعی از بارش بسیار تسهیل شده‌است (Alexakis and Tsanis, 2016). سنجش از دور به عنوان ابزار کارآمد، کاستی‌های اندازه‌گیری‌های زمینی را کاهش داده و مشکلات فعلی را از میان برداشته‌است. مزیت اصلی پایش پدیده‌ی بارش با استفاده از

جازموریان، در پژوهش حاضر تلاش می‌شود تا با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM با قدرت تفکیک مکانی 0.1×0.1 و زمانی روزانه، ویژگی‌های زمانی و فضایی بارش طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۹ - ۲۰۰۱ ارائه شده و اطلاعات اقلیمی ارزشمندی را در اختیار محققان و برنامه‌ریزان قرار داده تا زمینه‌ساز بسترهای مطالعاتی جدیدی شود.

منطقه‌ی مورد مطالعه

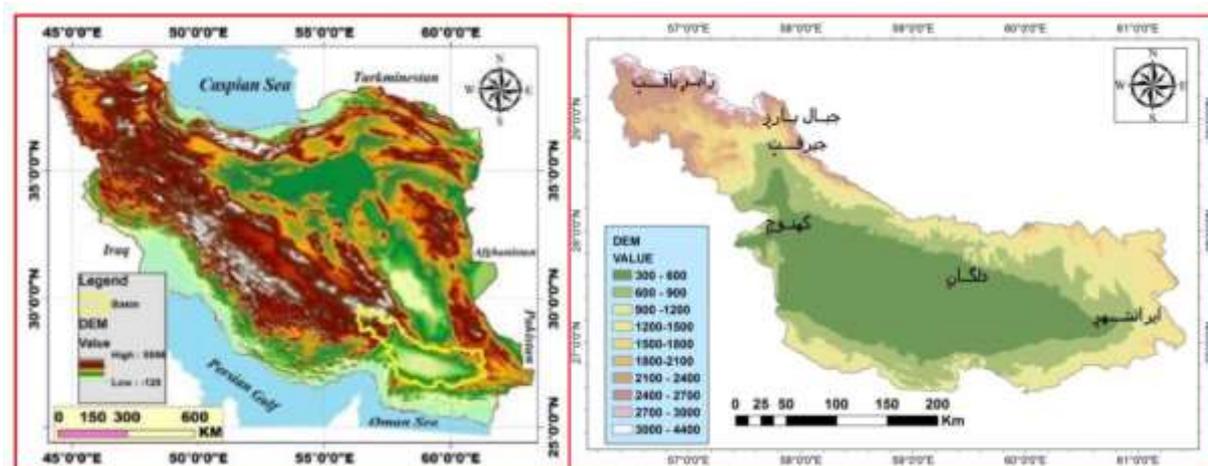
حوضه‌ی آبریز جازموریان یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های آبریز در جنوب شرق ایران، با گستره‌ای حدود $69/600$ کیلومتر مربع در مختصات جغرافیایی $26^{\circ} 35' - 29^{\circ} 35' N$ و $56^{\circ} 15' - 61^{\circ} 25' E$ واقع می‌باشد. این حوضه با امتداد شمال‌غربی - جنوب‌شرقی از جنوب استان کرمان تا جنوب‌غرب استان سیستان و بلوچستان گسترده شده‌است (شکل ۱). حوضه‌ی آبریز جازموریان به وسیله‌ی رشته کوه‌های جبال بارز و شهسواران از حوضه‌ی آبریز لوت در شمال و با رشته کوه‌های زاگرس (مکران) از حوضه‌ی آبریز خلیج فارس و دریای عمان در جنوب جدا می‌شود (Afshin, 2004). در بخش مرکزی این حوضه، فرورفتگی بیضوی شکلی با مساحت 3775 کیلومتر مربع و ارتفاع کم‌تر از 600 متر وجود دارد که در واقع باتلاق نهایی کلیه‌ی جریان‌های سطحی اطراف است. ارتفاع پست‌ترین بخش این حوضه (دریاچه‌ی جازموریان) از سطح دریای آزاد 350 متر و بلندترین نقطه‌ی آن که در شمال حوضه واقع است، حدود 4400 متر می‌باشد. به لحاظ شرایط اقلیم‌شناسی نیز، به جز ارتفاعات بلند نیمه‌ی شمالی، شرقی و تا حدی جنوبی حوضه که دارای اقلیمی نیمه خشک می‌باشد، در سایر مناطق به سمت بخش‌های داخلی با کاهش ارتفاع و متعاقب آن افزایش شدید دما، اقلیمی خشک و فراخشک حاکم است (Pashaei, 2004). هلیل رود از شمال‌غرب و رودخانه‌ی بمپور از شرق به عنوان دو رود اصلی تغذیه‌کننده‌ی آب این حوضه هستند (Sanjari et al., 2020).

داده‌ها و روش‌شناسی

در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ی (GPM^۱) با تفکیک فضایی 0.1×0.1 درجه از ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۱۹ برای واکاوی زمانی - فضایی بارش در حوضه‌ی آبریز جازموریان استفاده شده‌است. براساس پژوهش (Huffman et al., 2015)، ماهواره‌ی GPM به عنوان یک سیستم رادیومتریکی و راداری پیشرفته، با همکاری سازمان فضایی آمریکا (NASA) و آژانس اکتشافات فضایی ژاپن برای مشاهده‌ی بارش جهانی به فضا پرتاب گردیده است.

ماهواره‌ی GPM را در تخمین بارش ماهانه در حوضه‌ی آبریز گرگانود مناسب تشخیص دادند و استفاده از داده‌های بارش این ماهواره را در نواحی بدون ایستگاه زمینی مفید و ارزشمند قلمداد کرده‌اند. به طور کلی، امروزه داده‌های ماهواره‌ای از چنان اهمیتی برخوردار هستند که به نظر می‌رسد تنها راه حل عملی برای یک تخمین جامع از مقدار بارش در سطح جهان، استفاده از داده‌های مذکور باشد (Villarini and Krajewski 2008; Yong et al., 2012). مرور پیشینه‌های مرتبط با موضوع پژوهش پیش رو، بیان‌گر این مطلب است که اغلب مطالعات انجام شده در خصوص بارش‌های منطقه‌ی مورد مطالعه مبتنی بر داده‌های ایستگاهی بوده است که با توجه به پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، به خوبی از عهده‌ی برآورد توزیع زمانی - فضایی بارش در حوضه‌ی مورد مطالعه برنیامده است. بنابراین در این تحقیق به واکاوی زمانی - فضایی بارش با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی در حوضه‌ی آبریز جازموریان واقع در جنوب‌شرق ایران (میان استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان) پرداخته می‌شود. با توجه موقعیت مکانی این منطقه یعنی قرارگیری در عرض‌های جغرافیایی پایین (جنب حاره) که نمایان‌گر اقلیمی گرم و خشک می‌باشد، به خوبی می‌توان به اهمیت متغیر بارش در این حوضه پی برد. در بخش‌های میانی این حوضه، چاله‌ی فرو افتاده‌ای وجود دارد که در مواقع ترسالی گستره‌ی وسیعی را پوشش می‌دهد و به نام تالاب جازموریان شناخته می‌شود. با توجه به تداوم خشکسالی‌های شدید در دو دهه‌ی اخیر، بر خشکی و شکنندگی محیطی در حوضه‌ی آبریز جازموریان افزوده شده و وقوع رویدادهای گردوغبار به عنوان یکی از پیامدهای اصلی کمبود بارش، از گستره و شدت بیش‌تری برخوردار شده‌است (Fooladi et al., 2020). از سوی دیگر، کمبود ایستگاه‌های هواشناسی و پراکنش نامناسب آن‌ها سبب شده که در گستره‌ی وسیعی از جمله نقاط مرتفع کوهستانی و همچنین دشت‌های داخلی حوضه، اطلاعات بارشی قابل اعتمادی در دسترس نباشد. بر همین اساس، در راستای رفع کمبود داده‌های بارشی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای با تفکیک فضایی - زمانی مناسب می‌تواند گامی مهم در جهت برآورد توزیع زمانی - مکانی بارش این حوضه قلمداد شود. علاوه بر این‌ها؛ وجود قطب‌های کشاورزی مهمی از قبیل جیرفت، فاریاب و رودبار جنوب در استان کرمان و ایرانشهر، دلگان، اسپکه، بمپور، سردگان و سرتختی در استان سیستان و بلوچستان (Negarsh and Khosravi, 1998) و همچنین تراکم جمعیتی بالای برخی از این دشت‌های حاصل‌خیز، لزوم توجه ویژه به بحث منابع آبی را به طور قابل توجهی برجسته می‌کند.

بنابراین با توجه به اهمیت انکارناپذیر بارش در حوضه‌ی آبریز



شکل ۱- حوضه‌ی آبریز جازموریان و موقعیت آن در ایران
Figure 1- Jazmourian catchment and its position in Iran

دیتوم WGS84 برخوردار بوده که پس از کنترل کیفی و پیش‌پردازش، توسط نرم‌افزارهای تخصصی (ENVI, ArcGIS) و EXCELL) مورد پردازش قرار گرفت. این داده‌ها که به صورت رقمی بوده و مقادیر آنها ارزش عددی مقدار بارش بر حسب میلی‌متر (mm) به ازای هر پیکسل است، با استفاده از نرم‌افزارهای فوق تبدیل به داده‌های شبکه‌ای و جداول اطلاعاتی شده و خروجی‌های لازم بر اساس مرز جغرافیایی حوضه‌ی آبریز جازموریان استخراج گردید. به طور کلی خروجی‌های حاصل از داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM نتیجه‌ی اعمال محاسبات بر روی دو ماتریس ماهانه به ابعاد ۲۲۸×۶۶۰ (۲۲۸ معرف تعداد مشاهدات در ماه‌های پیاپی از ۲۰ سال مورد مطالعه (۲۰×۱۲) و ۶۶۰ معرف تعداد نقاط شبکه‌بندی شده‌ی ماهواره‌ی GPM با قدرت تفکیک مکانی افقی $۰/۱ \times ۰/۱$ درجه در پهنه‌ی حوضه‌ی آبریز جازموریان) و فصلی به ابعاد ۶۶۰×۷۶ معرف تعداد مشاهدات در فصول پیاپی (۱۹×۴) است. به عبارتی دیگر، میانگین بارش ماهانه از میانگین بارش روزانه‌ی متعلق به هر ماه و میانگین فصلی از میانگین سه ماه مربوط به هر فصل استخراج گردید. به لحاظ مکانی نیز، مقادیر هر پیکسل، شرایط میانگین مقدار بارش مربوط به هر سری زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) در طول دوره‌ی آماری است.

اعتبارسنجی داده‌ها

یکی از مهم‌ترین الزامات قبل از ارائه‌ی یافته‌های حاصل از به کارگیری داده‌های سنسور از دور در حوزه‌های مطالعاتی مختلف، اعتبارسنجی آن‌ها است. به منظور نشان دادن دقت داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM از یک سو و از سوی دیگر مقایسه‌ی نتایج آن نسبت به برآورد مدل ماهواره‌ی هم‌تراز آن یعنی TRMM، از

همچنین در همین زمینه (Yong et al., 2015) بیان کرده است که این ماهواره شامل یک ماهواره‌ی مشاهده‌ی مرکزی و هشت ماهواره‌ی ترکیبی دیگر است که در مقایسه با دیگر ماهواره‌های تخمین بارش (TRMM) برآوردهای دقیق‌تر و واقعی‌تری را نشان می‌دهد. هر یک از ماهواره‌های ترکیبی GPM با فراهم‌سازی یک داده‌ی سنسوری موج کوتاه، سبب دستیابی به یک پوشش جهانی بهتری می‌شوند. محصولات GPM داده‌های ساعتی، روزانه و ماهانه‌ی بارش را با تفکیک فضایی $۰/۱ \times ۰/۱$ درجه برای کل جهان فراهم می‌نمایند (Junzhi et al., 2012). حساسیت بالای رادار تشخیصی ماهواره‌ی GPM نسبت به دیگر ماهواره‌های باران‌سنجی، سبب دقت بیش‌تر آن شده‌است. مطالعات متعددی نشان داده است که از میان داده‌های بارش ماهواره‌های مختلف، داده‌های بارش ماهواره‌ی GPM به عنوان دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین آن‌ها بوده و به طور وسیعی در زمینه‌های متنوعی استفاده شده‌است (Yuan et al., 2018; Tang et al., 2020; Sharifi et al., 2016; Li et al., 2015). در این خصوص در پژوهش (al., 2021) به برخی از کاربردهای ماهواره‌ی مذکور از قبیل بارندگی‌های شدید، پیش‌بینی مخاطرات و شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی اشاره شده است. در این تحقیق نیز از داده‌ی بارش کالیبره شده‌ی سطح ۳ نسخه‌ی ۶ ماهواره‌ی GPM (GPM3IMERGDF v06) که از وبگاه <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets> دریافت شده است، استفاده گردید. داده‌های مربوطه دارای فرمت NCDF و از سیستم تصویر UTM با

توسط ماهواره‌ی GPM در حوضه‌ی آبریز جازموریان ۵ میلی متر بیش‌تر از مقادیر بارش حاصل از داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک است. به لحاظ فصلی نیز میانگین مقادیر بارش برآورد شده توسط ماهواره‌ی مورد استفاده، در فصل بهار (مارس، آوریل و می) ۳ میلی‌متر کم‌تر از برآورد بارش ایستگاه‌های هواشناسی است، اما در سایر فصول (تابستان، پاییز و زمستان) ماهواره‌ی GPM برآورد بیش‌تری را نشان داده است. به لحاظ ماهانه نیز کم‌ترین مقدار اختلاف با مقدار ۲ میلی متر مربوط به ماه ژوئن و بیش‌ترین اختلاف با مقدار ۱۲ میلی متر در ماه مارس برآورد گردید. همچنین براساس ضریب همبستگی پیرسون (Rp)، مقدار ضریب تعیین بین مقادیر بارش برآورد شده توسط ماهواره‌ی GPM و ایستگاه‌های سینوپتیک انتخابی، در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه از ۰/۸۴ تا ۰/۹۳ متغیر بوده است که بیان‌گر همبستگی بسیار قوی بین آن‌ها می‌باشد (شکل ۲).

نتایج

توزیع فضایی بلند مدت

برخی از پارامترهای مربوط به توزیع فضایی بارش در حوضه‌ی آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۱۹-۲۰۰۱ در شکل ۳ آمده است. به طور کلی براساس شکل ۳-ج، میانگین بلند مدت توزیع مکانی بارش در این حوضه از جنوب شرق به شمال غرب افزایش می‌یابد؛ به طوری که بیشینه‌ی بارش در بخش‌های شمالی و همچنین نیمه‌ی غربی این حوضه به ۲۳۲ میلی‌متر می‌رسد. در مورد علت تمرکز بیشینه‌ی فضایی بارش در این نواحی، می‌توان دو عامل مهم؛ یکی اثر برجسته‌ی عوامل محلی از جمله وجود ارتفاعات بلند و دیگری عرض جغرافیایی را مؤثر قلمداد کرد. در توضیح عامل دوم نیز می‌توان به فاصله‌ی کم‌تر بخش‌های مذکور نسبت به منطقه‌ی عمل الگوهای بارشی غالب بر ایران اشاره نمود که موقعیت جغرافیایی بهتر و قرارگیری در مسیر سامانه‌های ورودی شمالی و غربی، سبب افزایش میانگین بارندگی آن‌ها شده است.

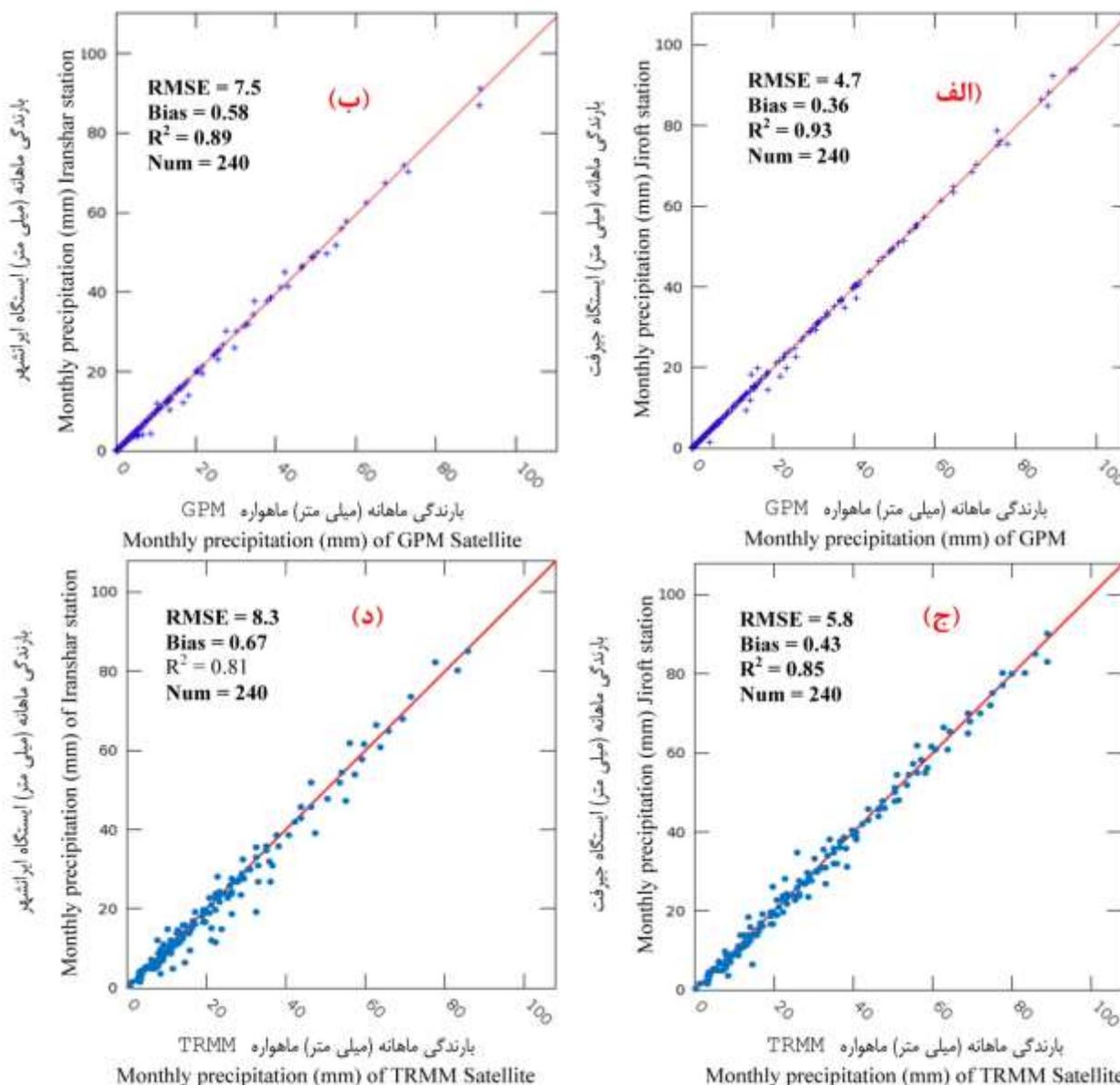
داده‌های مقادیر بارش دو ایستگاه هواشناسی سینوپتیک جیرفت و ایرانشهر و همچنین محصولات بارش ماهواره TRMM استفاده گردید. محصول بارش ماهواره‌ی TRMM محصول 3B42V7 با قدرت تفکیک مکانی $0/25 \times 0/25$ درجه و مقیاس زمانی آن همانند داده‌های GPM ماهانه (۲۰۱۹ - ۲۰۰۱) بوده است. در ابتدا مقادیر بارش مربوط به پیکسل‌هایی (۲ پیکسل و هر پیکسل با ابعاد تقریبی ۱۰ در ۱۰ کیلومتر مربوط به ماهواره‌ی GPM و با ابعاد تقریبی ۲۵ در ۲۵ کیلومتر مربوط به ماهواره‌ی TRMM که دو ایستگاه سینوپتیک انتخابی بر روی آنها قرار می‌گرفتند برآورد شد. سپس با استفاده از شاخص‌های آماری اعتبارسنجی و همبستگی از قبیل میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، بایاس (BIAS) و ضریب تعیین (R^2) میان بارش برآورد شده توسط دو ماهواره‌ی GPM و TRMM و بارش مشاهداتی دو ایستگاه سینوپتیک انتخابی، بهترین مدل برآوردی ماهواره‌ای از میان دو ماهواره‌ی GPM و TRMM انتخاب گردید. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در حالت کلی مقادیر بارش هر دو ماهواره‌ی مورد استفاده از دقت مناسبی در سطح حوضه‌ی آبریز جازموریان برخوردار هستند و مقدار خطای بارش برآوردی برای هر دو ایستگاه قابل چشم‌پوشی است. مقایسه دقت ماهواره‌های GPM و TRMM در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای نشان داد که هر چند شباهت زیادی بین مقادیر بارش برآوردی GPM و TRMM وجود دارد، ولی دقت داده‌های ماهواره‌ی GPM در سطح حوضه‌ی آبریز جازموریان نسبت به داده‌های TRMM بیش‌تر است. زیرا مقدار خطاهای برآوردی / ضریب تعیین برای داده‌های بارش GPM نسبت به داده‌های بارش TRMM کم‌تر / بیش‌تر است (شکل ۲ و جدول ۱). از نظر مکانی نیز، دقت داده‌های سنجش‌ازدوری GPM و TRMM در ایستگاه هواشناسی جیرفت بهتر از ایستگاه هواشناسی ایرانشهر مشاهده گردید (جدول ۱). بر همین اساس، به علت دقت بالاتر ماهواره‌ی GPM نسبت به ماهواره‌ی TRMM از یک جهت و از جهتی دیگر به دلیل محدودیت در تعداد صفحات مقاله، به نتایج حاصل از برآورد بارش توسط ماهواره‌ی GPM بسنده شد. یافته‌ها نشان داد متوسط بارش سالانه‌ی برآورد شده

جدول ۱- شاخص‌های آماری مورد استفاده در ارزیابی و مقایسه‌ی میان محصولات بارش ماهواره‌های GPM و TRMM با داده‌های بارش

مشاهداتی در حوضه‌ی آبریز جازموریان (۲۰۱۹ - ۲۰۰۱)

Table 1- Statistical indices used in evaluating and comparing the precipitation products of GPM and TRMM satellites with the observed precipitation data in Jazmourian catchment 2001-2019

محصولات Products	مقیاس زمانی Time scale	ایستگاه Station	RMS	BIAS	R ²	تعداد ماه Number of month
GPM	ماهانه (monthly)	جیرفت (Jiroft)	4.7	0.36	0.93	240
		ایرانشهر (Iranshar)	7.5	0.56	0.89	240
TRMM	ماهانه (monthly)	جیرفت (Jiroft)	5.8	0.43	0.85	240
		ایرانشهر (Iranshar)	8.3	0.67	0.81	240



شکل ۲- نمودار پراکندگی (اعتبارسنجی) میان بارش ماهانه‌ی ماهواره‌های GPM و TRMM با بارش ایستگاه‌های هواشناسی؛ (الف و ج): ایستگاه هواشناسی جیرفت و (ب و د): ایستگاه‌های هواشناسی؛ (الف و ج): ایستگاه

Figure 2- Scatter diagram (validation) between the monthly precipitation of GPM and TRMM satellites with the precipitation of meteorological stations; (A and C): Jiroft Meteorological Station and (B and D): Iranshar during 2001-2019

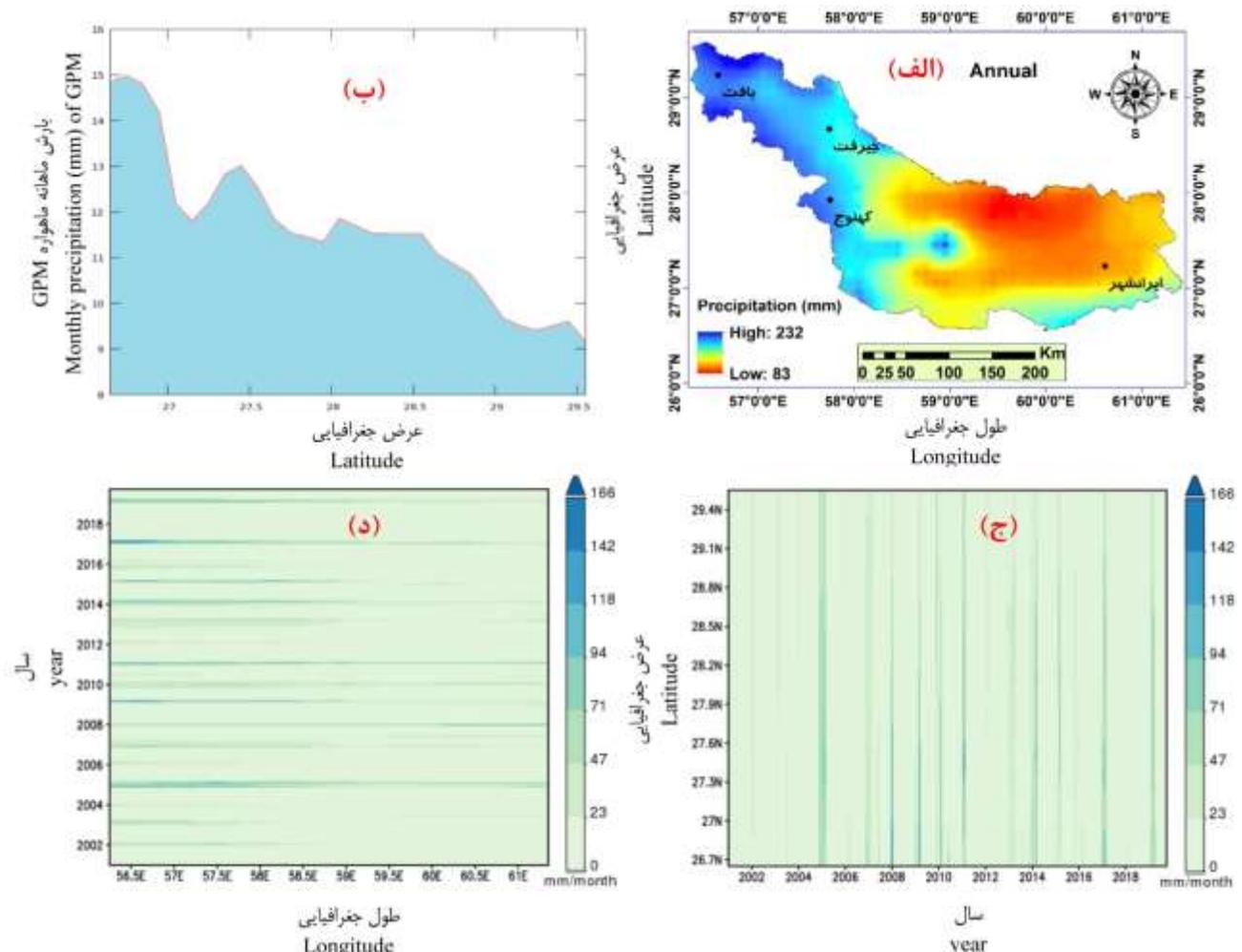
بالاتری را نسبت به نواحی همجوار در مرکز و شرق حوضه نشان داده‌است که علت اصلی آن به تأثیرپذیری بیش‌تر این ناحیه از سامانه‌ی تابستانه‌ی مونسون برمی‌گردد. از جهتی دیگر کم‌ترین مقدار بارش در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه اتفاق می‌افتد که میانگین آن تا ۸۳ میلی‌متر نیز کاهش می‌یابد. نمودارهای مربوط به برآورد سالانه‌ی بارش برای دو حالت "عرض جغرافیایی و زمان" (شکل ۳-ج) و همچنین "طول جغرافیایی و زمان" (شکل ۳-د) طی سال‌های ۲۰۱ تا ۲۰۱۹ ترسیم شده‌است. ترسیم نمودارهای مذکور در راستای

نکته‌ی قابل توجه، وجود یک محدوده‌ی بارشی بالا و مجزا در مرکز حوضه است که علت آن را می‌توان به موقعیت منحصر به فرد این منطقه که از یک سو به دلیل نزدیکی به ارتفاعات بشاگرد و اثرپذیری از بارندگی‌های همرفتی این کوه‌ها و از سوی دیگر، بهره‌گیری از بارندگی‌های تابستانه‌ی مونسون (جریان‌ات مرطوب اقیانوس هند) نسبت داد که در همین راستا در پژوهش (Habibi, 2000)، به خوبی به این موارد اشاره شده‌است. همچنین در منتهی‌الیه جنوب حوضه (جنوب‌غرب ایران‌شهر) میانگین بارش سالانه مقدار نسبتاً

مختلف مقدار بارش در راستای عرض جغرافیایی متغیر بوده است. همچنین، در بررسی ارتباط میان بارش و طول جغرافیایی، بیشینه‌ی بارش در طول‌های جغرافیایی غربی بوده که با حرکت به سمت مرکز حوضه از مقادیر آن کاسته شده و مجدداً در طول‌های جغرافیایی شرقی بر مقدار آن افزوده می‌شود.

نمودار سری زمانی بارش ۲۲۸ ماهه پیاپی (از ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۱۹) در حوضه‌ی آبریز جازموریان در شکل ۴ آمده است. براساس نمودار مربوطه؛ از سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۴ مقدار بارش ماهانه در هیچ یک از ماه‌ها از ۳۰ میلی‌متر بالاتر نرفته و بیان‌گر حاکمیت شرایط کاملاً خشک بر حوضه بوده است. در سال ۲۰۰۵ شرایط بارشی حوضه با رشد خوبی نسبت به قبل برخوردار شده است به طوری که مقدار بارش آن در برخی از ماه‌ها تا ۸۰ میلی‌متر نیز رسیده است.

طول و عرض جغرافیایی با استفاده از پروفیل‌های هوفمولر صورت گرفته است تا به آشکارسازی تفاوت‌های موجود کمک نماید. پروفیل‌های هوفمولر نیمرخ‌های عمودی و افقی محسوب می‌شوند که برای ارزیابی یا تشخیص رفتار یک متغیر جوی، در راستای طول و عرض جغرافیایی در طی زمان به کار می‌روند. در این نمودارها، ابعاد چهارگانه ژئوفیزیکی شامل؛ طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، تراز و زمان دو به دو به صورت متناظر با هم متغیر یا ثابت هستند (Hovmöller, 1949). نمودارهای حاصله بیانگر افت‌وخیزهای چشم‌گیری در مقدار بارش حوضه‌ی آبریز جازموریان در طول دوره‌ی آماری است که حاکی از نوسان زیاد بارش در حوضه‌ی مذکور می‌باشد. در همین راستا، بررسی ارتباط میان عرض جغرافیایی و بارش، بیان‌گر رخداد بیشینه‌ی بارش ماهانه در عرض‌های جغرافیایی جنوبی‌تر حوضه‌ی مذکور می‌باشد؛ هر چند که در طی سال‌های



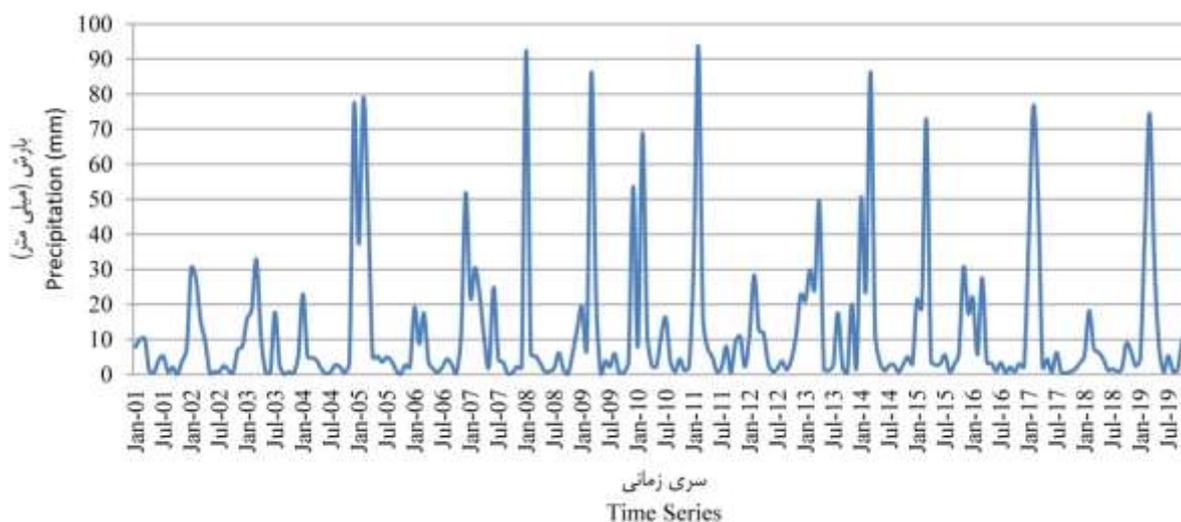
شکل ۳- توزیع بلندمدت بارش (الف)؛ توزیع مداری بارش (ب)؛ توزیع بارش سالانه در راستای عرض جغرافیایی (ج) و طول جغرافیایی (د)
 Figure 3- Long-term distribution of precipitation (a); Orbital distribution of precipitation (b); Annual rainfall distribution in terms of longitude (c) and latitude (d)

آماري مورد مطالعه بارشي كمتر از ميانگين و ۸ سال بارشي بيش از ميانگين دريافت نموده؛ به طوري كه در برخي از سال‌ها (۲۰۰۱، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۸) افت قابل ملاحظه‌اي يافته است. در حالي كه سال‌هاي ۲۰۱۹ با ۲۳۹ ميلي متر و ۲۰۰۹ با ۲۰۷ ميلي متر، شرايط بارشي خوبي را تجربه كرده است (شكل ۵). كم بودن ميانگين بارش سالانه (۱۴۴ ميلي متر) و نوسان پذيري زياد آن در سال‌هاي مورد مطالعه به خوبي حاكميت شرايط خشك را بر حوضه‌ي آبريز جازموريان نشان مي‌دهد. اين شرايط مي‌تواند وضعيت شكنده‌اي را براي منابع آبي و اكوسيستم‌هاي واقع در اين حوضه به دنبال داشته باشد.

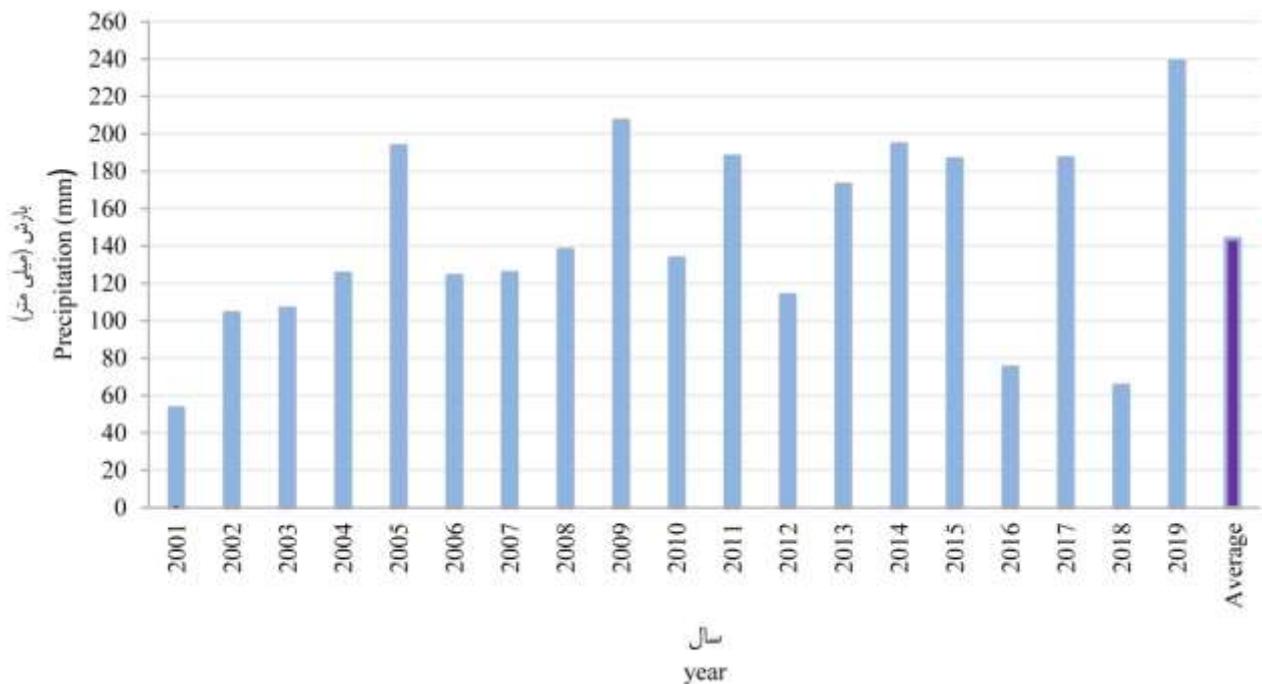
توزيع فصلي

توزيع فضايي و ميانگين بارش فصول مختلف سال در حوضه‌ي آبريز جازموريان در شكل‌هاي ۶ و ۷ آمده است. همان طوري كه در اين شكل مشخص است، ميانگين بارندگي فصل زمستان (دسامبر، ژانويه و فوريه) حوضه در دامنه‌اي از ۱۱۸-۴۱ ميلي متر متغير است. بيشينه‌ي بارش در بخش‌هاي شمالي و غربی حوضه و كمينه‌ي آن نيز در مناطق مركزي و شرقي حوضه رخ داده است.

اما اين روند تداوم نداشته و در سال ۲۰۰۶ مجدداً اين حوضه با كم بارشي مواجه گرديده به طوري كه مقدار بارش در هيچ ماهي از ۲۰ ميلي متر فراتر نرفته است. از سال‌هاي ۲۰۰۷-۲۰۱۱ تغييرات بارشي در حوضه‌ي آبريز جازموريان روندی افزايشی در پيش گرفته و در برخي از اين سال‌ها (۲۰۰۸ و ۲۰۱۱) مقدار بارندگي ماهانه گاهي تا ۹۰ ميلي متر هم رسیده است. در سال ۲۰۱۲ بار ديگر بارش حوضه با کاهش مواجه گرديده و مقدار بارش ماهانه در هيچ يك از ماه‌هاي سال از ۳۰ ميلي متر فراتر نرفته است. در سال ۲۰۱۳ بارش در اين حوضه افزايش يافته و تا سال ۲۰۱۴ نيز تداوم داشته است. در سال ۲۰۱۵ مجدداً مقدار بارش حوضه رو به کاهش نهاده و اين شرايط تا انتهاي سال ۲۰۱۶ حاكم بوده است. در سه سال انتهايي دوره‌ي مورد مطالعه (۲۰۱۷-۲۰۱۹) وضعيت بارش از افت و خيزهائي برخوردار بوده؛ به طوري كه در ماه‌هاي مربوط به سال ۲۰۱۹ از شرايط بارشي نسبتاً خوبي برخوردار بوده است. به طور كلي سري زماني بارش در حوضه‌ي آبريز جازموريان داراي رفتار متفاوتی بوده است. با اين وجود؛ در سطح اطمینان ۹۵٪ روند خطی (افزايشی - کاهششی) در سري زماني آن مشاهده نشده است. ميانگين بارش سالانه در حوضه‌ي مورد مطالعه ۱۴۴ ميلي متر بوده است كه حدود ۱۱ سال از دوره‌ي



شكل ۴- سري زماني بارش ماهانه‌ي برآورد شده از داده‌هاي ماهواره‌ي GPM در حوضه‌ي آبريز جازموريان طی سال‌هاي ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Figure 4- Time series of monthly precipitation estimated from GPM satellite data in Jazmouriyan catchment from 2001 to 2019

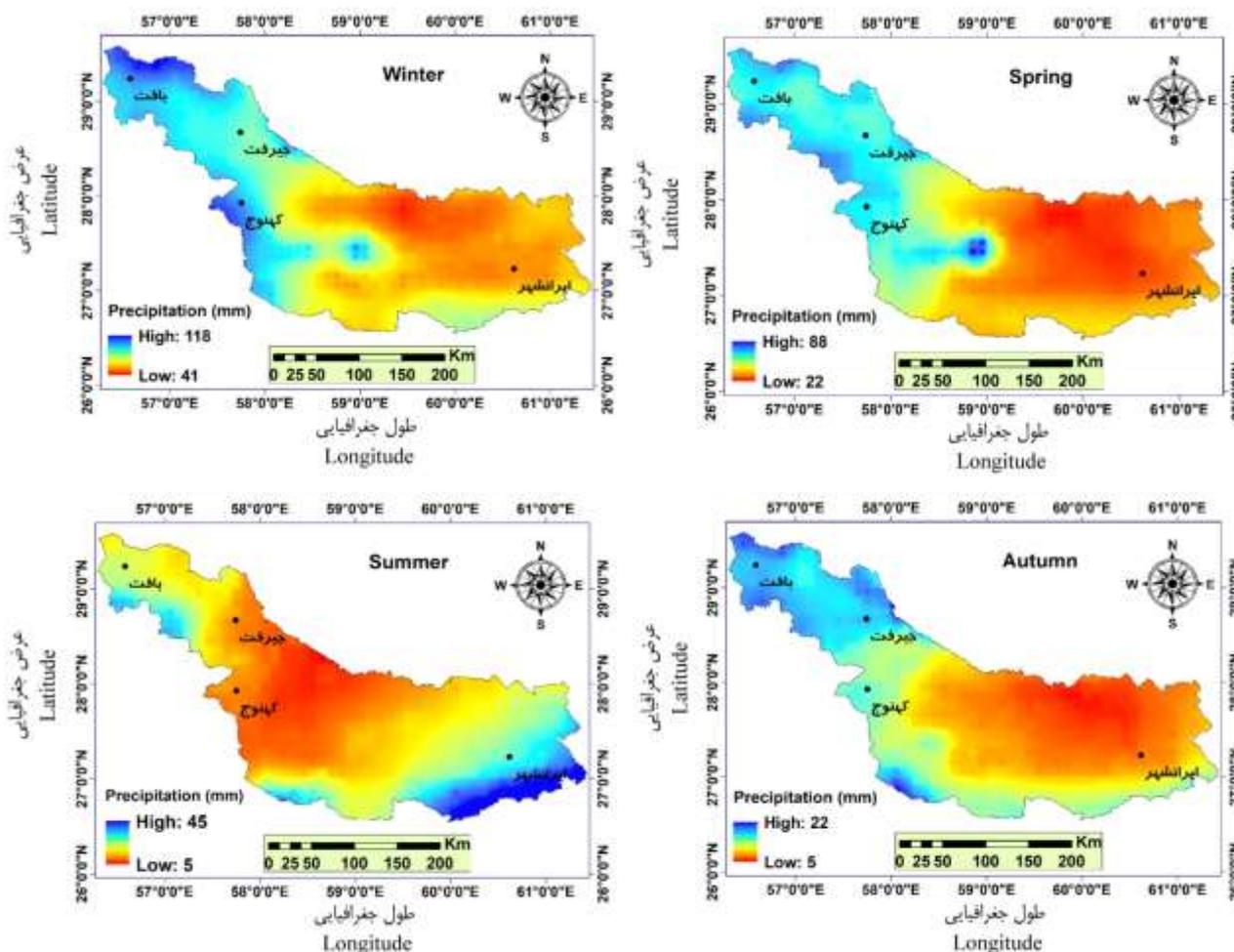


شکل ۵- مقدار بارش سالانه در حوضه‌ی آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Figure 5- The amount of annual rainfall in Jazmourian catchment from 2001 to 2019

شدت و گستره‌ی بارش مواجه شده است. علت اصلی کاهش بارش در این فصل را می‌توان به عقب نشینی الگوهای باران‌آور غربی نسبت داد که در این فصل از شدت فعالیت آن‌ها کاسته شده است. علاوه بر این؛ حاکمیت تدریجی سامانه‌ی پرفشار جنب حاره در این حوضه با جلوگیری از ورود سامانه‌های بارشی به این منطقه منجر به ایجاد جوی پایدار و خشک می‌گردد. با ورود به فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه و آگوست) مقادیر بارش با کاهش چشم‌گیری روبرو شده است. بیشینه‌ی بارش در این فصل ۴۵ میلی‌متر و کمینه‌ی آن نیز ۵ میلی‌متر است. نکته‌ی جالب توجه در این فصل جابجایی مکانی بیشینه‌های بارشی است؛ به طوری که بیشینه‌ی بارش در جنوب‌شرق حوضه قرار گرفته و در مقابل آن از شدت بارندگی فصول زمستان و بهار در بخش‌های شمالی حوضه به طور قابل توجهی کاسته شده است. علت اصلی بروز بیشینه‌ی بارش فصل تابستان در بخش‌های جنوب شرقی حوضه را می‌توان با جریانات مرطوب مونسون مرتبط دانست که با نفوذ از جنوب‌شرق کشور، شرایط را برای وقوع بارش بیشینه در این ناحیه فراهم می‌آورند. علاوه بر این؛ دو هسته‌ی بارشی دیگر نیز یکی در ارتفاعات شمال غربی و دیگری در ارتفاعات جنوب غربی حوضه (کوه‌های بشاگرد) مشاهده می‌شود. علت وجود این هسته‌های بارشی را می‌توان به اثرگذاری کوه‌ها در صعود هوای گرم و مرطوب و بارندگی همرفتی ناشی از آن نسبت داد که در فصل تابستان به طور معمول در این نواحی رخ می‌دهد.

در مورد علل توزیع فضایی بیشینه‌ی بارش در مناطق مذکور می‌توان به دو عامل یکی عوامل داخلی مانند ناهمواری‌ها و عرض جغرافیایی و دیگری نیز عوامل بیرونی یعنی اثرپذیری از الگوهای گردش جو اشاره کرد. به عبارت دیگر در نواحی مذکور از یک سو وجود کوه‌های مرتفع به خصوص در شمال حوضه به سبب صعود اجباری توده‌های هوایی، افزایش بارش را به دنبال دارد و از سوی دیگر نیز قرارگیری در عرض‌های شمالی‌تر و غربی‌تر سبب بهره‌مندی بیش‌تر از الگوهای جوی وارد شده به کشور می‌شود.

برای مثال شهر کهنوج با وجود قرارگیری در عرض جغرافیایی پایین‌تر نسبت به شهر جیرفت اما از یک سو به دلیل قرارگیری در موقعیتی غربی‌تر و متعاقب آن دارا بودن شانس بیش‌تری در بهره‌مندی از بارش توده‌های باران‌زای غربی و از سوی دیگر به سبب دسترسی بهتر از رطوبت خلیج فارس و دریای عمان، بارندگی بیش‌تری را از آن خود می‌نماید. همچنین مناطق شرقی حوضه در این فصل شانس کم‌تری در برخورداری از سامانه‌های بارشی ورودی را دارند؛ به طوری که میانگین بارش در این بخش از حوضه تا حدود ۴۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. توزیع فضایی مربوط به بارش فصل بهار (مارس، آوریل و می) حاکی از تفاوت‌های معنادار در بخش‌های مختلف این حوضه می‌باشد؛ به طوری که بیشینه‌ی بارش به ۸۸ میلی‌متر و کمینه‌ی آن به ۲۲ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۶). توزیع فضایی بارش در فصل بهار الگویی شبیه فصل زمستان را نشان می‌دهد؛ با این تفاوت که این فصل نسبت به زمستان با کاهش در



شکل ۶- توزیع فضایی بارش فصلی در حوضه آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Figure 6- Spatial distribution of seasonal rainfall in Jazmourian catchment from 2001 to 2019

از بالای کوهساری (اوروگرافیک) مؤثر دانست. علاوه بر این؛ در کمربند باریک جنوبی حوضه و به خصوص در جنوب غرب حوضه (کوه‌های بشاگرد) نیز در فصل پاییز بیشینه‌های بارشی مشاهده می‌شود که علت اصلی آن را می‌توان به بارش همرفتی ناشی از صعود هوای گرم و مرطوب سواحل جنوبی در برخورد با کوه‌های نسبتاً بلند این بخش از حوضه نسبت داد؛ چرا که در این فصل از سال توده‌های باران‌زای دوره سرد سال به ندرت مجال نفوذ به این منطقه را پیدا می‌کنند.

جهت بررسی رفتار فصلی بارش در طی سال‌های مورد مطالعه، نمودار سری زمانی فصلی در شکل ۷ ترسیم شده است. براساس این شکل در میان فصول چهارگانه، زمستان سال ۲۰۰۵ با میانگین بارش ۱۹۳ میلی‌متر دارای بیش‌ترین بارندگی فصلی در طول دوره مورد مطالعه بوده و کم‌ترین بارش این فصل نیز در سال ۲۰۱۸ به مقدار

همچنین، کم‌ترین مقدار بارش در این فصل در بخش مرکزی حوضه رخ داده است که با توجه به حاکمیت غالب هوای گرم و خشک متأثر از سامانه‌ی جنب حاره‌ی و همچنین ارتفاع کم این بخش از حوضه قابل توجیه می‌باشد. توزیع فضایی بارش فصل پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) نیز در شکل ۶ آمده است.

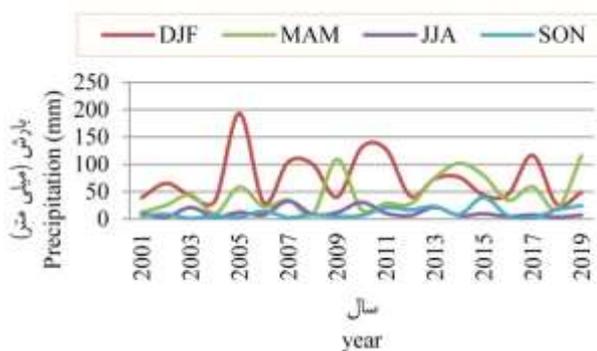
براساس این شکل مقادیر بارش این فصل با بیشینه‌ی ۲۲ میلی‌متر و کمینه‌ی ۵ میلی‌متر به عنوان خشک‌ترین فصل سال در حوضه‌ی آبریز جازموریان مشخص شده است. در این فصل بیشینه‌ی فضایی بارش همانند فصول زمستان و بهار در بخش‌های شمالی حوضه قرار دارد. زیرا در این فصل ورود تدریجی سامانه‌های باران‌زای دوره سرد سال (بادهای غربی) در ابتدا این بخش از حوضه را تحت سیطره‌ی بارش‌های خود قرار می‌دهند. همچنین، اثر کوه‌های مرتفع این بخش از حوضه را نیز می‌توان در رخداد بارش‌های همرفتی ناشی

در ماه فوریه با بیشینه‌ی ۶۵ میلی‌متر و کمینه‌ی ۱۹ میلی‌متر، افزایش قابل توجهی به ویژه در بیشینه‌ی بارش ملاحظه می‌شود. توزیع فضایی بارش در این ماه با گستردگی چشم‌گیری تا مرکز منطقه‌ی مورد مطالعه پیشروی کرده است که علت آن گسترش بیش‌تر بادهای غربی در انتقال رطوبت سامانه‌های مدیترانه‌ای و سودانی به این منطقه می‌باشد. حاکمیت چنین شرایطی باعث گردیده تا ماه فوریه از بیش‌ترین مقدار بارش در میان سایر ماه‌ها برخوردار باشد. ماه مارس با دامنه‌ی بارشی ۶۴-۱۶ میلی‌متر، همچنان به دلیل تداوم اثرگذاری الگوهای زمستانه، به عنوان دومین ماه پربارش در این حوضه می‌باشد. در این ماه، تمرکز فضایی بیشینه‌ی بارش در نیمه‌ی غربی حوضه می‌باشد. در حالی که شمال حوضه با وجود عرض جغرافیایی بالاتر و ارتفاع بیش‌تر، بارش کم‌تری را نسبت به بخش غربی حوضه نشان می‌دهد. در توجیه این وضعیت می‌توان گفت که بخش‌های غربی حوضه به دلیل موقعیت خاص مکانی، هم از بارش‌های سامانه‌های غربی و هم سامانه‌های جنوبی متأثر شده و در نتیجه امکان بیش‌تری برای دریافت بارش دارند. در ماه آوریل، کاهش چشم‌گیر مقادیر بارندگی و همچنین جابجایی کامل بیشینه‌های بارشی به نیمه‌ی شمالی حوضه، بیان‌گر کاهش نفوذ سامانه‌های غربی به عرض‌های جنوبی‌تر و شرقی‌تر می‌باشد. در این ماه، بیشینه‌ی بارش ۲۷ میلی‌متر و کمینه‌ی آن نیز به ۴ میلی‌متر رسیده است. در ماه می با عقب نشینی کامل الگوهای باران‌زای غربی، هسته‌های بارشی مرتبط با این عامل نیز در شمال حوضه تضعیف شده‌اند؛ به طوری که بیشینه‌ی بارش این ماه به ۸ میلی‌متر و کمینه‌ی آن نیز به ۱ میلی‌متر کاهش یافته است. با این وجود؛ هسته‌های بارشی در می نسبت به آوریل، به لحاظ فضایی تغییرات فاحشی را نشان می‌دهند؛ به طوری که هسته‌های مذکور در این ماه تنها در شمال شرق (کوه‌های جبال بارز) و جنوب شرق (کوه‌های مکران) حوضه واقع شده است.

۲۷ میلی‌متر رخ داده است. بعد از زمستان، فصل بهار به عنوان دومین فصل بارشی این حوضه می‌باشد که بیشینه‌ی بارش آن در دوره‌ی آماری مورد مطالعه در سال ۲۰۱۹ به مقدار ۱۱۶ میلی‌متر و کمینه‌ی آن نیز در سال ۲۰۰۸ به مقدار ۹ میلی‌متر بوده است. پاییز با بیشینه‌ی بارشی ۳۹ میلی‌متر در سال ۲۰۱۵ و کمینه‌ی ۱ میلی‌متر در سال ۲۰۰۳ به عنوان سومین فصل بارشی حوضه‌ی آبریز جازموریان می‌باشد. سرانجام فصل تابستان با بیشینه‌ی بارش ۳۰ میلی‌متر در سال ۲۰۰۷ و کمینه‌ی ۴ میلی‌متر در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۱۸ به عنوان کم‌بارش‌ترین فصل این حوضه مشخص شده است. به طور کلی، میانگین بارش فصلی طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه (۲۰۱۹-۲۰۰۱) برای فصل زمستان (DJF) ۷۳ میلی‌متر، بهار (MAM) ۴۷ میلی‌متر، تابستان (JJA) و پاییز (SON) نیز ۱۲ میلی‌متر برآورد شده است (شکل ۷).

توزیع ماهانه

شکل‌های ۸ و ۹ توزیع فضایی بارندگی ماهانه را در حوضه‌ی آبریز جازموریان نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۸، بارندگی ماه ژانویه در این حوضه در دامنه‌ای از ۴۱-۱۴ میلی‌متر گسترده شده و هسته‌های بیشینه‌ی بارش در سه منطقه‌ی شمال، غرب و ناحیه‌ی بسیار کوچکی در جنوب حوضه قرار دارد. دو هسته‌ی بارشی شمالی و غربی به دلیل موقعیت جغرافیایی آن‌هاست؛ زیرا قرارگیری این بخش از حوضه در عرض‌های بالاتر، امکان بهره‌مندی بیش‌تر از الگوهای بارش زمستانه را فراهم می‌آورد. در صورتی که مناطق شرقی‌تر به دلیل واقع شدن در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر و همچنین ارتفاع کم آن‌ها نسبت به سطح دریا، امکان چندان‌ی در بهره‌گیری از توده‌های باران‌زای غربی ندارند. در مورد هسته‌ی بارشی جنوب حوضه نیز می‌توان به نقش ارتفاعات این منطقه در شکل‌گیری سازوکار بارش ناشی از رطوبت برخوردی از کرانه‌ی ساحلی جنوب اشاره نمود.



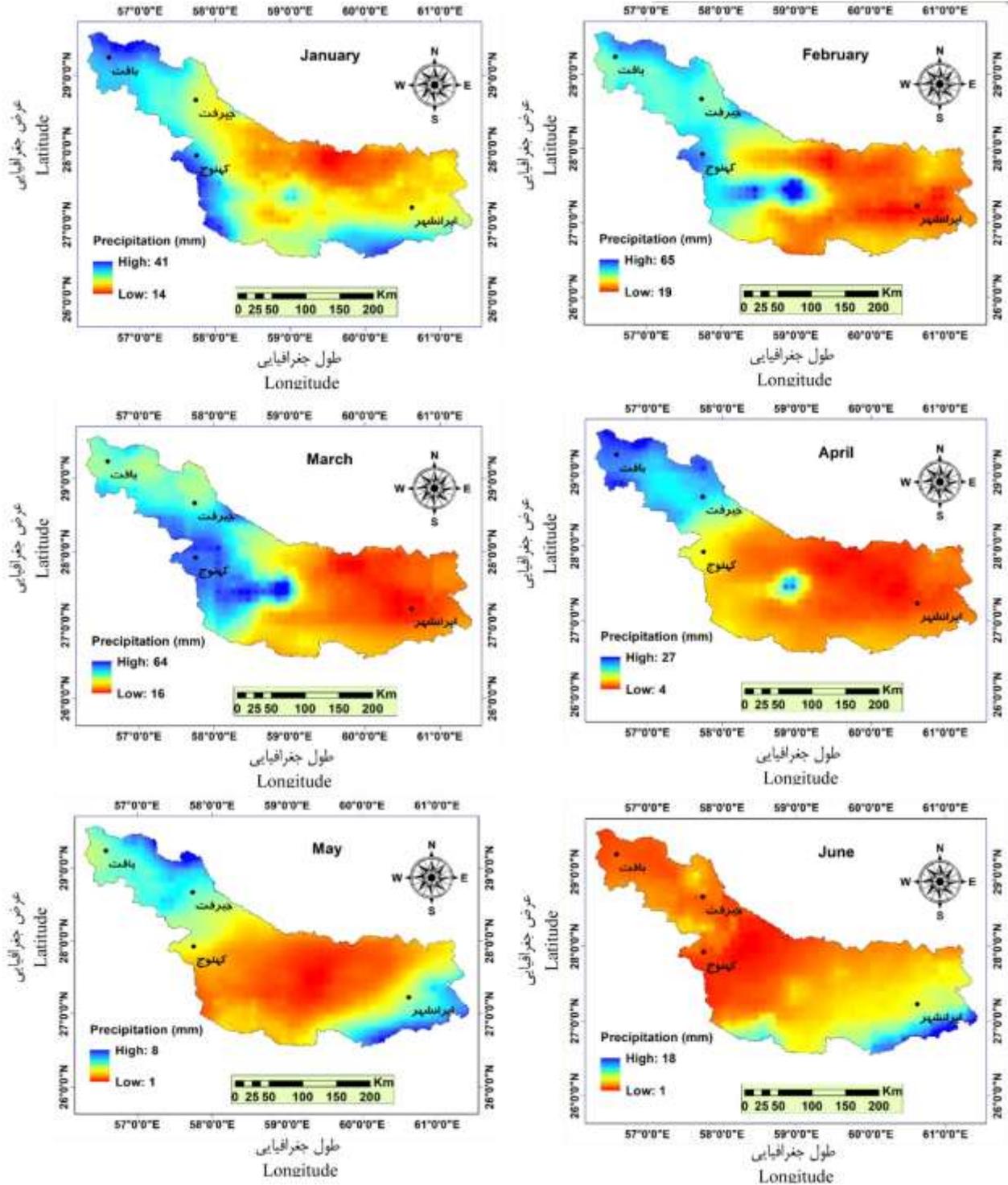
شکل ۷- سری زمانی و میانگین بارش فصلی در حوضه‌ی آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Figure 7- Time series and average seasonal rainfall in Jazmouriyan catchment from 2001 to 2019

علت اصلی این توزیع فضایی به وقوع بارش‌های همرفتی متأثر از نواحی مرتفع برمی‌گردد که گرمایش تدریجی سطح زمین منجر به صعود هوای نسبتاً مرطوب و رخداد بارندگی می‌شود. در ماه ژوئن با تقویت حاکمیت پرفشار جنب حاره و به دنبال آن عدم مهیایی شرایط مساعد برای صعود هوا، مقدار بارندگی بسیار کاهش یافته است. به طوری که بر اساس نقشه‌ی بارش مربوط به این ماه، شرایط کم‌بارشی در کل حوضه حاکم بوده است. با این وجود؛ بر مقادیر بیشینه‌ی بارندگی در ژوئن افزوده شده و به ۱۸ میلی‌متر رسیده است. با توجه به موقعیت مکانی هسته‌ی بیشینه‌ی بارش در جنوب‌شرق حوضه، علت اصلی آن را می‌توان از یک سو عامل بارندگی همرفتی و از سوی دیگر نفوذ مقطعی جریانات مرطوب مونسون در این ماه قلمداد کرد.

در ماه جولای مقادیر بارندگی با بیشینه‌ی ۱۸ میلی‌متر و کمینه‌ی ۲ میلی‌متر تقریباً مشابه ژوئن بوده و تغییرات خاصی را نشان نمی‌دهد. اما به لحاظ فضایی دو تغییر عمده در هسته‌ی بارش‌ها رخ داده است؛ تغییر اول مربوط به گسترش هسته‌ی بیشینه‌ی بارندگی در جنوب شرق حوضه است که با تقویت و نفوذ جریانات مونسون در این ماه، مناطق بیش‌تری از ناحیه‌ی مذکور را از بارش متأثر می‌نماید. تغییر برجسته‌ی دیگر در رخداد بارندگی این ماه، شکل‌گیری یک هسته‌ی بارشی جدید در شمال‌غرب حوضه است که علت آن را می‌توان به نقش ارتفاعات این ناحیه در صعود هوای گرم و مرطوب و وقوع بارش‌های موردی رگباری مرتبط دانست. در ماه آگوست مقادیر بیشینه‌ی بارندگی با ۱۱ میلی‌متر، نسبت به جولای کاهش یافته، در حالی که مقادیر کمینه‌ی بارش تغییر خاصی نداشته است. با این وجود؛ با تداوم گسترش جریانات مرطوب مونسون، تقریباً کل گستره‌ی جنوب‌شرق حوضه از بارش‌های مربوط به این سامانه برخوردار شده و به دنبال آن بیشینه‌ی بارش نیز در همین ناحیه اتفاق می‌افتد. نکته‌ی قابل توجه دیگر در مورد بارش این ماه، تقویت هسته‌ی بارشی واقع در جنوب‌غرب حوضه (کوه‌های بشاگرد) نسبت به ماه جولای می‌باشد. در ماه سپتامبر بارندگی در حوضه‌ی آبریز جازموریان با مقادیر ۵-۱ میلی‌متر، کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان داده و این ماه را به خشک‌ترین ماه در طول سال تبدیل نموده است. در این ماه به دلیل عقب نشینی جریانات مونسون و عدم اثرگذاری آن بر جنوب شرق حوضه، مقدار بارندگی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در حالی که در نیمه‌ی شمالی حوضه، گسترش بارندگی از ارتفاعات شمال‌غربی، بیان‌گر اثرگذاری تدریجی توده‌های غربی می‌باشد. مقادیر بارندگی در ماه اکتبر همانند سپتامبر بوده و تغییر خاصی را نشان نمی‌دهد. اما توزیع فضایی بارندگی در این ماه، به عنوان یکی از متنوع‌ترین ماه‌های سال می‌باشد؛ از آن جهت که در ماه مذکور تعدد

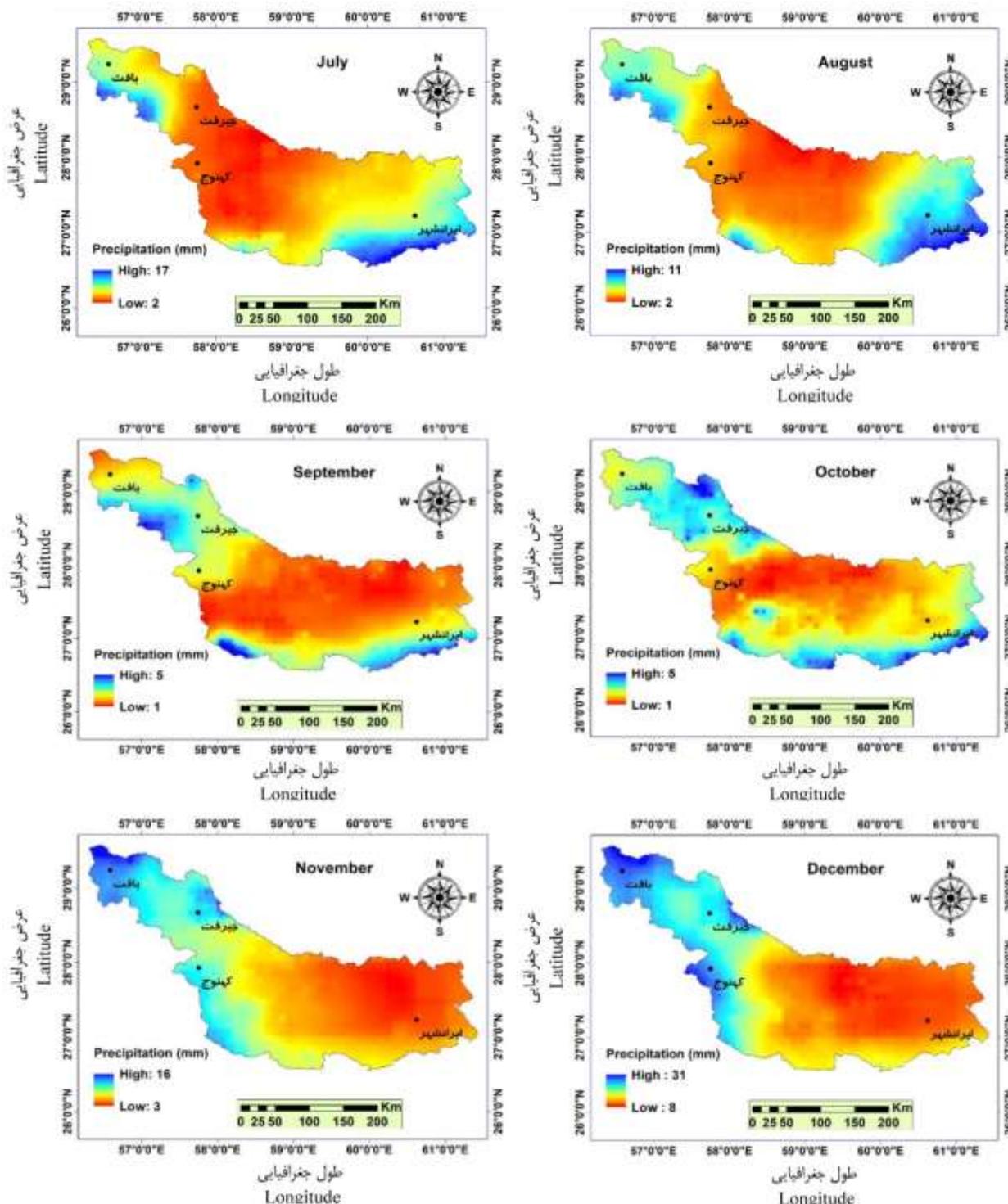
بیش‌تری از هسته‌های بارشی در غالب نقاط حوضه به چشم می‌خورد. به طور کلی در ماه اکتبر، غرب و شرق حوضه در مقایسه با سایر نواحی از احتمال کم‌تری برای بهره‌مندی از بارندگی برخوردار هستند. در حالی که در بخش‌های شمالی و جنوبی حوضه به دلیل وجود ارتفاعات بلند و همچنین شرایط حرارتی مناسب در سطح زمین، امکان رخداد بارندگی مهیاتر است. در این ماه به دلیل قرار داشتن در ابتدای فصل گذر و متعاقب آن عدم ثبات الگوهای گردش جو و سامانه‌های بارشی، تغییرات فضایی متنوعی نیز در مقادیر بارشی روی می‌دهد. مقدار بارندگی حوضه‌ی آبریز جازموریان در ماه نوامبر با بیشینه‌ی ۱۶ میلی‌متر و کمینه‌ی ۳ میلی‌متر نسبت به اکتبر با افزایش مواجه بوده است. به لحاظ توزیع فضایی بارندگی نیز تغییرات بارزی در این ماه مشاهده می‌شود؛ به طوری که هسته‌های بیشینه‌ی بارندگی به نیمه‌ی غربی و شمالی حوضه کشیده شده است. در تفسیر توزیع فضایی بیشینه‌ی بارندگی در این ماه می‌توان گفت؛ به علت حاکمیت غالب الگوهای پاییزی و به دنبال آن نفوذ تدریجی سامانه‌های بارشی به عرض‌های شمالی‌تر و غربی‌تر حوضه، هسته‌های بارش بیش‌تر نیز در این نواحی شکل گرفته است. در حالی که در بخش‌های مرکزی، جنوبی و شرقی حوضه به دلیل خنکی تدریجی هوا و متعاقب آن کاهش اثرگذاری گرمایش سطح زمین در بارندگی‌های همرفتی، مقدار بارش نیز به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. همچنین به دلیل واقع نشدن بخش‌های مذکور در مسیر سامانه‌های غربی، شانس چندانی جهت برخورداری از بارش ندارند. به طور کلی، بیشینه‌ی بارندگی ماه نوامبر در شمال و شمال‌شرق حوضه قرار دارد. ماه دسامبر به عنوان آخرین ماه فصل پاییز، همانند نوامبر با افزایش بارش مواجه شده است؛ به طوری که مقادیر بیشینه‌ی ۳۱ میلی‌متر و کمینه‌ی ۸ میلی‌متر، نمایان‌گر رشد قابل توجه بارندگی در ماه مذکور می‌باشد. به لحاظ توزیع فضایی بارش در ماه دسامبر، تنها تغییر برجسته در این ماه شکل‌گیری یک کمربند پیوسته‌ی بارشی در امتداد مرزهای غربی حوضه است که علت آن تأثیرگذاری بیش‌تر سامانه‌های بارش‌زای غربی در این بخش می‌باشد (شکل ۹).

جهت بررسی دقیق‌تر رفتار ماهانه‌ی بارش در حوضه‌ی مورد مطالعه، سری زمانی بارش تمام ماه‌ها در شکل ۱۰ ترسیم شده است. بر اساس مقادیر بارندگی مربوط به ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه (زمستان)، بیش‌ترین بارش ماهانه مربوط به فوریه ۲۰۱۱ (۹۴ میلی‌متر)، ژانویه ۲۰۰۹ (۹۲ میلی‌متر) و دسامبر ۲۰۰۴ (۷۷ میلی‌متر) و کم‌ترین رخداد بارش ماهانه مربوط به ژانویه ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ (۵ میلی‌متر)، دسامبر ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ (۲ میلی‌متر) و فوریه ۲۰۰۴ (۵ میلی‌متر) برآورد گردید.



شکل ۸- توزیع فضایی بارش ماهانه در حوضه‌ی آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹

Figure 8- Spatial distribution of monthly precipitation in Jazmourian catchment from 2001 to 2019



شکل ۸- توزیع فضایی بارش ماهانه در حوضه آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹

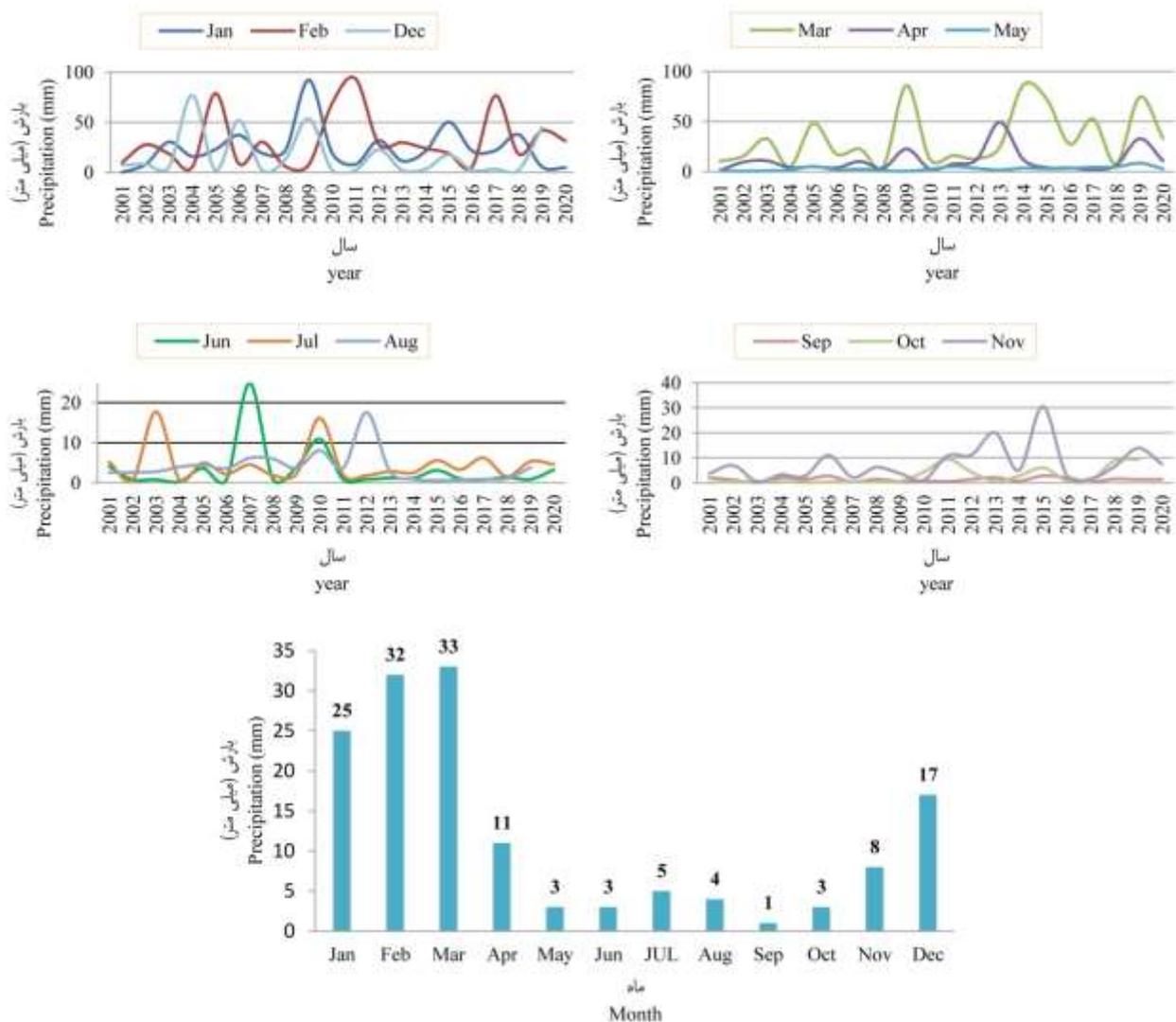
Figure 8- Spatial distribution of monthly precipitation in Jazmourian catchment from 2001 to 2019

آن مربوط به می ۲۰۰۲ (فاقد بارش)، آوریل ۲۰۰۱ (۱ میلی‌متر) و مارس ۲۰۰۸ (۵ میلی‌متر) بوده است. براساس سری زمانی، بارش در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست نسبت به ماه‌های قبل کاهش

همچنین براساس همین شکل، بیش‌ترین مقدار بارش ماه‌های مارس، آوریل و می مربوط به مارس ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ (۸۶ میلی‌متر)، آوریل ۲۰۱۳ (۴۹ میلی‌متر) و می ۲۰۰۸ (۸ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار

جولای بالاترین مقادیر بارش را در میان سه ماه مذکور به خود اختصاص داده است. علت رخداد این مقدار بارش در این موقع از سال، نفوذ جریان‌ات مرطوب موسمی به جنوب شرق ایران می‌باشد که در مسیر خود حوضه‌ی آبریز جازموریان را نیز متأثر از ریزش‌های خود می‌کند. علاوه بر این؛ بخشی از بارش‌های ماه‌های مذکور بر اثر رخداد بارش همرفتی متأثر از کوه‌های بلند در حوضه‌ی مذکور می‌باشد که با گرمایش سطح زمین و متعاقب آن صعود هوا، شرایط مساعدی برای رخداد بارش فراهم می‌شود. براساس شکل مربوط به سری زمانی بارش ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر، بارش در ماه‌های مذکور در مقایسه با ماه‌های قبل افزایش یافته است؛ به طوری که بیشینه‌ی آن در نوامبر ۲۰۱۵ به ۳۱ میلی‌متر رسیده است.

محسوسی را نشان می‌دهد؛ به طوری که بیشینه‌ی بارش در ماه‌های مذکور، ۲۵ میلی‌متر در ژوئن ۲۰۰۷ و همچنین ۱۸ میلی‌متر به ترتیب در جولای و آگوست سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۲ بوده است. علت بیشینه‌ی بارش در ژوئن سال ۲۰۰۷ مربوط به رخداد طوفان گونو می‌باشد که با نفوذ گسترده به بخش زیادی از این منطقه و بارش شدید، سبب ناهنجاری بارش در زمان مذکور شده است. با وجود این که مقدار بارش ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست چندان چشم‌گیر نیست اما با توجه به خشکی شدید هوا در غالب گستره‌ی ایران و متعاقب آن عدم رخداد بارش خاصی در این موقع از سال، ثبت این مقدار بارش در این حوضه در مقایسه با سایر نقاط کشور بارش قابل توجه می‌باشد. به طور کلی، صرف نظر از بارش سال ۲۰۰۷، ماه



شکل ۱۱- میانگین بارش ماهانه در حوضه‌ی آبریز جازموریان طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Figure 11- Average monthly rainfall in Jazmourian catchment from 2001 to 2019

برجسته‌ترین نکته در مورد سری زمانی بارش در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر تفاوت چشم‌گیر بارش ماه نوامبر نسبت به دو ماه دیگر است. علت اصلی این تفاوت را می‌توان به نفوذ بیش‌تر توده‌های باران‌زای غربی در افزایش بارش این ماه نسبت داد. در حالی که ماه‌های سپتامبر و اکتبر از یک سو به دلیل عقب‌نشینی الگوی مونسون و از سوی دیگر عدم نفوذ الگوهای بارشی پاییزی در این زمان، ریزش‌های کم‌تری را دریافت می‌نمایند. به طور کلی در میان تمامی ماه‌های مورد مطالعه، بیش‌ترین مقدار بارش مربوط به ماه مارس (۳۳ میلی‌متر) و کم‌ترین مقدار آن مربوط به ماه سپتامبر (۱ میلی‌متر) بوده است (شکل ۱۱). بررسی رفتار سری زمانی بارش ماهانه حاکی از افت و خیزهای زیادی در مقادیر بارش بوده است اما تحلیل روند سری زمانی مبتنی بر روش‌های آماری، فاقد معناداری روند بارش در تمامی ماه‌های سال بوده است.

نتیجه‌گیری

بارش به عنوان منبع تأمین‌کننده آب شیرین روی کره‌ی زمین، یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدرولوژیکی است که اهمیت آن در ادامه‌ی حیات جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی انکارناپذیر است. با توجه به تغییرات زیاد زمانی - فضایی بارش، مطالعه‌ی آن ضروری به نظر می‌رسد. اما یکی از چالش‌های اساسی برای مطالعه‌ی این پدیده، کمبود ایستگاه‌های زمینی و همچنین پراکنش نامناسب آن‌ها (به خصوص در نواحی مرتفع کوهستانی و دشت‌های بزرگ و پهناور) می‌باشد. با این وجود؛ امروزه با پیشرفت تکنولوژی و متعاقب آن علم سنجش از دور، طیف متنوعی از داده‌های ماهواره‌ای در دسترس محققان علوم محیطی قرار گرفته‌است. در همین راستا در تحقیق پیش رو با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM طی دوره‌ی آماری ۲۰۱۹-۲۰۰۱، به بررسی توزیع زمانی - فضایی بارش در حوضه‌ی آبریز جازموریان در جنوب‌شرق ایران پرداخته شده‌است. بر اساس نتایج به دست آمده، میانگین بارش در حوضه‌ی آبریز جازموریان ۱۴۴ میلی‌متر برآورد گردید که توزیع فضایی آن در دامنه‌ای از ۲۳۲-۸۳ میلی‌متر متغیر بوده‌است. بیشینه‌ی بارش در بخش‌های شمالی و غربی و کمینه‌ی آن نیز در نواحی مرکزی و شرقی حوضه رخ داده‌است. علاوه بر این؛ بر اساس توزیع سالانه‌ی بارش در طول دوره‌ی آماری مورد مطالعه، بیش‌ترین مقدار بارش مربوط به سال ۲۰۱۹ با ۲۳۹ میلی‌متر و کم‌ترین آن با ۵۳ میلی‌متر در سال ۲۰۰۱ بوده‌است. به لحاظ توزیع زمانی فصلی، زمستان و بهار به ترتیب با میانگین ۷۳ و ۴۷ میلی‌متر بیش‌ترین و پاییز و تابستان با میانگین ۱۲ میلی‌متر، کم‌ترین مقادیر بارش را نشان داده‌اند. همچنین

در طی دوره‌ی آماری مورد مطالعه، زمستان ۲۰۰۵ با ۱۹۳ میلی‌متر بیش‌ترین و پاییز ۲۰۰۳ نیز با ۱ میلی‌متر کم‌ترین بارش فصلی حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. علاوه بر این‌ها؛ نکته‌ی جالب توجه جابجایی مکانی هسته‌های پربارش در فصول مختلف سال است؛ به طوری که این هسته‌ها در فصول سرد سال در بخش‌های شمالی و غربی و در فصول گرم سال در نواحی جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی حوضه مشاهده شده‌اند. توزیع فضایی بارش ماهانه حاکی از رخداد بیش‌ترین میانگین بارش ماهانه در ماه‌های فوریه و مارس و کم‌ترین آن نیز در ماه‌های می و سپتامبر بوده‌است. همچنین، سری زمانی بارش ماهانه حاکی از رخداد بیشینه‌ی بارش در فوریه ۲۰۱۱ به مقدار (۹۴ میلی‌متر) و کمینه‌ی آن در ژانویه ۲۰۰۱ (فاقد بارش) بوده است. به طور کلی، تغییرپذیری بالای بارش این حوضه در ماه‌ها و فصول مختلف سال، حاکمیت اقلیم خشک و کم‌بارش را در این حوضه نشان می‌دهد. بنابراین، با توجه به وضعیت بارش و نوسانات زیاد آن تحت شرایط تغییر اقلیم، به طور حتم در آینده‌ی نزدیک این حوضه در مدیریت منابع آبی و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی با چالش‌ها و بحران‌های جدی روبرو خواهد شد. داده‌های ماهواره‌ی GPM مورد استفاده در این پژوهش، نتایج مناسب و مورد انتظاری از توزیع زمانی - فضایی بارش در حوضه‌ی آبریز جازموریان فراهم آورده و همبستگی بسیار خوبی با یافته‌های حاصل از داده‌های بارش ایستگاهی نشان داده‌است. همچنین پژوهش‌هایی در سال ۲۰۱۷ در سنگاپور (Tan and Duan, 2017) و همچنین بولیوی (Stage et al., 2017)، ضمن تأیید عملکرد مناسب داده‌های بارشی ماهواره‌ی GPM در قیاس با TRMM، استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM را جهت برآورد بارش پیشنهاد داده‌اند. علاوه بر این‌ها؛ نتایج پژوهش مذکور با یافته‌های (Chavoshian and Katirae-Boroujerdy, 2019) که به بررسی بارش ایران با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی GPM پرداختند مطابقت داشته است. آنان نیز نتایج حاصل از خروجی‌های این ماهواره را در مقایسه با سایر ماهواره‌ها قابل اعتمادتر دانسته و استفاده از آن‌ها را برای نواحی هموار پیشنهاد داده‌اند. به طور کلی، موارد اشاره شده و همچنین پوشش فضایی نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی و خلأ آماری زیاد آن‌ها در چنین حوضه‌ی نسبتاً گسترده‌ای، استفاده از این داده‌های ماهواره‌ی ارزشمند و مفید را قابل توجیه می‌سازد. با این وجود؛ پیشنهاد می‌شود داده‌های مذکور در مطالعات متعددی بر روی نواحی مختلف ایران به کار گرفته شده و نتایج آن‌ها بیش‌تر مورد ارزیابی قرار گیرد.

1. Afshin Y. 2004. Rivers of Iran. Tehran. (In Persian with English abstract)
2. Alexakis D.D., and Tsanis I.K. 2016. Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for downscaling TRMM precipitation products using MODIS data. *Environmental Earth Sciences* 75(14): 1077.
3. Ali bakhshi S.M., Farid Hosseiniy A.R., Davari K., Alizadeh A., and Monika H. 2017. Statistical comparison between products IMERG and TMPA 3B42V7 in the level of three precipitation data GPM and TRMM (Case study: Kashafrud catchment, Khorasan Razavi province). *Rangeland and Watershed Management, Journal of Natural Resources* 69(4): 963-981. (In Persian with English abstract)
4. Ali bakhshi S.M., Farid Hosseiniy A.R., Davari K., Alizadeh A., and Monika H. 2018. Assessment of Ground Station, GPM Satellite and MERRA Precipitation Products in Kashafrud Basin. *Journal of Watershed Management Research* 10(18): 111-122. (In Persian with English abstract)
5. Cannon F., Hecht C.W., Cordeira J.M., and Ralph F.M. 2018. Synoptic and mesoscale forcing of Southern California extreme precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123(24): 13-714.
6. Chavoshian A., and Katiraie-Boroujerdy P.S. 2019. Evaluation and application of different observational (land and satellite) datasets over Iran. *Journal of Water and Soil* 33(3): 501-520. (In Persian with English abstract)
7. Crochet P., Jóhannesson T., Jónsson T., Sigurðsson O., Björnsson H., Pálsson F., and Barstad I. 2007. Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *Journal of Hydrometeorology* 8(6): 1285-306.
8. Dobson A.P., Bradshaw A.D., and Baker A.A. 1997. Hopes for the future: restoration ecology and conservation biology. *Science* 277(5325): 515-22.
9. Emami H., Salajegheh A., Moghadamniya A.R., and Khalighiy Sigaroodi S.H. 2020. Accuracy and efficiency of TRMM satellite in estimating monthly precipitation in Gorganrood watershed. *Journal of Ecohydrology* 7(3): 719-729. (In Persian with English abstract) [10.22059/IJE.2020.261641.917](https://doi.org/10.22059/IJE.2020.261641.917).
10. Fooladi M., Mahdavi Najafabadi R., Rezaie M., and Moslemi H. 2020. Development of Jazmourian wetland management strategies with emphasis on water resources using SWOT models and WASPAS. *Journal of Ecohydrology* 7(1): 165-182. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22059/ije.2020.291492.1231>.
11. Habibi F. 2001. Investigating the effects of Indian Manson on Iran. *Geographical Research* 39: 29-445. (In Persian with English abstract)
12. Halabian A.H. 2016. Evaluation of spatial-temporal changes the precipitation in Iran. *Journal of Engineering Ecosystem Desert* 5(13): 101-116. (In Persian with English abstract)
13. Hovmöller E. 1949. The trough-and-ridge diagram. *Tellus* 1(2): 62-66.
14. Huffman G.J., Bolvin D.T., and Nelkin E.J., Day 1 IMERG final run release notes. 2015. NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center: Greenbelt, MD, USA.
15. Junzhi L., Xing Z.A., and Zheng D. 2012. Evaluation of TRMM 3B42 precipitation product using rain gauge data in Meichuan Watershed, Poyang Lake basin, China. *Journal of Resources and Ecology* 3(4): 359-66.
16. Iguchi T., Seto S., Meneghini R., Yoshida N., Awaka J., Le M., Chandrasekar V., and Kubota T. 2020. GPM/DPR level-2 algorithm theoretical basis document. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, Tech. Rep.
17. Kiani M., Lashkari H., and Ghaemi H. 2020. Statistical - Synoptic Analysis of the Extreme Precipitation in Western Iran. *Geography and Sustainability of Environment* 33: 17-38. (In Persian with English abstract)
18. Kirschbaum D.B., Huffman G.J., Adler R.F., Braun S., Garrett K., Jones E., McNally A., Skofronick-Jackson G., Stocker E., Wu H., and Zaitchik B.F. 2017. NASA's remotely sensed precipitation: A reservoir for applications users. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(6): 1169-84. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00296.1>.
19. Li G., Yu Z., Wang W., Ju Q., and Chen X. 2021. Analysis of the spatial Distribution of precipitation and topography with GPM data in the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research* 247: 105259. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105259>.
20. Lussana C., Nipen T.N., Seierstad I.A., and Elo C.A. 2021. Ensemble-based statistical interpolation with Gaussian anamorphosis for the spatial analysis of precipitation. *Nonlinear Processes in Geophysics* 28(1): 61-91. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00296.1>.
21. Maussion F., Scherer D., Mölg T., Collier E., Curio J., and Finkelnburg R., 2014. Precipitation seasonality and variability over the Tibetan Plateau as resolved by the High Asia Reanalysis. *Journal of Climate* 27(5): 1910-27. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00282.1>.
22. Negaresh H., and Khosravi M. 1998. *Principal of Geomorfology Iran*. Zahedan: University of Sistan and

- Baluchestan.
23. Pashaei A. 2004. Deserts of Iran and its Paleoclimatological Characteristics. Crinsley D, Publications of the Geographical Organization of the Ministry of Defense and Support of the Armed Forces.
 24. Poorzaydi A.M., Alijani B., Saligheh M., and Gerami M.S. 2019. Spatial analysis of precipitation in Mazandaran province. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences* 19(52): 1-20. (In Persian with English abstract)
 25. Qin Y., Chen Z., Shen Y., Zhang S., and Shi R. 2014. Evaluation of satellite rainfall estimates over the Chinese Mainland. *Remote Sensing* 6(11): 11649-72.
 26. Rahimi D., Khoshhal J., and Alizadeh T. 2010. Statistical-synoptic analysis of heavy rainfall in arid regions of Iran (Case study: Kerman province). *Journal of Geography and Regional Development* 8(14): 51-69. (In Persian with English abstract)
 27. Rousta I., Karampour M., Doostkamian M., Olafsson H., Zhang H., Mushore TD., Karimvandi AS., and Vargas E.R. 2020. Synoptic-dynamic analysis of extreme precipitation in Karoun River Basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13(2): 1-6. (In Persian with English abstract)
 28. Sadeghi H.R., Masoompour Samakosh J., and Miri M. 2019. The Evaluation of GPM Precipitation Remote Sensing Data with Observed Data (Case Study: Mid-West of Iran). *Iranian Remote Sensing & GIS* 11(2): 115-126. (In Persian with English abstract)
 29. Sanjari S., Farpoor M.H., Mahmoodabadi M., and Barkhori S. 2020. Comparison of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in classification of soils in Iranshahr and Dalgan Regions, Sistan and Baluchestan Province. *Journal of Water and Soil* 35(3): 1081-1091. (In Persian with English abstract)
 30. Satgé F., Xavier A., Pillco Zolá R., Hussain Y., Timouk F., Garnier J., and Bonnet M.P. 2017. Comparative assessments of the latest GPM mission's spatially enhanced satellite rainfall products over the main Bolivian watersheds. *Remote Sensing* 9(4): 369. <https://doi.org/10.3390/rs9040369>.
 31. Sharifi E., Steinacker R., and Saghafian B. 2016. Assessment of GPM-IMERG and other precipitation products against gauge data under different topographic and climatic conditions in Iran: Preliminary results. *Remote Sensing* 8(2): 135. (In Persian with English abstract)
 32. Shokri Koochak S., Akhond Ali., A.M., and Sharifey M. 2020. Performance evaluation of PERSIANN and CDR-PERSIANN satellite precipitation algorithms and evaluation of the effect Roughness on it (Case study: Helle catchment, Iran). *Journal of Ecohydrology* 7(2): 511-527. (In Persian with English abstract)
 33. Skofronick-Jackson G., Petersen W.A., Berg W., Kidd C., Stocker E.F., Kirschbaum DB., Kakar R., Braun S.A., Huffman G.J., Iguchi T., Kirstetter P.E. 2017. The Global Precipitation Measurement (GPM) mission for science and society. *Bulletin of the American Meteorological Society* 98(8): 1679-95.
 34. Tan M.L., and Duan Z. 2017. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. *Remote Sensing* 9(7): 720.
 35. Tang G., Clark M.P., Papalexiou S.M., Ma Z., and Hong Y. 2020. Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote sensing of environment* 240: 111697. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>.
 36. Tongal H. 2019. Spatiotemporal analysis of precipitation and extreme indices in the Antalya Basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* 138(3): 1735-54. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02927-4>.
 37. Vélez A., Martin-Vide J., Royé D., and Santaella O. 2019. Spatial analysis of daily precipitation concentration in Puerto Rico. *Theoretical and Applied Climatology* 136(3): 1347-55. DOI: [10.1007/s00704-018-2550-1](https://doi.org/10.1007/s00704-018-2550-1).
 38. Verma M.K., Verma M.K., and Swain S. 2016. Statistical analysis of precipitation over Seonath river basin, Chhattisgarh, India. *International Journal of Applied Engineering Research* 11(4): 2417-23.
 39. Villarini G., and Krajewski W.F. 2008. Empirically-based modeling of spatial sampling uncertainties associated with rainfall measurements by rain gauges. *Advances in Water Resources* 31 (7): 1015-23. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.04.007>.
 40. Wang Z., Zhong R., Lai C., and Chen J. 2017. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmospheric Research* 196: 151-63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020>.
 41. Yarahmadi D., Halimi M., and Zareiy Chaghbalky Z. 2015. Spatial analysis of monthly precipitation in northwestern Iran using spatial autocorrelation statistics. *Journal of Natural Geography Researches* 47(3): 451-464. (In Persian with English abstract).
 42. Yatagai A., Kamiguchi K., Arakawa O., Hamada A., Yasutomi N., and Kitoh A. 2012. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(9): 1401-15. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00122.1>.
 43. Yong B., Hong Y., Ren L.L., Gourley J.J., Huffman G.J., Chen X., Wang W., and Khan S.I. 2012. Assessment of evolving TRMM-based multisatellite real-time precipitation estimation methods and their impacts on hydrologic

- prediction in a high latitude basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D9). <https://doi.org/10.1029/2011JD017069>.
44. Yong B., Liu D., Gourley J.J., Tian Y., Huffman G.J., Ren L., and Hong Y. 2015. Global view of real-time TRMM multisatellite precipitation analysis: Implications for its successor global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(2): 283-96.
45. Yuan F., Wang B., Shi C., Cui W., Zhao C., Liu Y., Ren L., Zhang L., Zhu Y., Chen T., and Jiang S. 2018. Evaluation of hydrological utility of IMERG Final run V05 and TMPA 3B42V7 satellite precipitation products in the Yellow River source region, China. *Journal of hydrology* 567: 696-711. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.045>.

Contents

Evapotranspiration Estimation at Landscape Scale by WUCOLS, PF and IPOS Methods (Karaj)	1
Z. Sojoodi, H. Shokati, Y. Sojoodi, M. Mashal	
Assessment the Performance of IHACRES Model Using ARMAX and EXPUH Linear Methods (Case Study: Shoor River Basin in Ghaen)	17
M. Fouladi Nasrabad- M. Amirabadizadeh- M. Pourreza Bilondi- M. Yaghoobzadeh	
Simulation of Groundwater Balance Using Integrated Surface and Groundwater SWAT-MODFLOW-NWT Model (Case Study: Mahabad Plain)	31
O. Raja, M. Parsinejad, M. Tajrishy	
Effect of Bacterial Surfactant along with Application of Chelators on Soluble Cadmium in a Calcareous Soil	53
S. Arabteymori, A. Halajnia, A. Lakzian, F. Nikbin	
Interactive Effects of Pb (NO), Biochar and Salicylic acid on Growth Characteristics of Thyme (<i>Thymus vulgaris</i> L.)	67
B. Rezaei, A.A. Amirinejad, M. Ghobadi	
The Effect of Mycorrhizae Symbiosis on Nutrient Concentration in Common Almond (<i>Prunus dulcis</i> Mill.) Rootstocks in Drought Stress Condition	81
M. Mohammadi	
Evaluating the Role of Different Management Systems on Soil Quality Index Using Crop Yield (Case Study: Neyshabour Plain, Iran)	95
F. Maghami Moghim, A. Karimi*, M. Bagheri Bodaghabadi, H. Emami	
Effect of Organic and Chemical Conditioners on Aggregate Stability, Least Limiting Water Range and Integral Water Capacity under Wheat Cultivation in Saline Soils	113
A. Nosrati Miandoab, H. Emami, A.R. Astaraei, M.R. Mosaddeghi, H. Asgarzadeh	
Spring Frost Early Warning for Apple Orchards Using WRF Model	127
S.M. Ebnehejazi, H. Yazdanpanah, S. Movahedi, M.A. Nasr-Esfahani, M. Moradzadeh	
Spatiotemporal Estimation of Precipitation Using GPM Satellite Data in Jazmourian Catchment	145
K. Raispour, B. Salahi, B. Abad	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36

No. 1

2022

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
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani,R	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
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	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).