



- شبیه‌سازی جریان و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک ۴۴۷
فرزانه ناصری- محمود آذری- محمد تقی دستورانی
- اعتبارسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم متأثر از تعداد نوبت‌های آبیاری ۴۶۳
محمدرضا امداد- آرش تافته- سعید غالی
- بررسی تغییرات شوری پروفیل خاک چهار محصول زراعی دشت قزوین تحت آبیاری تیپ با مدل AquaCrop ۴۷۵
هادی رمضانی اعتدالی- مریم پاشازاده- بیژن نظری- عباس ستوده‌نیا- عباس کاویانی
- ارزیابی تأثیر شوری آب آبیاری و تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌گیلاسی ۴۸۹
جواد رمضانی مقدم- یاسر حسینی- محمدرضا نیک‌پور- عطیه عبدلی
- بررسی اثر کم‌آبیاری بخشی ریشه در دوره‌های آبیاری مختلف بر کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان ۵۰۱
مجتبی چراغی زاده- علی شاهنظری- میرحاج قاضی‌آبادی
- تأثیر کادمیم بر صفات رویشی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تربچه نقلی (*Raphanus sativus* L.) ۵۱۷
کاظم دالوندگامی- سیدعبدالله افتخاری
- بررسی جذب زیستی کادمیم (II) از محیط آبی به‌وسیله زیست توده اصلاح شده سراتوفیلوم دمرسوم ۵۳۱
حسین شکری پور- منا گلایی- هادی معاضد- نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد
- تأثیر کاربرد برخی اسیدهای آلی بر ویژگی‌های رشدی و غلظت عناصر غذایی ذرت علوفه‌ای ۵۴۷
اکبر حسینی- مریم اعتمادیان- مهدی نورزاده حداد- مهرداد حقیقی‌ئی
- تلقیح باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، هدایت ریزش‌های و شاخص کلروفیل ذرت در شرایط کمبود پتاسیم ۵۵۹
مهدیه لیلایی مرنده- محمدرضا ساریخانی
- اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک ۵۷۳
بهناز آتش‌پز- سالار رضایپور- نادر قائمیان
- اثر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیوشیمیایی و زیستی خاک منطقه سروک، شهرستان یاسوج ۵۸۷
فاطمه مهماندوست- حمیدرضا اولیایی- ابراهیم ادهمی- رضا نقی‌ها
- امکان‌سنجی استفاده از AgMERRA برای پرکردن خلأ داده‌های بارندگی و دما در ایستگاه‌های سینوپتیک افغانستان ۶۰۱
احمدرضا رضوی- مهدی نصیری محلاتی- علیرضا کوچکی- علیرضا بهشتی
- اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر- تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران) ۶۱۷
یعقوب دین‌پژوه- معصومه فروغی
- پیش‌بینی رواناب سالانه سد زاینده‌رود و دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شبکه‌های بیزین ۶۳۳
پریسا نوبه- عباس روزبهانی- حمید کردان مقدم

Contents

- Simulation of Stream Flow and Sediment Yield in Fariman Dam Watershed Using SWAT Model and Genetic Algorithm 462
F. Naseri - M. Azari- M.T. Dastoorani
- Validation of Aquacrop Model for Simulating Wheat Yield in Different Irrigation Events 473
M. R. Emdad - A. Tafteh - S. Ghalebi
- Study of Salinity Changes in Soil Profile of Four Agricultural Crops in Qazvin Plain under Drip-Tape Irrigation with AquaCrop Model 487
H. Ramezani Etedali - M. Pashazadeh- B. Nazari- A. Sotoudehnia- A. Kaviani
- Evaluation the Effects of the Irrigation Water Salinity and Water Stress on Yield Components of Cherry Tomato 500
J. Ramezani Moghaddam - Y. Hosseini- M. R. Nikpour- A. Abdoli
- Investigating the Effect of Partial Root Zone Drying (PRD) Deficit Irrigation at Different Irrigation Intervals on Water Use Efficiency and Growth Parameters of Sunflower Plant 516
M. Cheraghizade - A. Shahnazari - M. Kh. Ziatabar Ahmadi
- Effect of Cadmium on Vegetative Traits, Physiological and Biochemical Indexes of Radish (*Raphanus sativus* L.) 529
K. Dalvand Gomari - S.A. Eftekhari
- Evaluation Biosorption of Cadmium (II) from Aqueous Solution by Modified *Ceratophyllum demersum* L. 545
H. Shokripour - M. Golabi- H. Moazed- N. Jaafarzadeh Haghighi Fard
- Application Effects of Organic Acids on Growth of Forage Corn and Concentration of Nutritional Elements in Shoots and Roots 558
A. Hassani - M. Etemadian - M. Nourzadeh Haddad - M. Hanifei
- Inoculation of Plant Growth Promoting Bacteria on Yield, Stomatal Conductance and Chlorophyll Index of Corn under Potassium Deficiency 572
M. Leylasi Marand - M.R. Sarikhani
- Effects of Treated Wastewater Irrigation on Heavy Metals Concentration, Distribution and Contamination of Soil 585
B. Atashpaz - S. Rezapour - N. Ghaemian
- Effect of Land Use Change on some Physicochemical and Biological Properties of the Soils of Servak Plain, Yasouj Region 599
F. Mehmandoost - H.R. Owlaiie - E. Adhami- R. Naghiha
- Applicability of AgMERRA for Gap-Filling of Afghanistan *in-situ* Temperature and Precipitation Data 616
A. R. Razavi - M. Nassiri Mahallati- A. Koochechi- A. Beheshti
- Impact of Climate Change on Sudden Changes in Potential Evapotranspiration Time Series (Case Study: NW of Iran) 632
Y. Dinpashoh - M. Foroughi
- Prediction of Zayandeh Rood Dam Inflow and Hydrological Wet and Dry Periods Using Bayesian Networks 646
P. Noorbeh - A. Roozbahani - H. Kardan Moghaddam

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 32 شماره 3 مرداد - شهریور ماه سال 1397

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

آستارائی، علیرضا

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

ثنائی نژاد، سید حسین

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

خرمالی، فرهاد

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

علیزاده، امین

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

قائمی، علی اصغر

دانشیار - آبیاری و زهکشی (دانشگاه شیراز)

کمالی، غلامعلی

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

کیانی، علیرضا

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

لکزیان، امیر

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

مساعدی، ابوالفضل

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

مهدیان، محمد حسین

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

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

چاپ: چاپخانه دانشگاه فردوسی مشهد

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

این نشریه در پایگاههای زیر نمایه شده است:

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 447 شبیه‌سازی جریان و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک
فرزانه ناصری - محمود آذری - محمد تقی دستورانی
- 463 اعتبارسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم متأثر از تعداد نوبت‌های آبیاری
محمدرضا امداد - آرش تافته - سعید غالبی
- 475 بررسی تغییرات شوری پروفیل خاک چهار محصول زراعی دشت قزوین تحت آبیاری تیپ با مدل AquaCrop
هادی رمضانی اعتدالی - مریم پاشازاده - بیژن نظری - عباس ستوده‌نیا - عباس کاویانی
- 489 ارزیابی تأثیر شوری آب آبیاری و تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌گیلاسی
جواد رمضانی مقدم - یاسر حسینی - محمدرضا نیک‌پور - عطیه عبدلی
- 501 بررسی اثر کم‌آبیاری بخشی ریشه در دوره‌های آبیاری مختلف بر کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان
مجتبی چراغی زاده - علی شاهنظری - میرخالق ضیاءتباراحمدی
- 517 تأثیر کادمیم بر صفات رویشی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تربچه نقلی (*Raphanus sativus* L.)
کلثوم دالوندگماری - سیدعبدالله افتخاری
- 531 بررسی جذب زیستی کادمیم (II) از محیط آبی به‌وسیله زیست توده اصلاح شده *سراتوفیلیوم دمرسوم*
(*Ceratophyllum demersum* L.)
حسین شکری پور - منا گلابی - هادی معاضد - نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد
- 547 تأثیر کاربرد برخی اسیدهای آلی بر ویژگی‌های رشدی و غلظت عناصر غذایی ذرت علوفه‌ای
اکبر حسنی - مریم اعتمادیان - مهدی نورزاده حداد - مهرداد حنیفه‌ئی
- 559 تلقیح باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، هدایت روزه‌ای و شاخص کلروفیل ذرت در شرایط کمبود پتاسیم
مهدیه لیلاسی مرند - محمدرضا ساریخانی
- 573 اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک
بهناز آتش پز - سالار رضاپور - نادر قائمیان
- 587 اثر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی‌وشیمیایی و زیستی خاک منطقه سروک، شهرستان یاسوج
فاطمه مهماندوست - حمیدرضا اولیایی - ابراهیم ادهمی - رضا نقی‌ها
- 601 امکان‌سنجی استفاده از AgMERRA برای پرکردن خلأ داده‌های بارندگی و دما در ایستگاه‌های سینوپتیک افغانستان
احمدرضا رضوی - مهدی نصیری محلاتی - علیرضا کوچکی - علیرضا بهشتی
- 617 اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر - تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)
یعقوب دین‌پژوه - معصومه فروغی
- 633 پیش‌بینی رواناب سالانه سد زاینده‌رود و دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شبکه‌های بیزین
پریسا نوبه - عباس روزبهانی - حمید کاردان مقدم



شبیه‌سازی جریان و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم ژنتیک

فرزانه ناصری^۱ - محمود آذری^{۲*} - محمد تقی دستورانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۲۷

چکیده

تعیین مقدار رسوب حوضه و توزیع مکانی آن با اندازه‌گیری‌های میدانی در عمل با چالش جدی مواجه است. از این رو، مدل‌های مختلف، به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش خاک و برآورد رسوب استفاده می‌شود. مدل SWAT یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی است که در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای داشته است؛ اما شبیه‌سازی رسوب این مدل نسبت به دبی جریان با خطای زیادی همراه می‌باشد که بخشی از آن به دلیل استفاده از روش‌های تجربی هم‌چون منحنی سنج رسوب برای برآورد رسوب می‌باشد. از این رو، در این تحقیق برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه سد فریمان از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی رابطه دبی - رسوب استفاده گردید. بدین منظور مسئله بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به‌صورت یک فضای جستجو از مقادیر پیوسته ضرایب رابطه دبی - رسوب، در نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد و ضرایب بهینه تعیین گردید. نتایج تحقیق، عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک در برآورد رسوب با ضریب نش - ساتکلیف ۰/۴۶، ضریب تعیین ۰/۷۲ و ریشه میانگین مربعات خطا ۷۰/۹ نسبت به منحنی سنج را نشان می‌دهد. از این رو داده‌های حاصل از این روش برای آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده گردید. در ارزیابی مدل، ضریب نش ساتکلیف دبی ماهانه برای دوره ۷ ساله واسنجی و دوره ۳ ساله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۵ و برای رسوب ماهانه به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۶ به دست آمد. نتایج تحقیق بیانگر کارایی خوب مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب و رسوب می‌باشد، همچنین استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی رابطه دبی - رسوب نقش مهمی در تعیین مقادیر رسوب و دقت شبیه‌سازی مدل داشته است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تکاملی، بهینه‌سازی، رسوب‌دهی، شبیه‌سازی آبخیز، منحنی سنج

مقدمه

وضعیت رسوب حوضه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است که در عمل با چالش جدی مواجه است از این رو در تحقیقات انجام شده از مدل‌های مختلف به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش خاک و برآورد رسوب استفاده می‌شود که هر یک از این مدل‌ها با ساده‌سازی سیستم آبخیز، فرایندها را در قالب مجموعه‌ای از روابط و معادلات ریاضی بیان می‌کند. مدل‌های ریاضی با بهره‌گیری از قوانین و مبانی فیزیکی مانند اصل بقای ماده و انرژی قابلیت بررسی اثر اقدامات مدیریتی و پیش‌بینی اثرات سناریوهای مختلف مدیریت حوضه بر بار رسوب را دارا می‌باشند. مدل‌های هیدرولوژیکی متعددی با هدف شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه مورد استفاده قرار گرفته است اما دامنه کاربرد مدل هیدرولوژیکی نیمه‌فیزیکی و نیمه‌توزیعی SWAT^۴ به مراتب وسیع‌تر از سایر مدل‌هاست. این مدل شبیه‌سازی فرسایش خاک و بار رسوب را با استفاده

فرسایش خاک یکی از مهمترین مسائل زیست محیطی است که با افزایش فعالیت انسانی تشدید می‌شود و تهدید جدی برای بخش کشاورزی و تولید مواد غذایی به شمار می‌رود. فرسایش خاک با حذف لایه فوقانی موجب تخریب آن، کاهش مواد مغذی مورد نیاز گیاه و کاهش قابلیت نگهداری آب می‌شود. انتقال رسوبات نیز به نوبه خود باعث بروز مشکلات جدی مانند انتقال آلاینده‌ها و مواد شیمیایی، کاهش حجم مخزن و طول عمر سدها، رسوب‌گذاری در کانال‌های آبیاری و مشکلات بهره‌برداری می‌شود. از این رو، پیش‌نیاز هر اقدام حفاظتی و احداث سازه‌های آبی، برآورد بار رسوب می‌باشد. آگاهی از

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: m.azari@um.ac.ir)
(*) - نویسنده مسئول

از معادله اصلاح شده جهانی فرسایش خاک (MUSLE) انجام می-دهد. همچنین SWAT قابلیت ارائه نتایج در بازه‌های زمانی سالانه، ماهانه، روزانه و ساعتی را نیز دارا می‌باشد (۲۹ و ۵). این مدل، در تلفیق با GIS^۱، امکان تحلیل مکانی تولید رسوب و تعیین مناطق بحرانی را فراهم می‌آورد، از این رو می‌تواند در تعیین اثرات تصمیم‌های مدیریت منابع آب و اقدامات کنترل منابع آلاینده‌های غیرنقطه‌ای در حوضه‌های بزرگ مورد استفاده قرار گیرد (۴).

مدل SWAT در تحقیقات متعددی مورد استفاده قرار گرفته است. در برخی از مطالعات صورت گرفته، نتایج حاصل از شبیه‌سازی رواناب و رسوب مدل SWAT با دیگر مدل‌ها مانند AnnAGNPS^۲، IHACRES^۵، HSPF^۴، RUSLE^۳، SIMHYD^۶ مقایسه شده است که نتایج، دلالت بر برتری نسبی این مدل دارد (۴۳، ۳۱، ۴۹، ۲۳ و ۲۴). اما با این وجود کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب در مقایسه با رواناب، ضعیف عنوان شده است. به طوری که رستمیان و همکاران (۴۵)، در شبیه‌سازی رواناب و رسوب حوضه بهشت‌آباد با استفاده از مدل SWAT، علت ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب را، شبیه‌سازی ضعیف جریان، تعداد کم داده‌ها و عدم پیوستگی داده‌های رسوب عنوان کرده‌اند. محضری و همکاران (۳۳) نیز شبیه‌سازی رواناب، رسوب و مواد مغذی در حوضه گرگانرود را با مدل SWAT انجام دادند. برای این منظور، مدل در ۱۴ ایستگاه مورد مطالعه، برای ۲۱ سال واسنجی و ۱۰ سال اعتبارسنجی گردید. نتایج شاخص‌های ارزیابی مدل نشان داد مدل به‌خوبی می‌تواند رواناب را شبیه‌سازی نماید ولی در مورد رسوب نتایج خیلی رضایت‌بخش نیست. لی و همکاران (۳۲)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل SWAT، به مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم و فعالیت بشر بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌آبخیز Jihe در چین پرداختند. سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۶۲ برای واسنجی مدل و سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۸۲ برای اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب تعیین ماهانه رسوب به‌ترتیب برای دوره واسنجی ۰/۷۶ و ۰/۸۶ و دوره اعتبارسنجی ۰/۴۷ و ۰/۵۳ به‌دست آمد. نتایج این تحقیق نشان دهنده عملکرد بهتر مدل برای دوره واسنجی می‌باشد، همچنین علت عملکرد ضعیف مدل در شبیه‌سازی رسوب، نقشه DEM معرفی شده به مدل و تأثیر آن در شیب و میزان رسوب حوضه عنوان شده است. عباسپور و همکاران (۱) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی فرآیندهای

مؤثر بر کیفیت آب در حوضه رودخانه Thur، در شمال شرقی سوئیس استفاده کردند. نتایج این مطالعه در شبیه‌سازی رواناب و نیتراژ خوب عنوان شده است ولی در مورد رسوب تا حدودی ضعیف عمل کرده است. در این تحقیق اثر رگبار متوالی و تولید رسوبات ریزدانه از دلایل ضعف مدل در شبیه‌سازی رسوب عنوان شده است. دان و همکاران (۱۸)، در رودخانه Chaohe چین به برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT پرداختند. ضریب نش‌ساتکلیف و ضریب تعیین، برای شبیه‌سازی دبی جریان به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۹۳ و برای رسوب ۰/۷۶ و ۰/۸۰ برای دوره واسنجی به‌دست آمد، همچنین این ضرایب برای دوره اعتبارسنجی رواناب ۰/۵۱ و ۰/۷۸ و رسوب ۰/۷۲ و ۰/۷۹ به دست آمد. ندومیا و همکاران، (۴۱) برآورد رسوب حوضه‌ای بزرگ در تانزانیا را با مدل SWAT انجام دادند. بدین منظور، مدل با داده‌های ۴ سال واسنجی گردید و سپس رسوب خروجی از حوضه به مدت ۲۷ سال محاسبه شد. برای بررسی صحت مدل، رسوب تجمع‌یافته پشت سد و نتایج خروجی مدل مقایسه شد. که دلالت بر خطای ۲/۶ درصد داشت. نتایج این تحقیق استفاده از مدل SWAT در حوضه‌هایی که فرسایش ورقه‌ای غالب است را توصیه می‌کند و آن را جایگزین مناسبی برای روش متداول منحنی‌سنجه رسوب می‌داند.

در مجموع، ضعف مدل SWAT در شبیه‌سازی رسوب ناشی از وجود داده‌های محدود مشاهده‌ای، خطا در اندازه‌گیری، استفاده از معادلات ساده برای محاسبه و انتقال رسوب و رفتار پیچیده و غیرخطی رسوب می‌باشد (۳۰ و ۱۸). در بیشتر تحقیقات انجام شده با توجه به تعداد کم نمونه‌برداری‌های رسوب، برای دستیابی به داده‌های روزانه از روش‌های تجربی همچون منحنی‌سنجه رسوب و روابط رگرسیونی بین دبی و رسوب استفاده شده است. منحنی‌سنجه رسوب یکی از متداول‌ترین روش‌های برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد که همواره با خطا و عدم قطعیت زیادی همراه است (۱۰ و ۱۱). مدل‌های رایج پیش‌بینی رسوب با دبی روزانه جزء مدل‌های رگرسیونی می‌باشند که بر اساس حداقل مربعات خطا عمل می‌کنند. این مدل‌ها مبتنی بر مفروضات محدود کننده نظیر نرمال بودن داده‌ها، خطی بودن داده‌ها و واریانس ثابت می‌باشد تحقیقات مختلف نشان داده که این مفروضات در مورد رسوب نمی‌تواند صادق باشد Altunkaynak (۹) به همین خاطر محققان به دنبال روش‌های دیگر برای بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه بوده‌اند که مناسب سیستم‌های پویا و پیچیده باشد یکی از این روش‌ها الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در شرایط غیرخطی و پیچیده عملکرد بهتری دارد. الگوریتم ژنتیک بر خلاف روش‌های رگرسیون معمول بیش از یک نقطه بهینه در فضای جستجو ارایه می‌کند. از این رو تحقیقات متعدد با الگوریتم‌های تکاملی اقدام به بهینه‌سازی ضرایب کرده‌اند.

Altunkaynak (۹)، از الگوریتم ژنتیک جهت برآورد مقدار رسوب رودخانه می‌سی‌سی‌پی در میسوری، استفاده کرد. نتایج نشان داد که

- 1- Geographic Information System (GIS)
- 2- Annualized Agricultural Non-Point Source
- 3- Revised Universal Soil Loss Equation 2
- 4- Hydrologic Simulation Program Fortran
- 5- Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow
- 6- Simple Hydrology

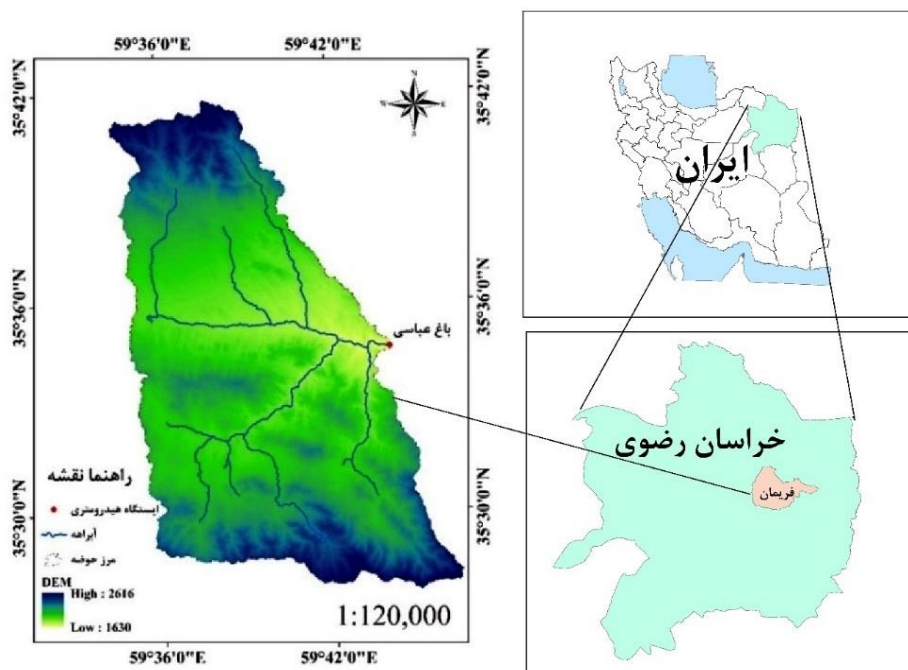
از این‌رو، هدف اصلی این پژوهش شبیه‌سازی رواناب و رسوب در حوزه سد فریمان با مدل SWAT می‌باشد. بدین منظور از قابلیت‌های الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی رابطه دبی-رسوب استفاده گردید، سپس واسنجی و اعتبارسنجی مدل با انتخاب مدل بهینه انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز سد فریمان به وسعت ۲۷۸/۸ کیلومتر مربع در محدوده عرض جغرافیایی ۳۳° ۳۵' تا ۳۵° ۴۱' و طول جغرافیایی ۳۴° ۵۹' تا ۴۴° ۵۹' در استان خراسان رضوی واقع شده است. ایستگاه هیدرومتری باغ عباسی در خروجی حوضه و بالادست سد فریمان قرار دارد که از سال آبی ۱۳۴۷-۱۳۴۶ داده‌های دبی روزانه و آمار رسوب آن ثبت شده است. شیب متوسط حوضه سد ۱۶/۹۲ درصد، طول آبراهه اصلی ۲۳/۵۵ کیلومتر و ارتفاع متوسط آن ۱۹۹۳/۹ متر می‌باشد (۲۶). شکل ۱ نقشه موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی را نشان می‌دهد.

میانگین نسبی خطای الگوریتم ژنتیک به‌مراتب بهتر از مدل‌های رگرسیونی می‌باشد. محمدرضاپور و همکاران (۳۴)، در تحقیقی به مقایسه الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات برای بهینه کردن رابطه بین دبی جریان و دبی رسوب برای ایستگاه کهک در رودخانه سیستان پرداختند. ارزیابی نتایج نشان داد که الگوریتم ژنتیک از دقت بالاتری نسبت به الگوریتم ازدحام ذرات و منحنی‌سنجه رسوب برخوردار می‌باشد. وفایی‌نژاد و همکاران (۵۰) بهینه‌سازی ضرایب معادله سنجه رسوب را با الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با مقدار ۶/۶ تن در روز کمترین مقدار جذر میانگین مربعات خطا و پس از آن، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده با مقدار ۷/۱۹ تن در روز قرار دارد. بهمنش و همکاران (۱۲) نیز ضرایب معادله سنجه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک در چهار ایستگاه هیدرومتری استان آذربایجان غربی بهینه کردند که نتایج برتری مدل الگوریتم ژنتیک را با کاهش ۲۵ درصد در میانگین مربع خطا نشان داد. طباطبایی و صالح پور جم (۴۸) نیز بهینه‌سازی ضرایب منحنی سنجه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات انجام دادند و بر کارایی این الگوریتم‌ها در کاهش خطای مدل منحنی سنجه تأکید کردند.



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز سد فریمان در استان خراسان رضوی

Figure 1- The location of Fariman dam watershed in Khorasan Razavi province

مدل SWAT

شده است و بر این اساس برای هر روز با بارندگی و رواناب مشخص، تولید رسوب هر HRU با رابطه ۲ تعیین می‌شود.

$$Sed = \frac{1}{C} \times \frac{1}{P} \times \frac{1}{LS} \times \frac{1}{CFRG} \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.5} \times K \times \quad (2)$$

در رابطه ۲، Sed: بار رسوب در روز معین (تن)، Q_{surf} : حجم رواناب سطحی (میلی‌متر در هکتار)، q_{peak} : مقدار دبی اوج (متر مکعب در ثانیه)، $area_{hru}$: مساحت واحد پاسخ هیدرولوژیک (هکتار)، K: عامل فرسایش‌پذیری خاک، C: عامل مدیریت و پوشش زمین، P: عامل عملیات حفاظتی، LS: عامل توپوگرافی و CFRG: عامل اجزاء درشت دانه خاک است (۳۹).

آماده سازی داده‌ها

برای آماده‌سازی و اجرای مدل SWAT نیاز به نقشه و اطلاعات مدل ارتفاع رقومی، خاک، کاربری اراضی، داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی (بارندگی و دمای حداقل و حداکثر در مقیاس روزانه، رطوبت نسبی، سرعت باد و) می‌باشد. همچنین داده‌های دبی جریان و رسوب به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل نیز به افزایش دقت پیش‌بینی کمک می‌کند. در این تحقیق، به‌منظور شبیه‌سازی حوضه، اطلاعات مورد نیاز از منابع مختلف تهیه و جمع‌آوری گردید (جدول ۱). در شکل ۲ نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه اجزاء واحد خاک و زیرحوضه‌ها نشان داده شده است. در بخش هواشناسی نیز، داده‌های بارش روزانه ۴ ایستگاه بارانسنجی فرهادگرد، ناری، کاریزنو، بکاول و داده‌های دما مربوط به ایستگاه فرهادگرد برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۱۹۹۱ از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی اخذ شد و در شبیه‌سازی استفاده گردید.

برای شروع کار با مدل SWAT، ابتدا مدل ارتفاع رقومی به افزونه Arc SWAT 2012 در نرم‌افزار Arc GIS 10.3.1 معرفی شد و با تعریف آستانه ۴۵۰ هکتار، مرز حوضه و زیرحوضه‌ها تعیین گردید. با تعیین محل ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباسی به عنوان خروجی حوضه، ۲۸ زیرحوضه تفکیک گردید. در مرحله بعد، به‌منظور تعیین واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی حوضه، نقشه خاک در ۲۰ طبقه، نقشه کاربری اراضی حوضه با ۴ طبقه (زراعت آبی، زراعت دیم، مرتع، مسکونی و روستا) و نقشه شیب با ۵ طبقه (۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۰، ۳۰-۴۰) به مدل معرفی شد. در بخش اقلیم، داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های باران‌سنجی و دمای بیشینه و کمینه ایستگاه تبخیرسنجی نیز به مدل معرفی گردید و مدل برای دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱ اجرا شد. علت انتخاب این دوره، عدم اجرای اقدامات آبخیزداری و داشتن شرایط و رفتار طبیعی حوضه بوده است. در این مطالعه از روش شماره منحنی، هارگریوز و ماسکینگام به ترتیب برای محاسبه رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و روندیابی جریان در رودخانه

مدل SWAT، یک مدل حوضه‌ای، نیمه‌توزیعی و پیوسته-زمانی می‌باشد. این مدل، برای پیش‌بینی تأثیر مدیریت اراضی بر هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز پیچیده و بزرگ با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی طراحی شده است. کوچکترین واحد کاری در این مدل، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی^۱ می‌باشد. هر یک از این واحدها ترکیب منحصر به فرد از کاربری زمین، خاک و شیب در زیرحوضه می‌باشد (۵ و ۷). فرایندهای هیدرولوژیکی در مدل SWAT به دو مرحله زمینی^۲ و آبی^۳ تقسیم می‌شوند. مرحله زمینی مربوط به فرایندهای سطح حوضه و ورود آب، رسوب و عناصر شیمیایی به آبراهه اصلی هر زیرحوضه است و مرحله آبی به روندیابی جریان رسوبات بالادست در آبراهه می‌پردازد (۲۱ و ۴۰). شبیه‌سازی بخش زمینی چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT بر پایه رابطه بیلان آبی به صورت رابطه ۱ صورت می‌گیرد.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

در این رابطه: SW_t : مقدار نهایی آب در خاک (میلی‌متر)، SW_0 : مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)، R_{day} : مقدار بارندگی در روز (میلی‌متر)، Q_{surf} : مقدار رواناب سطحی (میلی‌متر)، E_a : مقدار تبخیر و تعرق (میلی‌متر)، W_{seep} : مقدار آبی که از خاک به ناحیه غیراشباع وارد می‌شود و Q_{gw} : مقدار جریان برگشتی (میلی‌متر) است. رواناب سطحی با دو روش شماره منحنی اصلاح شده و گرین-امپت^۴ محاسبه می‌شود. بخش‌های اصلی مدل SWAT شامل، هیدرولوژی، هواشناسی، فرسایش خاک، مواد مغذی، دمای خاک، رشد گیاه، آفت کش‌ها، مدیریت کشاورزی و روند جریان رودخانه می‌باشد (۶). برای روندیابی جریان دو روش ضریب ذخیره متغیر^۵ و ماسکینگام^۶ در مدل تعریف شده است. به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق نیز سه روش پریستلی-تیلور^۷، پنمن-مانتیت^۸ و هارگریوز^۹ در مدل ارائه شده است (۳۹). در این مدل فرسایش و بار رسوب برای هر واحد پاسخ هیدرولوژیکی با استفاده از مدل MUSLE (۵۲ و ۵۳) تعیین می‌گردد که نسخه اصلاح شده معادله جهانی فرسایش USLE (۵۴) می‌باشد. در روش MUSLE، عامل فرسایش باران با عامل رواناب جایگزین

1- Hydrologic Response Units (HRUs)

2- Land phase

3- Water phase

4- Green-Ampt

5- Variable Storage

6- Muskingum

7- Priestley-Taylor

8- Penman-Monteith

9- Hargreaves

استفاده گردید.

برای محاسبه رسوب ماهانه، آمار دبی جریان و غلظت رسوب اندازه‌گیری شده برای ایستگاه هیدرومتری باغ‌عباسی در خروجی حوضه، برای دوره زمانی ۱۳۸۰-۱۳۴۷ از شرکت آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی اخذ گردید. سپس به‌منظور بررسی دقت برآورد رسوب

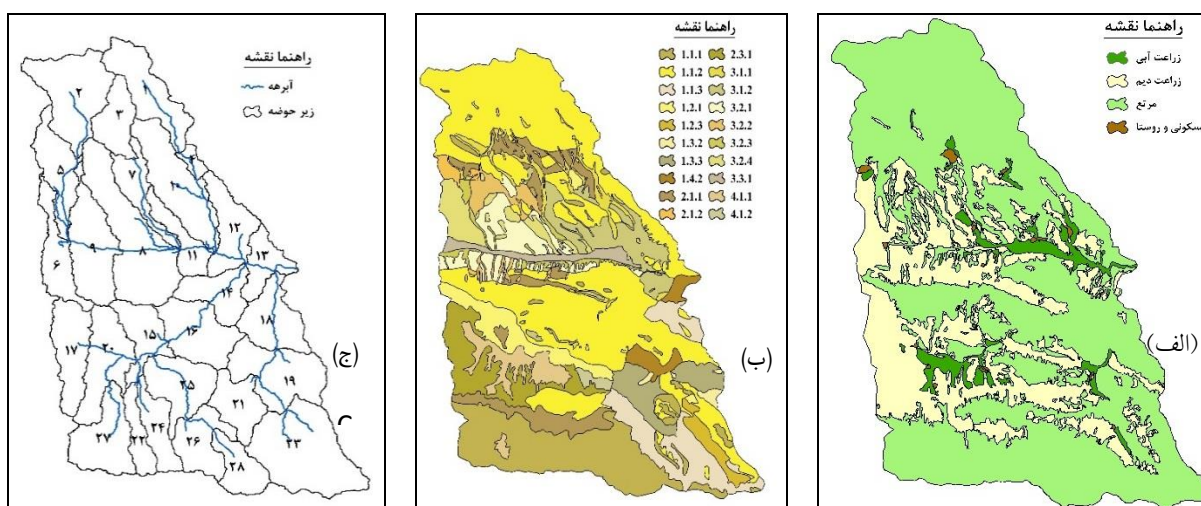
از دو روش منحنی‌سنجه رسوب و الگوریتم ژنتیک استفاده شد. بدین منظور، داده‌ها به‌طور تصادفی به ۷۰ درصد برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون مدل‌ها تقسیم گردید (۱۵ و ۳۶).

جدول ۱- داده‌های مورد نیاز مدل SWAT و منابع آن
Table 1- Required data for SWAT model and resources

منبع اخذ داده	مقیاس	داده‌های مکانی
Source of data	Scale	Spatial data
تصاویر ماهواره‌ای Landsat5	1:50000	نقشه کاربری اراضی
Landsat 5 satellite images		Land Use map
اداره کل منابع طبیعی استان خراسان رضوی	1:20000	نقشه خاک
Natural Resources Departemnt of Khorasan Razavi		Soil map
www.usgs.gov	1:50000	مدل ارتفاع رقومی
		Digital Elevation Model

جدول ۲- موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی حوضه سد فریمان
Table 2- The location of meteorological sations in Fariman Dam Watershed

عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ایستگاه
Latitude	Longitude	Station
35° 34' 39.6"	59° 44' 3.3"	باغ‌عباسی Bagh Abbasi
35° 46' 66.1"	59° 43' 53.6"	فرهادگرد Farhadgerd
35° 31' 46.1"	59° 38' 59.1"	ناری Nari
35° 35' 54.1"	59° 38' 45"	کاریزنو Karizno
35° 29' 31"	59° 9' 7.8"	بکاول Bakavel



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی (الف)، اجزاء واحد خاک (ب) و زیرحوضه‌های (ج) حوزه‌آبخیز سد فریمان
Figure 2- Fariman dam watershed Landuse A), soil units (B) and Sub watersheds (C) maps

$$g(u) = \sum_{i=1}^n \sqrt{(Q_{mi} - Q_{oi})^2} \quad (4)$$

آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی SWAT

به منظور آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی SWAT، از الگوریتم SUFI-2 (۵۶ و ۵۵) استفاده گردید. الگوریتم نیمه خودکار SUFI-2 یک مدل معکوس می‌باشد و داده‌های خروجی مدل SWAT را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و مقدار بهینه پارامترهای مؤثر در واسنجی را برآورد می‌نماید. این الگوریتم، برای ارزیابی عدم قطعیت از دو معیار P-factor و R-factor استفاده می‌کند (۲). P-factor معرف درصد داده‌های مشاهده‌ای است که در محدوده باند عدم قطعیت (95PPU) قرار گرفته است و مقدار آن بین ۰ تا ۱ می‌باشد و R-factor نسبت عرض باند 95PPU به انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. شرایط ایده‌آل در یک شبیه‌سازی زمانی است که مقدار P-factor به یک و R-factor به صفر نزدیک شود (۳). به منظور آنالیز حساسیت پارامترهای مدل، با توجه به منابع مختلف (۴، ۶ و ۸)، اقدام به انتخاب پارامترهای مؤثر بر دبی و رسوب در منطقه مورد مطالعه گردید. سپس آنالیز حساسیت به روش کلی بر روی ۳۲ پارامتر انتخاب شده برای دبی و ۱۴ پارامتر برای رسوب انجام شد و پارامترهای حساس مشخص گردید، پس از آن، مدل با داده‌های دبی و بار رسوب ماهانه برای دوره زمانی ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ برای دبی و رسوب واسنجی و اعتبارسنجی گردید.

ارزیابی کارایی مدل‌ها

به منظور ارزیابی منحنی‌سنجه رسوب و الگوریتم ژنتیک در تخمین بار رسوب معلق، و همچنین واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا^۴، معیار نش‌ساتکلیف^۵، ضریب تعیین^۶ و معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا^۷ (رابطه‌های ۸-۵) استفاده گردید. هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچک‌تر باشد، صحت پیش‌بینی مدل بیشتر می‌شود و مدل از دقت بیشتری برخوردار است. ضریب تعیین نشان دهنده همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد و مقدار بهینه این شاخص آماری یک است. مقدار ضریب نش‌ساتکلیف و معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا از منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است. هر چه این ضریب به یک نزدیک‌تر باشد، مدل از کارایی بالاتری برخوردار است

منحنی‌سنجه رسوب^۱، یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای برآورد رسوب معلق رودخانه‌ها می‌باشد که یک رابطه تجربی و جزء برآوردکننده‌های رگرسیونی می‌باشد. در این پژوهش، به منظور برآورد بار معلق رسوب، از مدل سالانه روش اداره عمران اراضی ایالات متحده^۲ براساس تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده و بدون دسته‌بندی داده‌ها استفاده شد (۳۵). معادله منحنی‌سنجه رسوب به صورت رابطه ۳ می‌باشد.

$$Q_s = a Q_w^b \quad (3)$$

در رابطه ۳، Q_s غلظت رسوب بر حسب میلی‌گرم در لیتر یا تن، Q_w دبی جریان بر حسب متر مکعب بر ثانیه و a و b ضرایب ثابت معادله می‌باشد که به ترتیب شاخصی از شدت فرسایش و توان فرساینده رودخانه را نشان می‌دهد (۲۰ و ۱۹). در این تحقیق رابطه دبی-رسوب و مقادیر ثابت a و b معادله برای داده‌های آموزش منحنی‌سنجه رسوب در نرم‌افزار Excel به دست آمد.

الگوریتم ژنتیک^۳ (GA)

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های تکاملی پرکاربرد است که به وسیله هالند در دهه ۱۹۷۰ معرفی شد. اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس شده است. مهم‌ترین عملگرهای الگوریتم ژنتیک، برش و جهش می‌باشد. در این الگوریتم، ابتدا به‌طور تصادفی جامعه‌ای از کروموزوم‌ها ایجاد و سپس برازندگی آن‌ها محاسبه و تعیین می‌گردد. در ادامه، به وسیله عملگرهای برش و جهش جامعه‌ای جدید با مقادیر برازندگی بالاتر تولید می‌شود. عمل برش بر روی کروموزوم‌های افرادی که به عنوان والد انتخاب شده‌اند اعمال می‌شود. در عمل جهش یک ژن می‌تواند با ژنی دیگر در طول کروموزوم تعویض شود یا مقدار عددی یک یا چند ژن به طور تصادفی تغییر کند. در واقع، عملگر جهش، الگوریتم ژنتیک را قادر می‌سازد تا به راه‌حل بهینه نزدیک شود. این عملگرها تا زمان رسیدن به تابع هدف تکرار می‌شوند (۲۲ و ۲۷). شکل ۳ نمودار جریان الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. در این پژوهش، ابتدا مسئله بهینه‌سازی به صورت یک فضای جستجو از مقادیر پیوسته ضرایب رابطه دبی-رسوب (a و b) در نرم افزار MATLAB 2017 برنامه‌نویسی شد، سپس جمعیت اولیه در این فضا تعیین و تابع هدف برای هر کروموزوم (a و b) محاسبه گردید. تابع هدف الگوریتم ژنتیک به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر رسوب مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده می‌باشد که به صورت رابطه ۴ تعریف شده است. در رابطه ۴، Q_{mi} مقادیر اندازه‌گیری شده

4- Root Mean Squer Error (RMSE)

5- Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient (NSE)

6- Coefficient of Determination (R2)

7- Kling-Gupta efficiency (KGE)

1- Sediment Rating Curve (SRC)

2- USBR

3- Genetic Algorithm (GA)

نتایج و بحث

مقایسه روش‌های برآورد رسوب

در این تحقیق کارایی منحنی‌سنجه رسوب و رابطه دبی-رسوب بهینه شده با الگوریتم ژنتیک تعیین گردید. شکل ۴ نشان دهنده مقایسه مدل الگوریتم ژنتیک و منحنی‌سنجه رسوب در برآورد مقادیر رسوب معلق دوره آزمون ایستگاه باغ‌عباسی می‌باشد. بر اساس شکل ۴ برای دبی‌های پایین، مقادیر حاصل از مدل الگوریتم ژنتیک دارای اختلاف کمتری با مقادیر مشاهده‌ای رسوب می‌باشد، به عبارتی، قادر به پیش‌بینی دقیق‌تری بوده است. برای مثال، برای دبی ۰/۰۴ متر مکعب بر ثانیه، الگوریتم ژنتیک توانسته مقدار رسوب نزدیک‌تر (۶/۷۵ تن) به داده مشاهده‌ای (۵/۹۷ تن) پیش‌بینی کند در صورتی که برای همین مقدار دبی، منحنی‌سنجه (۲/۱۷ تن) قادر به پیش‌بینی دقیقی از مقدار رسوب نبوده است.

(۳۸، ۲۵ و ۳۷).

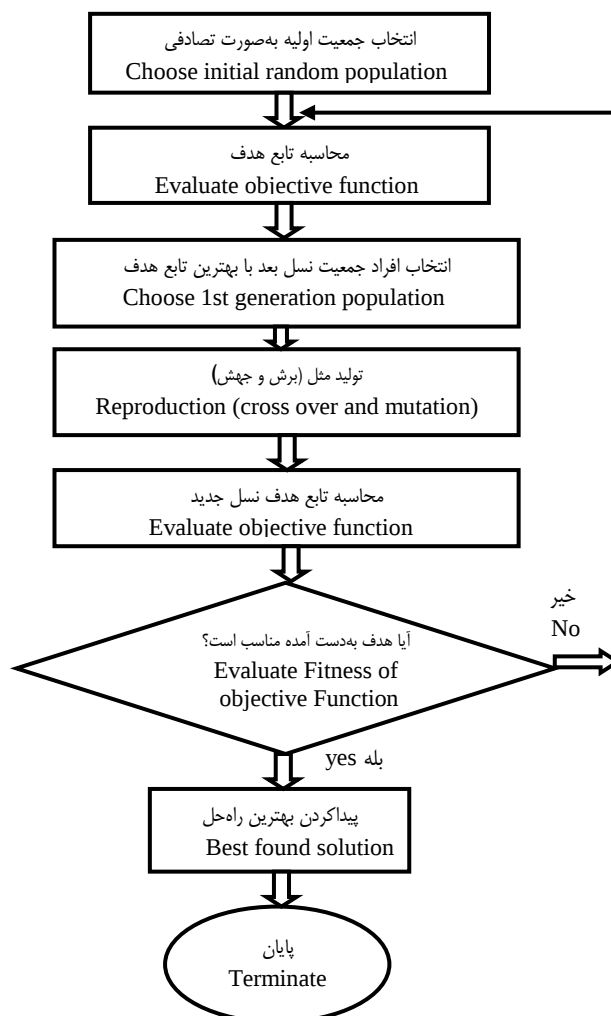
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (5)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (6)$$

$$NS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

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

در روابط ۵ تا ۷، n: تعداد داده‌ها، O_i : مقدار مشاهده‌ای، P_i : مقدار پیش‌بینی مدل، $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهده‌ای، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی مدل می‌باشد. در رابطه ۸، r ضریب همبستگی خطی داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل، α و β نیز به ترتیب نسبت انحراف معیار و نسبت میانگین‌ها داده‌های مشاهده‌ای به پیش‌بینی مدل می‌باشد.

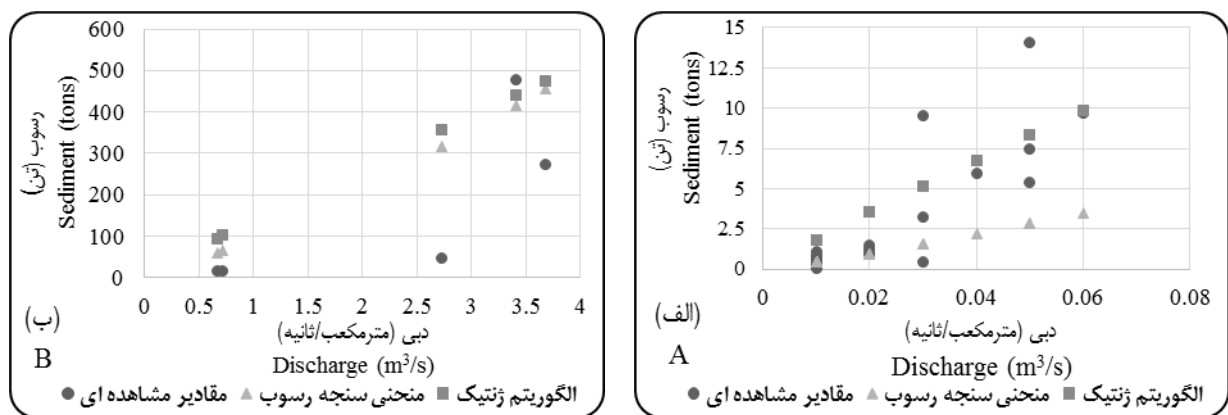


شکل ۳- نمودار جریانی الگوریتم ژنتیک
Figure 3- Flow chart of the Genetic Algorithm

منحنی سنج رسوب داشته است. مقادیر برآورد شده با الگوریتم ژنتیک دارای روند بهتری در شبیه‌سازی داده‌های رسوب نسبت به منحنی سنج رسوب می‌باشد.

به منظور مقایسه عملکرد مدل SWAT، مقادیر رسوب ماهانه خروجی مدل بدون واسنجی با رسوب برآورد شده با روش‌های الگوریتم ژنتیک و منحنی سنج رسوب نیز مقایسه گردید که نتایج در شکل ۷ برای دوره شبیه‌سازی (۲۰۰۰-۱۹۹۱) ارائه شده است. با توجه به شکل ۵، مقدار رسوب شبیه‌سازی شده با مدل SWAT به مقدار الگوریتم ژنتیک نزدیک‌تر می‌باشد. مقدار ضریب نش‌سازکلیف و ضریب تعیین برای منحنی سنج رسوب به ترتیب 0.43 و 0.44 و برای الگوریتم ژنتیک 0.51 و 0.53 می‌باشد. بر اساس شکل ۵ مدل SWAT مقادیر بالای رسوب را به خوبی برآورد نکرده است که این موضوع در تحقیقات رستمیان و همکاران (۴۵)، محضری و همکاران (۳۳)، عباسپور و همکاران (۱)، لی و همکاران (۳۲) نیز مشاهده شده است. در پژوهش دومبا و همکاران (۴۱) نیز عملکرد مدل SWAT در برآورد رسوب‌های کم حاصل از فرسایش ورقه‌ای بهتر بوده است. در مجموع با توجه به کارایی بهتر رابطه بهینه شده با الگوریتم ژنتیک، این روش به عنوان روش برتر در برآورد رسوب روزانه و ماهانه برای واسنجی مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفت.

این در حالی است که در برخی از مطالعات نظیر محمدرضاپور و همکاران (۳۴) و Altunkaynak (۹)، الگوریتم ژنتیک برای دبی‌های اوج عملکرد بهتری داشته است و در پژوهش روشننگر و همکاران (۴۶)، نیز عملکرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک در برآورد دبی‌های پایین بهتر عنوان شده است. در این پژوهش، پیش‌بینی بهتر مدل برای مقادیر رسوب پایین می‌تواند به دلیل مشارکت بیشتر مقادیر پایین دبی و رسوب در آموزش مدل باشد، زیرا تعداد نمونه‌برداری در زمان‌های سیلابی کمتر بوده و مدل برای شرایط سیلابی و پیش‌بینی رسوب برای دبی‌های اوج به خوبی آموزش داده نشده است. علت تفاوت بین عملکرد بهتر روش‌های هوش مصنوعی در مقایسه با روش‌های آماری می‌تواند در قابلیت تخمین و پیش‌بینی این روش‌ها برای تقریب غیرخطی با حجم کم داده‌ها باشد (۲۶). این در حالی است که عملکرد و دقت روش‌های رگرسیونی به شدت وابسته به حجم نمونه می‌باشد و می‌تواند عامل محدودیت مدل‌های آماری باشد. همچنین در جدول ۳ رابطه دبی-رسوب و نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی مدل در مرحله آزمون ایستگاه باغ‌عباسی ارائه شده است. مقایسه نتایج حاصل از این معیارها نشان می‌دهد که مدل الگوریتم ژنتیک با ریشه میانگین مربعات خطای $70/9$ ، ضریب نش-سازکلیف 0.46 و ضریب تعیین 0.72 عملکرد بهتری نسبت به

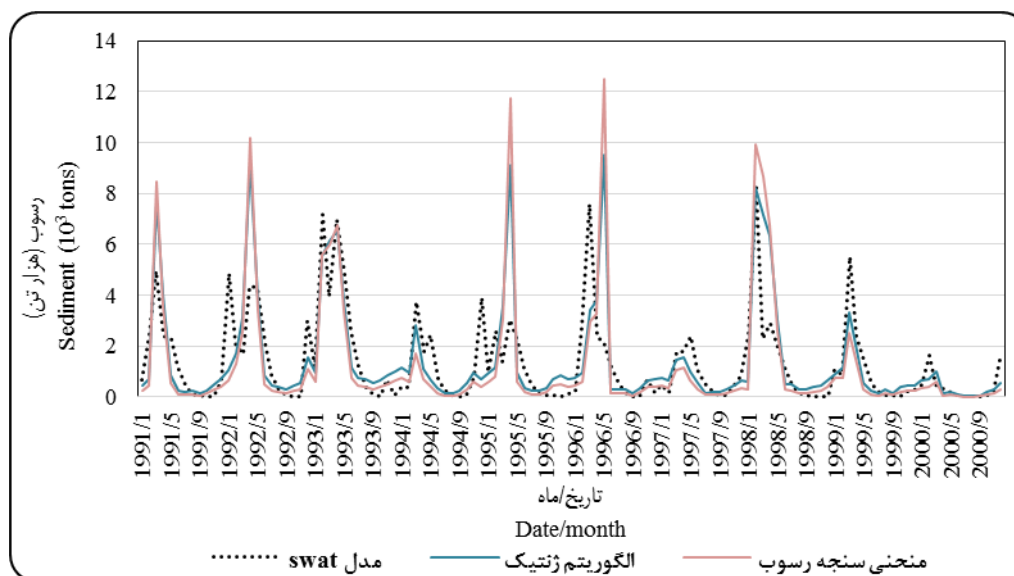


شکل ۴- مقایسه مدل الگوریتم ژنتیک و منحنی سنج رسوب در برآورد رسوب دبی‌های کم (الف) و دبی‌های زیاد (ب) برای دوره آزمون
Figure 4- Comparison of the Genetic Algorithm and Sediment Rating Curve models in Estimation of Sediment yield for low flow (A) and high flow (B) in the test period

جدول ۳- معیارهای ارزیابی مدل‌های برآورد رسوب برای داده‌های آزمون

Table 3- Evaluation results of Sediment_discharge models for the test period

مدل Model	رابطه دبی-رسوب Sediment_discharge equation	NS	RMSE	R^2
منحنی سنج رسوب Sediment Rating Curve	$y = 97.594 x^{1.1818}$	0.41	86.01	0.71
الگوریتم ژنتیک Genetic Algorithm	$y = 139.15 x^{0.9397}$	0.46	70.91	0.72



شکل ۵- مقایسه مدل‌ها در برآورد رسوب ماهانه

Figure 5- The comparison of models in estimation of monthly sediment yield

جدول ۴- دامنه اولیه و مقدار بهینه پارامترهای منتخب دبی

Table 4- Initial range and optimal value for selected discharge parameters

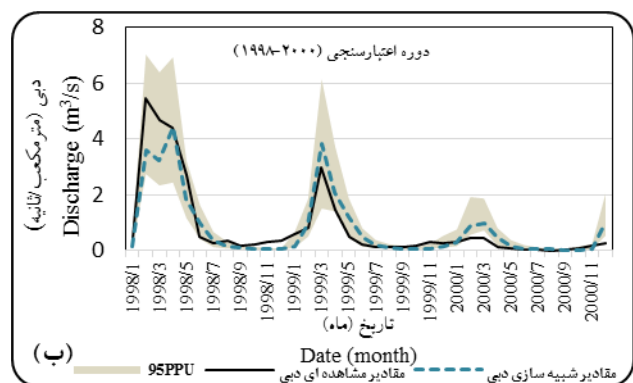
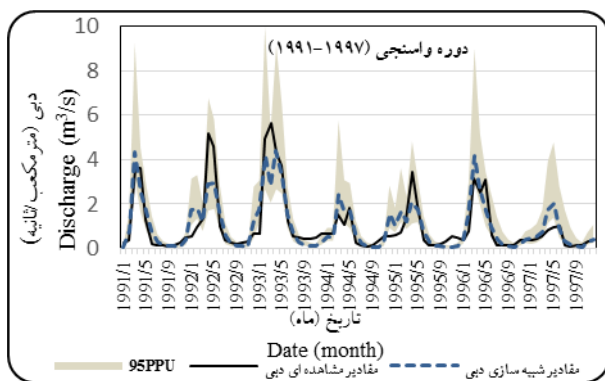
پارامتر Parameter	علامت اختصاری پارامتر Parameter name	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	مقدار بهینه Optimum
شماره منحنی رواناب به روش SCS SCS runoff curve number	r*__CN2.mgt	—0.5	0.5	0.17
عامل تأخیر رواناب سطحی Surface runoff lag coefficient	v__SURLAG.bsn	0.05	24	14.96
عامل α در محاسبه جریان پایه Base flow alpha factor	v**__ALPHA_BF.gw	0.2	1	0.72
ضریب برگشت آب‌های زیرزمینی Groundwater "revap" coefficient	v__GW_REVAP.gw	0.02	0.2	0.05
عمق آستانه آب در آبخوان عمیق Threshold depth of water in the shallow aquifer	v__GWQMN.gw	0	5000	3085.09
عملکرد ویژه آبخوان کم عمق Specific yield of the shallow aquifer	v__GW_SPYLD.gw	0	0.4	0.25
عامل α در محاسبه جریان پایه Baseflow alpha factor for bank storage	v__ALPHA_BNK.rte	0	1	0.07
برگاب (حداکثر ذخیره پوشش تاج گیاهی) Maximum canopy storage	v__CANMX.hru	0	100	88.11
هدایت هیدرولیکی اشباع لایه‌های خاک Saturated hydraulic conductivity	r__SOL_K.sol	-0.8	0.8	-0.79
وزن مخصوص ظاهری خاک Moist bulk density	r__SOL_BD.sol	-0.5	0.5	-0.24
هدایت هیدرولیکی موثر بستر آبراهه اصلی Manning's "n" value for the main channel	v__CH_K2.rte	0	150	107.35
ضریب هدایت هیدرولیکی بستر آبراهه‌های فرعی Saturated hydraulic conductivity	v__CH_K1.sub	5	150	85.4

ضرب مقدار اولیه پارامتر در (۱+ ارزش داده شده) V^{**} : مقدار اولیه پارامتر مورد نظر با مقدار داده شده جایگزین می‌شود (۳)

جدول ۵- دامنه اولیه و مقدار بهینه پارامترهای منتخب رسوب

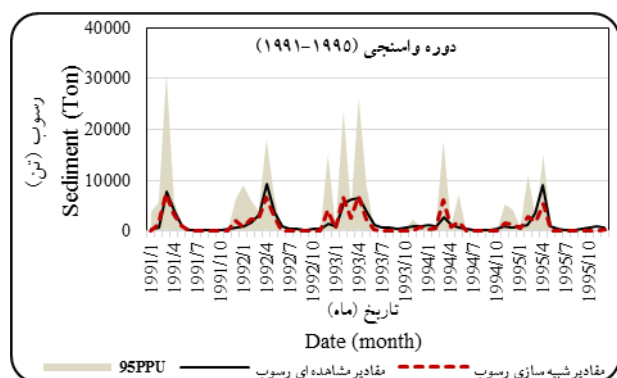
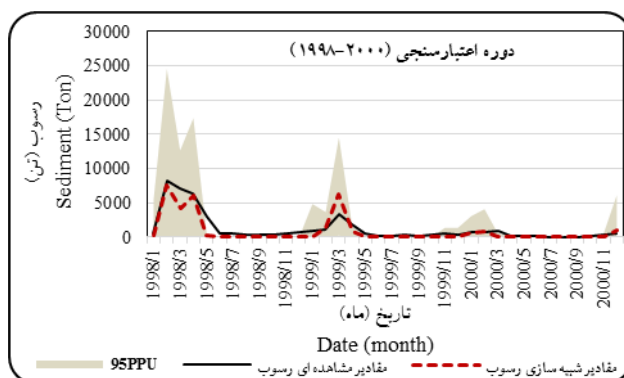
Table 5- Initial range and optimal value for selected sediment parameters

پارامتر Parameter	علامت اختصاری پارامتر Parameter name	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	مقدار بهینه Optimum
عامل تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در شاخه‌های فرعی Peak rate adjustment factor for sediment routing	v__ADJ_PKR.bsn	0.5	2	0.16
عامل فرسایش‌پذیری خاک در USLE USLE equation soil erodibility (K) factor	r__USLE_K.sol	-0.8	0.8	-0.38
تمرکز رسوب در جریان جانبی و زیرزمینی Sediment concentration in lateral flow and groundwater flow	v__LAT_SED.hru	0	5000	2280.34
ضریب رابطه انتقال رسوب Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment	v__SPCON.bsn	0.001	0.01	0.0075
نمای رابطه انتقال رسوب Exponent parameter for calculating sediment	v__SPEXP.bsn	1	1.5	1.44
عامل تعدیل اوج جریان برای روندیابی رسوب در آبراهه Peak rate adjustment factor for sediment routing in the main channel	v__PRF_BSN.bsn	0	2	1.71
ضریب تجزیه به باقی‌مانده پوشش Residue decomposition coefficient	v__RSDCO.bsn	0.02	1	0.63



شکل ۶- مقایسه دبی ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی و اعتبار سنجی

Figure 6- Comparison of observed and simulated monthly discharge for the calibration and validation periods



شکل ۷- مقایسه رسوب ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهده‌ای رسوب

Figure 7- Comparison of observed and simulated monthly sediment yield for the calibration and validation periods

نتایج ارزیابی مدل SWAT

بر اساس منابع تحقیق تعداد ۳۰ پارامتر برای دبی و ۱۴ پارامتر برای رسوب به SUFI2 معرفی گردید. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که ۱۲ پارامتر برای دبی و ۷ پارامتر برای رسوب حساسیت بیشتری دارند که در واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. از میان پارامترهای مورد بررسی پارامترهای CN2، CH_K1، ALPHA_BNK، SOL_K، GWQMN بیشترین حساسیت برای دبی و پارامترهای USLE_K، LAT_SED، SPEXP، SPCON و PRF_BSN نیز بیشترین حساسیت را برای رسوب داشته‌اند. پارامترهای CH_K، ALPHA_BNK، ESCO، CN2، SPEXP، USLE_K، SPCON برای دبی و پارامترهای CH_K، ESCO، CN2، SPEXP، USLE_K، SPCON برای رسوب در تحقیقات دان و همکاران (۱۸)، دولت‌آبادی و زمردیان (۱۷)، بریک و همکاران (۱۶)، ویلایسن و همکاران (۵۱)، عربی و همکاران (۸) نیز به عنوان پارامترهای حساس شناخته شده است. مدل با تعیین بازه مناسب برای پارامترهای حساس برای دوره زمانی ۱۹۹۱-۱۹۹۷ برای دبی و ۱۹۹۵-۱۹۹۱ برای رسوب واسنجی شد و سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۰ برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. جدول ۴ و ۵ به ترتیب نتایج واسنجی و مقدار بهینه پارامترهای دبی و رسوب را نشان می‌دهد.

در شکل ۶ هیدروگراف شبه‌سازی و هیدروگراف مقادیر مشاهده ای ماهانه دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای دبی نشان داده شده است. در شکل ۷ نیز هیدروگراف شبه‌سازی و هیدروگراف مقادیر مشاهده‌ای ماهانه دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای رسوب ارائه شده است. همان گونه که در نمودارهای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، زمان وقوع دبی اوج و زمان وقوع بار رسوب حداکثر به خوبی شبه‌سازی شده است، به عبارتی، مدل به خوبی توانسته است مقادیر دبی و رسوب را پیش‌بینی کند، تنها در پیش‌بینی مقادیر کم رسوب، ضعیف عمل کرده است که می‌تواند به دلیل تأثیرگذاری پارامترهای دبی و ساده‌سازی‌های مدل در شبه‌سازی بار ناشی از مواد بستر رودخانه باشد (۱۸ و ۵۰) اما مدل در پیش‌بینی

مقادیر زیاد رسوب به خوبی عمل کرده است.

جدول ۶ معیارهای ارزیابی مدل را نشان می‌دهد. دقت شبه‌سازی دبی و رسوب ماهانه با استفاده از شاخص ارزیابی نش-ساتکلیف در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۷۳ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۷۶ به دست آمد. همچنین، معیار ارزیابی کلینگ و گوپتا در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۷۶ و در مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۴ به دست آمد. با توجه به نتایج مدل دارای همبستگی مناسبی بوده است. مقایسه نتایج به دست آمده با تحقیقات مشابه بیانگر نزدیک بودن آماره‌های به دست آمده با پژوهش‌های فومچا و همکاران (۴۴)، الانسی و همکاران (۷)، بافوت و صادقی (۱۳)، تشاگر (۴۹)، بریک و همکاران (۱۶)، حسینی و همکاران (۲۸)، صالح و دو (۴۷)، داون و همکاران (۱۸) و عثمانی و همکاران (۴۲) در سایر حوضه‌ها می‌باشد.

موریسای و همکاران (۳۷) طبقه‌بندی توصیفی برای ضریب نش-ساتکلیف و تعیین کارایی مدل SWAT ارائه نمودند. بر این اساس مقدار این ضریب بین ۰/۷۵ تا ۱ در طبقه "خیلی خوب"، ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ در طبقه "خوب" و ۰/۵۰ تا ۰/۶۵ در طبقه "قابل قبول" قرار دارد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ و طبقه‌بندی موریسای و همکاران (۳۷)، شبه‌سازی در ایستگاه باغ‌عباسی برای مرحله واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب در در طبقات "خیلی خوب" و "خوب" قرار می‌گیرد.

با توجه به جدول ۶، شاخص P-factor برای دوره واسنجی دبی و رسوب نشان می‌دهد که ۵۴ و ۴۲ درصد پیش‌بینی مدل برای دبی و رسوب در باند عدم قطعیت ۹۵٪ قرار گرفته‌اند. همچنین مقادیر شاخص R-factor برای دبی و رسوب در این دوره ۰/۶۳ و ۱/۸۴ به دست آمده است. عدم قطعیت زیاد مدل برای رسوب که در پژوهش رستمیان و همکاران (۴۵)، نیز اشاره شده است به دلیل عدم قطعیت های مدل مفهومی و ورودی‌های رسوب مربوط می‌باشد.

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل SWAT برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی

Table 6- Evaluation criterias of SWAT model for the calibration and validation periods

متغیر Variable	دوره period	دوره آماری Statistical period	NS	R ²	KGE	P_factor	R_factor
دبی Discharge	واسنجی Calibration	1991-1997	0.75	0.75	0.81	0.54	0.63
	اعتبارسنجی Validation	1998-2000	0.85	0.86	0.80	0.53	0.38
رسوب Sediment	واسنجی Calibration	1991-1995	0.73	0.75	0.76	0.42	1.84
	اعتبارسنجی Validation	1998-2000	0.76	0.81	0.74	0.44	1.41

نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور شبیه سازی رواناب و رسوب حوزه آبخیز سد فریمان از مدل SWAT استفاده شده است. به منظور برآورد رسوب، ابتدا رابطه دبی-رسوب روزانه با رابطه بهینه شده با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. نتایج مقایسه مدل های برآورد رسوب نشان دهنده عملکرد بهتر و برتری الگوریتم ژنتیک بود، از این رو، با استفاده از رابطه بهینه، رسوب روزانه و ماهانه ایستگاه باغ عباسی در خروجی حوضه محاسبه گردید. سپس از مقادیر به دست آمده برای واسنجی، آنالیز حساسیت و اعتبارسنجی مدل SWAT، در نرم افزار SWAT-CUP استفاده گردید. نتایج آنالیز حساسیت بیانگر حساسیت، ۱۴ پارامتر برای دبی و ۷ پارامتر برای رسوب بوده است که برای واسنجی به مدل معرفی شد. دقت شبیه سازی با استفاده از شاخص ارزیابی

منابع

نش ساتکلیف در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی برای دبی ماهانه به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸۵ و برای رسوب ماهانه در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۶ به دست آمد که بیانگر کارایی مدل SWAT در شبیه سازی رواناب و رسوب با دقت مناسب می باشد. استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه سازی رابطه دبی-رسوب نقش مهمی در استخراج مقادیر رسوب روزانه و دقت شبیه سازی مدل داشته است. با توجه به اینکه تعداد نمونه برداری رسوب برای بیشتر ایستگاه های هیدرومتری کم می باشد استفاده از الگوریتم های تکاملی می تواند نقش به سزایی در استخراج روابط دبی-رسوب داشته باشد که معمولاً در مدل های تجربی نظیر منحنی سنج با خطای زیادی همراه است.

- 1- Abbaspour K. C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., and Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333 (2): 413-430.
- 2- Abbaspour K.C. 2009. User manual for SWAT-CUP2, SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swis Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Duebendorf, Switzerland, 95 Pages.
- 3- Abbaspour K. C. 2011. SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag.
- 4- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Srinivasan R., Yang H., and Klve B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 524: 733–752.
- 5- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resource Association*, 34 (1): 73–89.
- 6- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., and Kannan N. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4):1491-1508.
- 7- Alansi A. W., Amin M. S. M., Abdul Halim G., Shafri H. Z. M., and Aimrun W. 2009. Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 6 (6): 7581-7609.
- 8- Arabi M., Frankenberger J. R., Engel B. A., and Arnold J. G. 2008. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrological Processes*, 22 (16): 3042-3055.
- 9- Altunkaynak A. 2009. Sediment load prediction by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40 (9): 928-934.
- 10- Asselman N.E.M. 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology*, 23(4): 228-248.
- 11- Abdi Dehkordi M. 2012. Intelligent Estimation of suspended sediment discharge using modern technologies. MS.c Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. Faculty of Water and Soil Engineering. Iran. 91 P. (In Persian)
- 12- Bahmanesh J., Mohammadpour M M., and Bateni M. 2017. Comparison of River Suspended Sediment Load Estimation, using Regression and GA Methods, *Journal of Watershed Management Research*, 8(16), 132-141. (In Persian)
- 13- Baffaut C., and Sadeghi A. 2010. Bacteria modeling with SWAT for assessment and remediation studies: A review. *Transactions of the ASABE*, 53(5): 1585-1594.
- 14- Bayramin I., Dengiz O., BAŞKAN O., and Parlak M. 2003. Soil erosion risk assessment with ICONA model; case study: Bepazarı area, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 27(2): 105-116.
- 15- Bouzeria H., Ghenim A., and Khanchoul K. 2017. Using artificial neural network (ANN) for prediction of sediment loads, application to the Mellah catchment, northeast Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 33(1):47-55.

- 16- Briak H., Moussadek R., Aboumaria K., and Mrabet R. 2016. Assessing sediment yield in Kalaya gauged watershed (Northern Morocco) using GIS and SWAT model, *International Soil and Water Conservation Research*, 4(3): 177-185.
- 17- Dowlatabadi S., and Zomorodian M.A. 2013. Hydrological simulation of Firoozabad basin using SWAT model. *Journal of Irrigation and Water*, 4(14): 38-48. (In Persian with English abstract)
- 18- Duan Z., Song X., and Liu J. 2009. Application of SWAT for sediment yield estimation in a mountainous agricultural basin, In *Geoinformatics, 2009 17th International Conference on IEEE*. (pp. 1-5).
- 19- Emam Gholi Zadeh S., Karimedemaneh R., and Ajdari KH. 2016. Comparison of common methods for estimating suspended sediment load of Karkheh River with the method of gene expression programming. *Geography and Development Quarterly*, (45): 121-140. (In Persian)
- 20- Fleming G. 1979. Deterministic model in hydrology. *IRRIGATION and Drainage paper*.32 FAO.Rome, 80p.
- 21- Gassman P.W., Reyes M.R., Green C.H., and Arnold J.G. 2007. The soil and water assessment tool: historic development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE*, 50 (4): 1211–1250.
- 22- Goldberg D. 1989. Genetic algorithms in search optimization and machine learning. *Journal of Hydrology Research*, 8:354-361.
- 23- Golshan M., Esmaeli Ouri A., Shahedi K., and Jahanshahi A. 2016. Evaluation of the Efficiency of SWAT and IHACRES Models in Runoff Simulation of Khoramabad Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 26(1/2): 29-42. (In Persian)
- 24- Goodarzi M.R., Zahabioun B., Masah Boani A., and Kamal A. 2012. Comparison of performance of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD in simulation of Ghareh Sou basin runoff. *Journal of Water Management and Irrigation*, 2(1): 25-40. (In Persian with English abstract)
- 25- Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., and Martinez G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), pp.80-91.
- 26- Hayat Zadeh M., Chezgy J., and Dastoorani M.T. 2015. Evaluation of Sediments Using Rating Curve and Artificial Neural Network Methods by Combining Morphological Parameters of Basin (Case Study: Bagh Abbas Basin) *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 19 (72): 217-227. (In Persian)
- 27- Holland J. H. 1975. *Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- 28- Hosseini M., Ghafouri A. M., M Amin M. S., Tabatabaei M. R., Goodarzi M., and Abde Kolahchi A. 2012. Effects of land use changes on water balance in Taleghan catchment, Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 14(5): 1161-1174.
- 29- Kavian A., Bahrami M., and Rouhani H. 2014. Evaluation of the Efficiency of SWAT Model in Estimating Surface Runoff in kachik Watershed of Golestan Province. *Watershed Research (Research and construction)*. 103. (In Persian)
- 30- Kavian A., Golshan M., Rouhani H., and Esmaeli Ouri A. 2015. Runoff and sediment simulation of the watershed of the Haraz River of Mazandaran using the SWAT pattern. *Natural Geography Research*, 47(2): 197-211. (In Persian)
- 31- Kliment Z., Kadlec J., and Langhammer J. 2008. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi – empirical erosion models. *Catena*, 73:286-299.
- 32- Li Q., Yu X., Xin Z., and Sun Y. 2012. Modeling the effects of climate change and human activities on the hydrological processes in a semiarid watershed of loess plateau. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(4), 401-412.
- 33- Mahzari S., Kiani F., Azimi M., and Khormali F. 2016. Using SWAT Model to Determine Runoff, Sediment Yield and Nitrate Loss in Gorganrood Watershed, Iran. *ECOPERSIA*, 4(2): 1359-1377.
- 34- Mohammad Reza Pour O., Haghighat-ju P., and Zainali M J. 2015. Compression of Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm models for Optimizing Coefficients of Sediment Rating Curve in estimation of Suspended Sediment in Sistan River ;Case Study Kohak station. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 6(22): 76-89. (In Persian)
- 35- Mosaedi A., Zanganeh M.A., and Farazjoo H. 2010. Estimation of suspended sediment discharge based on the sediment curve equation and its affected factors in the Gorganroud watershed. *Proceedings of the First National Conference on Applied Resources of Water Resources of Iran*. Kermanshah Regional Water Company. Iran. 12 P. (In Persian)
- 36- Mohammadi A., Akbari G., and Azizzian G. 2012. Suspended sediment concentration estimation using artificial neural networks and neural-fuzzy inference system case study: Karaj Dam. *Indian Journal of Science and Technology*, 5(8): 3188-3193.
- 37- Moriasi D.N., Arnold J.G., VanLiew 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.
- 38- Nash J. E., and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *J. Hydrol*, 10: 282-290.
- 39- Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., and Williams J. R. 2005. SWAT theoretical documentation version 2005. Grassland. Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA.
- 40- Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., and Williams J. R. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- 41- Ndomba P.M., Mtalo F.W., and Killingtveit A. 2007. Sediment yield modeling using SWAT model at a large and complex catchment: Issues and approaches. A case study of Pangani River catchment, Tanzania, 4th International SWAT Conference, Institute for Water Education Delf, The Netherlands, July 4-6.
- 42- Osmani H., Motamedvaziri B., and Moeini A. 2013. Flow Simulation, Calibration and Validation of SWAT Model, Case Study: Upper Basin of Latyan Dam, Tehran. *Journal of Engineering and Watershed Management*, 5(2): 134-143. (In Persian with English abstract)
- 43- Parajuli P.B., Nelson N.O., Frees L.D., and Mankin K.R. 2009. Comparison of AnnAGNPS and SWAT model simulation results in USDA-CEAP agricultural watersheds in south-central Kansas, *Hydrol. Process*, 23: 748-763.
- 44- Phomcha P., Wirojanagud P., Vangpaisal T., and Thaveevouthti T. 2011. Suitability of SWAT model for simulating of monthly streamflow in Lam Sonthi Watershed, *Journal of Industrial Technology*, 7(2): 49-56.
- 45- Rostamian R., Jaleh A., Afyuni M., Mousavi S. F., Heidarpour M., Jalalian A., and Abbaspour K. C. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 53 (5): 977-988.
- 46- Roshangar K., Aalami M.T., and Vojudi-Mehrabani F. 2015. Enhancing Accuracy of Sediment Total Load Prediction Using Evolutionary Algorithms (Case Study: Gotoorchay River). *Journal of Water and Soil*, 29(2): 1416-1426. (In Persian)
- 47- Saleh A., and Du B. 2004. Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS program for the upper North Bosque River watershed in central Texas. *Transactions of the ASAE*, 47(4): 1039.
- 48- Tabatabaei M., and Salehpour Jam A. 2017. Optimization of sediment rating curve coefficients using evolutionary algorithms and unsupervised artificial neural network. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 15(4), 387-401.
- 49- Teshager A. D., Gassman P. W., Secchi S., Schoof J. T., and Misgna G. 2016. Modeling agricultural watersheds with the soil and water assessment tool (SWAT): Calibration and validation with a novel procedure for spatially explicit hrus, *Environmental Management*, 57(4): 894-911.
- 50- Vafaei Nejad A., Chatr Simab Z., Boolori A., and Mirdar Harijani F. 2017. Optimization Coefficients of Curve Equation Sediment Measurement in Estimating Sediment Flow Using Particle Swarm Algorithm (PSO) and Simulated Refrigeration Algorithm (SA) Case Study: Bijar Station. *Journal of natural ecosystems Iran*, 8(3), 69-82. (In Persian)
- 51- Vilaysane B., Takara K., Luo P., Akkharath I., and Duan W. 2015. Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences*, 28: 380-390.
- 52- Williams J. R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 11(5): 965-974.
- 53- Williams J.R., and Berndt H.D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20 (6), 1100-1104.
- 54- Wishmeier W.H., and Smith D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. USDA Agricultural Research Service (USDA-ARS) Handbook 537.
- 55- Yang J., Reicher P., Abbaspour KC., Xia J., and Yang H. 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chao he Basin in China. *Journal of Hydrology*, 358 (1-2):1-23.
- 56- Yesuf H. M., Melesse A. M., Zeleke G., and Alamirew T. 2016. Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed. *Environmental Earth Sciences*, 75(9): 806.



Simulation of Stream Flow and Sediment Yield in Fariman Dam Watershed Using SWAT Model and Genetic Algorithm

F. Naseri¹– M. Azari^{2*}– M.T. Dastoorani³

Received: 04-12-2017

Accepted: 17-06-2018

Introduction: Determining the amount of watershed sedimentation and its spatial distribution by using field measurements in practice faces a serious challenge. In recent decades, hydrological models have been widely used by hydrologists and water resource managers as a tool for analysing water resource management systems. The SWAT model is one of the semi-physical and semi-distributed hydrological models that have been widely used in recent years. Despite the wide use of the SWAT, simulation of the sediment has been associated with a large error in comparison to flow. These errors may come from using empirical methods such as the sediment rating curve for estimating sediment based on measured data. Therefore, in this research, the capabilities of the genetic algorithm (GA) were used to optimize the relationship between discharge and sediment and further optimal equation used for calibration and validation of the model.

Materials and Methods: The studied area is Fariman dam watershed with an area of 278.8 km² which is located at latitude of 35 ° 33' to 35 ° 41' and longitude of 59 ° 34' to 59 ° 44' in Razavi Khorasan province. In this study, SWAT model was used to simulate runoff and sediment yield of Fariman dam watershed. In order to run the model, meteorological and hydrometric data including daily rainfall and maximum and minimum temperatures and sediment yield and discharge data, soil and land use maps of the watershed were achieved from relevant resources. The capabilities of the genetic algorithm were used to optimize the discharge -sediment relationship and were compared with sediment rating curve. For this purpose, optimization problem was defined for the genetic algorithm in MATLAB software as a search space of continuous values of the discharge – sediment coefficients. After that, sediment yield was extracted based on discharge data and calculated monthly sediment for SWAT calibration and validation. Sensitivity analysis, calibration and validation of the model were performed using the SUFI-2 algorithm using SWAT-CUP software. For this purpose using high sensitive parameters, the model was calibrated and validated for the period of 1991 to 2000.

Results and Discussion: Optimal coefficients extracted by GA indicate a better performance of the genetic algorithm in estimating the sediment yield. The comparative results of the sediment estimation models, revealed better performance of the genetic algorithm with RMSE = 70.9, NSE = 0.46 and R² = 0.72 than the sediment rating curve. According to sensitivity analysis of SWAT model, twelve parameters for stream flow and seven parameters for sediment yield were found to be sensitive. The most sensitive parameters for stream flow were SCS runoff curve number (CN2), effective hydraulic conductivity in tributary channel (CH_K1) and base flow alpha factor for bank storage (ALPHA_BNK) and the most sensitive parameters for sediment yield were peak rate adjustment factor for sediment routing, USLE equation soil erodibility factor (USLE_K), sediment concentration in lateral flow and groundwater flow (LAT_SED) and exponent parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment routing (SPEXP). The SWAT calibration and validation results showed that the Nash-Sutcliffe efficiency index for monthly sediment and discharge for calibration period was 0.75 and 0.73, respectively and in the validation period was 0.85 and 0.76, respectively. Calibration and validation of the SWAT model was done with genetic algorithm model as an optimal method for deriving sediment data from measured daily discharge. The Nash-Sutcliffe efficiency coefficient for monthly discharge was 0.75 and 0.85 in the calibration and validation periods. Nash-Sutcliffe efficiency coefficients for monthly sediment yield were 0.86 and 0.81 for the same periods. SWAT evaluation results indicate that the model simulation is acceptable for predicting sediment yield and river flow. The performance of SWAT model in predicting of sediment in low flow is poor, which can be due to the effect of the parameters and model simplifications in the simulation of the sediment load.

Conclusions: In this research, simulation of runoff and sediment flow for Fariman dam watershed was performed using SWAT model. For this purpose, the capabilities of the genetic algorithm were used to optimize the relationship between discharge and sediment yields; then the results were used to calibrate and validate the

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor, Department of Range and Watershed Management, College of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, Respectively

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

SWAT model. The results indicate that genetics algorithm can be used for optimizing coefficient of sediment discharge equation and the result is better than sediment rating curve. Simulation of watershed hydrology using SWAT shows that the capability of the model in prediction of sediment yield and water flow is good. Using genetic algorithm to optimize the relationship between discharge and sediment has an important role in extracting daily sediment yield and simulation accuracy of the model. Also, the use of evolutionary algorithms can have a significant role in extracting the discharge -sediment relations, which usually is accompanied with a large error in experimental models such as a sediment rating curve.

Keywords: Evolutionary algorithm, Fariman dam, Sediment yield, Watershed simulation



اعتبارسنجی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم متأثر از تعداد نوبت‌های آبیاری

محمدرضا امداد^{۱*} - آرش تافته^۲ - سعید غالبی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

چکیده

مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در مدیریت‌های مختلف آب و خاک از دقت بالایی برخوردار بوده و استفاده از آن نیازمند واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. این تحقیق در راستای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم در سه پایلوت منتخب در منطقه حمیدیه استان خوزستان و در دو سال زراعی اجرا شد. مدل آکواکراپ برای شرایط سال اول واسنجی و سپس سناریوهای مختلف نوبت‌های آبیاری (۳ تا ۶ نوبت آبیاری) با هم مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مدل نشان داد که در شرایط معمول منطقه، ۴ نوبت آبیاری مناسب‌ترین سناریوی آبیاری می‌باشد. با استفاده از نتایج حاصله از مدل و در نظر گرفتن ۴ نوبت آبیاری، گندم در سال زراعی دوم به‌منظور اعتبارسنجی مدل کاشته شد. متوسط عملکرد دانه گندم اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده پایلوت‌ها در سال دوم به‌ترتیب ۳/۸ و ۴/۴ تن در هکتار حاصل گردید (با خطای ۱۴ درصد). مقایسه شاخص‌های آماری بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عملکرد دانه در هر دو سال نشان داد که ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و شاخص توافق به-ترتیب برابر با ۰/۹، ۰/۱۴ و ۰/۸۹ می‌باشند که بیانگر کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در دو سال متوالی می‌باشد. با در نظر گرفتن تعداد ۴ نوبت آبیاری، کارایی مصرف آب دانه گندم به مقدار ۰/۷ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش یافته که مؤید کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم و در راستای ارتقای کارایی مصرف آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری سطحی، دور آبیاری، کارایی مصرف آب، گندم

مقدمه

محیط‌های مختلف تحقیق نموده‌اند که حسب شرایط نتایج متفاوتی از کاربرد مدل‌ها و کارایی آنها در شبیه‌سازی عملکرد و سایر صفات دیگر گزارش گردیده است.

نتایج تحقیقات تودوروپیک و همکاران (۱۲)، برای مقایسه مدل‌های AquaCrop و WOFOST و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد گیاه آفتابگردان در جنوب ایتالیا نشان داد که مدل AquaCrop به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر نسبت به مدل‌های دیگر ترجیح دارد. این مدل که نسخه اولیه آن در سال ۲۰۰۷ ارائه شده، مدلی فراگیر بوده به این معنا که برای محدوده‌ای از محصولات مختلف زراعی، روغنی و غده‌ای قابل استفاده است (۱۰). مدل AquaCrop بر مبنی فرآیندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شده است و قابلیت شبیه‌سازی و پیش‌بینی مواردی از جمله شبیه‌سازی عملکرد، شبیه‌سازی کارایی مصرف آب در شرایط مدیریت‌های مختلف آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش و مدیریت‌های کم آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد در شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی، خاک و آب در راستای برنامه‌ریزی مناسب به‌منظور مدیریت بهتر آبیاری و ارتقاء کارایی مصرف آب را داراست (۱۱).

نظر به اینکه انجام و اجرای تحقیقات در خصوص تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثر آن بر عملکرد گیاهان مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، لذا استفاده از مدل‌های گیاهی، این امکان را فراهم می‌نماید تا با لحاظ نمودن و اندازه‌گیری برخی پارامترهای مرتبط با آب، خاک و گیاه، عملکرد گیاه در شرایط مختلف شبیه‌سازی شود. در این ارتباط واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها نقش مهم و تأثیرگذاری در کارایی و دقت آن‌ها در مدیریت‌های مختلف داشته و ضروری است به منظور استفاده مناسب از مدل و تعمیم نتایج آن، صحت نتایج آن با اندازه‌گیری‌های مستقیم میدانی کنترل و ارزیابی شود. در این ارتباط محققان بسیاری در زمینه مدل‌ها و کاربرد آنها در

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب استادیاران و مربی، عضو هیئت علمی، بخش تحقیقات آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(* - نویسنده مسئول)

(Email: emdadmr591@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.70189

مونتیا و همکاران (۹) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد سیب زمینی در اسپانیا ارزیابی نمودند. تیمارهای آبیاری اعمال شده عبارت بودند از تیمار ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی که نتایج آنها نشان داد مدل به خوبی در همه این شرایط برآورد مناسبی را از عملکرد نشان می‌دهد. این نتایج نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی روی می‌دهد. تامیا و همکاران (۱۳) مدل AquaCrop را بر روی گیاه گندم در منطقه موراگو بر اساس درجه-روز واسنجی کردند. نتایج نشان داد که مدل می‌تواند مقادیر تبخیر-تعرق را با خطای ۰/۲۲ میلی‌متر بر روز و عملکرد دانه را تا ۰/۰۶ تن در هکتار برآورد کند. از این رو می‌توان از این مدل جهت تعیین عملکرد گیاهان در صورت واسنجی مناسب استفاده نمود. گندوز و همکاران (۵) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم در الجزیره تحت شرایط تنش آبی مورد ارزیابی قرار دادند. سه مزرعه در سه منطقه متفاوت مورد مطالعه قرار گرفتند و اطلاعات آن‌ها برای مدل تعریف گردید. آزمون تی تست نشان داد تفاوت آماری بین نتایج اندازه‌گیری و مقادیر شبیه‌سازی شده وجود ندارد. بنابراین این مدل را برای شرایط طبیعی مزرعه بسیار مناسب ارزیابی نمودند. کومار و همکاران (۸) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه گندم در هند تحت شرایط تنش آبی و شوری مورد ارزیابی قرار دادند. در تحقیق آنها از شوری آب ۴/۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل با خطای ۰/۸۵ در برآورد عملکرد دانه ۰/۷ در تخمین ماده خشک تولیدی عملکرد مناسبی داشته است. از این رو برای شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم با دقت بالا پس از واسنجی می‌توان از آن استفاده نمود. ژانگ و همکاران (۱۴) مدل AquaCrop را بمنظور شبیه‌سازی عملکرد گندم در چین مورد ارزیابی قرار دادند. اطلاعات و داده‌های خاک، آب و دوره‌های رشد گیاهی برای ۷ سال به مدل داده شد. نتایج نشان داد که مدل در تخمین ماده خشک تولیدی بین ۱۶۰ تا ۳۸۰ کیلوگرم در هکتار خطا دارد. همچنین این مدل در تخمین عملکرد دانه بین ۰/۵ تا ۱/۴ تن در هکتار خطا داشت. افشار و نشاط (۲) مدل AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب زمینی در منطقه جیرفت کرمان مورد بررسی قرار دادند. در این ارتباط از سه تیمار آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی استفاده شد. نیاز آبی در این تحقیق بر اساس اطلاعات تشت تبخیر موجود در منطقه تعیین شد. بررسی حساسیت مدل نشان داد که بیشترین حساسیت بر روی زمان پیری برگ‌ها می‌باشد. نتایج آنها نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد سیب زمینی تا ۹ تن خطا نشان می‌دهد. همچنین گزارش کردند که مدل در برآورد کارایی مصرف آب ۱۹/۴ درصد خطا دارد. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل برای تخمین عملکرد مناسب نیاز به داده‌های دقیق و زیادی دارد. عابدینیپور و همکاران (۱) مدل AquaCrop را برای گیاه ذرت در دهلی‌نو (هند) مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه تیمارهای تنش

۵۰، ۷۵ و آبیاری کامل به همراه تیمارهای نیتروژن ۰، ۷۵ و ۱۵۰ کیلوگرم بر هکتار اعمال شدند. سپس مدل برای این شرایط اجرا شده و نتایج نشان داد که مدل با ریشه میانگین مربعات خطا حدود ۰/۱ الی ۰/۷۵ و با دقت قابل قبولی عملکرد کل و دانه را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج نشان داد که مدل بین ۰/۵ تا ۵ درصد در برآوردها خطا داشته و کمترین خطا را در تیمار با آبیاری کامل و کود ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار داشته است. همچنین گزارش گردید که مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب دارای خطای ۲ تا ۲۷ درصد می‌باشد.

گیرتس و همکاران (۴)، در بخش‌های شمالی، مرکزی و جنوبی منطقه Altiplano بولیوی مدل AquaCrop را برای گیاه بومی quinoa تحت سناریوهای مختلف آبیاری واسنجی کردند. نتایج نشان داد که مدل ابزار ارزشمندی برای بررسی و تأثیر تجمعی مکانیسم‌های تحمل به تنش آبی روی گیاه بومی quinoa دارا می‌باشد. همچنین گزارش گردید که عملکرد محصول با در نظرگیری سناریوهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی شده از دقت بالایی برخوردار بوده و کارایی استفاده از مدل در شبیه‌سازی عملکرد مناسب و قابل قبول می‌باشد. اقبال و همکاران (۶)، به منظور بررسی و ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام داد. بطور کلی در اعتبارسنجی مدل، ریشه میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۰/۵۸ تن در هکتار، بیوماس ۰/۸۷ تن در هکتار، تبخیر-تعرق واقعی ۳۳/۲ میلی‌متر و رطوبت حجمی خاک ۳۷/۶-۲۴/۵ میلی‌متر بود. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop مدلی قابل اطمینان جهت شبیه‌سازی تولید و عملکرد در دشت شمالی چین می‌باشد. خلیلی و همکاران (۷)، شبیه‌سازی عملکرد گندم دیم را با استفاده از مدل AquaCrop در ایستگاه تحقیقات کشاورزی سیسب خراسان شمالی انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی قابلیت مدل‌سازی عملکرد محصول را در شرایط دیم دارا می‌باشد. ضیائی و همکاران (۱۵)، عملکرد مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize را بمنظور شبیه‌سازی اجزای بیلان آب خاک و عملکرد ذرت در منطقه کرج (بافت لومی) بررسی نمودند. نتایج نشان داد، عملکرد هر دو مدل مناسب بوده است. شاخص RMSE در برآورد عملکرد محصول برای مدل‌های AquaCrop و CERES-Maize به‌ترتیب بین ۲۰ تا ۴۰ و ۲۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد. با توجه به نتایج خروجی نهایتاً مدل AquaCrop برای استفاده کشاورزان و برنامه‌ریزان در سطح منطقه توصیه گردید.

بابازاده و سرائی (۳)، به منظور ارزیابی مدل AquaCrop در منطقه کرج بر روی گیاه سویا در سال زراعی ۱۳۷۸ (خاک لومی) آزمایشی با ۴ تیمار آبیاری کامل، کم آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبتی خاک و آبیاری موضعی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد رطوبت اجرا کردند. در همه تیمارها عملکرد محصول، تبخیر-تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب سویا شبیه‌سازی قابل قبولی (با درصد خطای کم)

پایین بوده و نیز قابلیت مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم با نوبت‌های آبیاری بررسی نشده است، لذا در این مقاله پس از واسنجی مدل، سناریوهای مختلف مدیریتی آبیاری از نظر نوبت‌های آبیاری (با توجه به تعداد آبیاری‌های معمول منطقه حمیدیه خوزستان) بعنوان یک متغیر در نظر گرفته شده و تأثیر نوبت‌های آبیاری بر عملکرد گندم در منطقه حمیدیه بمنظور اعتبارسنجی مدل و ارایه سناریو مناسب مدیریتی آبیاری مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در استان خوزستان (شهرستان حمیدیه - رامسه) بمدت دو سال زراعی اجرا (۱۳۹۳-۱۳۹۴ و ۱۳۹۴-۱۳۹۵) گردید. در این ارتباط سه قطعه متفاوت به مساحت حدود ۱۰ هکتار در منطقه رامسه حمیدیه انتخاب و نسبت به نمونه‌برداری، اندازه‌گیری و تعیین پارامترهای خاک، آب، گیاه، مدیریت آبیاری (اطلاعات مورد نیاز مدل آکواکراپ) و شرایط موجود منطقه اقدام گردید. در هر قطعه ۱۰ هکتاری یک مزرعه (جمعا سه مزرعه) به مساحت حدود ۲۰۰۰ متر مربع (عرض نوار ۸ الی ۱۰ متر و طول نوار ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر) در قطعات مورد نظر انتخاب و نسبت به برداشت اطلاعات خاک، آب، گیاه و مدیریت آبیاری در مزارع منتخب اقدام گردید. رقم گندم مورد استفاده چمران و تاریخ کاشت گندم در منطقه ۱۵ آبان ماه ۱۳۹۳ بود. کوددهی در دو نوبت در مراحل پنجه‌زنی و گلدهی و در هر کدام از مراحل حدود ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار از کود اوره بود.

را ارائه داد (با درصد خطا کمتر از ۴/۶ درصد). ماکزیمم خطا در تیمار آبیاری کامل (تیمار شاهد) ۵/۹۷ گزارش شد.

استان خوزستان با ۸/۸ درصد سهم در سطح برداشت محصولات زراعی، بیشترین سطح برداشت شده را نسبت به استان‌های دیگر به خود اختصاص داده است. همچنین این استان با سهم ۱۲ درصد از تولید گندم کشور در جایگاه نخست تولید این محصول قرار گرفته است.

نظر به اینکه مدل آکواکراپ مدلی با تمرکز بر آبیاری و سناریوهای متفاوت و تأثیرگذار بر آبیاری بوده که بر اساس آن شبیه سازی عملکرد صورت می‌پذیرد لذا صحت و دقت استفاده از این مدل در راستای اعمال سناریوهای متفاوت و تأثیرگذار آبیاری مستلزم کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل می‌باشد. با توجه به اینکه امکان اعمال سناریوهای اجرایی آبیاری در عملیات میدانی امکان‌پذیر نمی باشد لذا استفاده از این مدل این امکان را فراهم می‌آورد تا پس از واسنجی و صحت‌سنجی بتوان از این مدل در شرایط متفاوت استفاده نمود. با توجه به اینکه تعداد نوبت‌های آبیاری یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر عملکرد می‌باشد و در منطقه مورد مطالعه تعداد نوبت‌های آبیاری (با توجه به تخصیص آب به زارعین) تغییر می‌کند و این موضوع عملکرد گندم را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، بنابراین این پژوهش با هدف واسنجی و اعتبارسنجی این مدل و در راستای تأثیر تعداد نوبت‌های آبیاری بر عملکرد گندم منطقه (کشت غالب) و ارائه توصیه‌های مدیریتی آبیاری در این ارتباط اجرا و پیاده‌سازی شده است. با توجه به اینکه تعداد نوبت‌های آبیاری نقش مهمی در عملکرد گندم داشته و کارایی مصرف آب در بیشتر مزارع گندمکاری منطقه

جدول ۱- اطلاعات گیاهی گندم در مزارع منتخب

Table 1- Wheat plant information in selected pilots

اطلاعات فیزیولوژی گندم در مراحل رشد	محدوده تغییرات صفات اندازه‌گیری شده
Physiological information of wheat	Rang of variation
کاشت تا ظهور گیاه	10-14 days
Planting to emergence	
کاشت تا رسیدن به ماکزیمم پوشش	95-105 days
Planting to maximum canopy cover	
کاشت تا پیر شدن برگ‌ها	135-145 days
Planting to leaf senescence	
کاشت تا رسیدن (قابل برداشت شدن)	160-170 days
Planting to ripening	
کاشت تا رسیدن به ماکزیمم عمق ریشه‌ها	100-110 days
Planting to maximum root depth	
طول دوره گلدهی	10-14 days
Length of Flowering stage	
کاشت تا گلدهی	105-115 days
Planting to flowering	
ماکزیمم عمق ریشه‌ها	0.3-0.35 m
Maximum root depth	

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع منتخب

Table 2- Some chemical and physical soil properties in pilots

عمق Depth (cm)	Soil Texture بافت خاک	PWP (% Θ_v)	FC (% Θ_v)	OC (%)	pH	SAR	EC (dS.m ⁻¹)	Pb (g. cm ⁻³)
0-30	Clay Loam	19.0	31.9	0.5	7.8	4.3	4.5	1.48
30-60	Clay Loam	23.0	36.4	0.3	7.8	5.1	5.0	1.53

جدول ۳- ویژگی‌های کیفی آب آبیاری در پایلوت‌های منتخب

Table 3- Irrigation water quality in selected pilots

SAR	Na ⁺ meq/lit	Mg ⁺⁺ meq/lit	Ca ⁺⁺ meq/lit	HCO ₃ ⁻ meq/lit	pH	EC dS/m
3.0	8	7.5	7.0	1.7	7.9	1.9

جدول ۴- تعداد و حجم آب آبیاری گندم در مراحل مختلف رشد در پایلوت‌های مورد نظر (سال اول)

Table 4- Number and volume of irrigations in different growth stage (in the first year)

نوبت‌های آبیاری Number of irrigation	1	2	3	4	5
مرحله رشد Growth stage	کاشت Planting	پنجه‌دهی Tillering	ساقه‌دهی Stem elongation	گلدهی Flowering	پر شدن دانه Grain filling
Volume of irrigation water (m ³ /ha) حجم آب آبیاری	2000	1800	1800	2000	1900
Irrigation water salinity (dS/m) شوری آب آبیاری	6.5	6.5	6.5	1.9	1.9

فروردین ماه سال بعد به وقوع پیوست. جدول ۲ نتایج برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع منتخب را ارائه می‌کند. همانگونه از جدول ۳ ملاحظه می‌گردد کیفیت آب آبیاری با میانگین شوری آب ۱/۹ دسی زیمنس بر متر از نظر شوری مناسب می‌باشد. طبق طبقه‌بندی ویلکوکس این آب در کلاس C₃-S₁ (شوری زیاد و نسبت جذبی سدیمی کم) قرار گرفته و محدودیتی برای کاشت گندم و تأثیری بر کاهش عملکرد ایجاد نمی‌کند. تعداد نوبت‌های آبیاری و متوسط حجم آب آبیاری داده شده به گندم در مراحل مختلف رشد در جدول ۴ ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد در سال اول تعداد ۵ نوبت آبیاری (با حجم کل ۹۵۰۰ متر مکعب در هکتار) در مراحل مختلف در اختیار گیاه قرار گرفته است.

درصد جوانه‌زنی، تعداد روز از کاشت بذر تا ظهور، تعداد روز از کاشت تا رسیدن به ماکزیم پوشش، تعداد روز از کاشت تا پیرشدن برگ‌ها، تعداد روز از کاشت تا رسیدن، طول دوره گلدهی، تعداد روز از کاشت تا گلدهی، ماکزیم عمق مؤثر ریشه‌ها، تعداد روز از کاشت تا رسیدن به ماکزیم عمق ریشه‌ها، عملکرد کل، عملکرد دانه، شاخص برداشت، اندازه‌گیری عملکرد خشک گیاهی در مزارع منتخب در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری و یادداشت‌برداری شد و بمنظور واسنجی مدل آکواکراپ مورد استفاده واقع شد. نتایج اطلاعات گیاهی اخذ شده در پایلوت‌های مورد نظر در جدول ۱ ارائه شده است.

با توجه به نتایج بدست آمده محدوده زمان جوانه‌زنی، پنجه‌زنی، ساقه‌دهی، گلدهی، پر شدن دانه و رسیدن گندم در منطقه حمیدیه بترتیب در ۲۷ آبان، ۲۰ آذر، ۲۲ دی، ۲۵ بهمن، ۲۰ اسفند و ۲۵

جدول ۵- میانگین عملکرد دانه و کل گندم اندازه‌گیری شده در مزارع

Table 5- Average measured grain and total yield of wheat in the farms

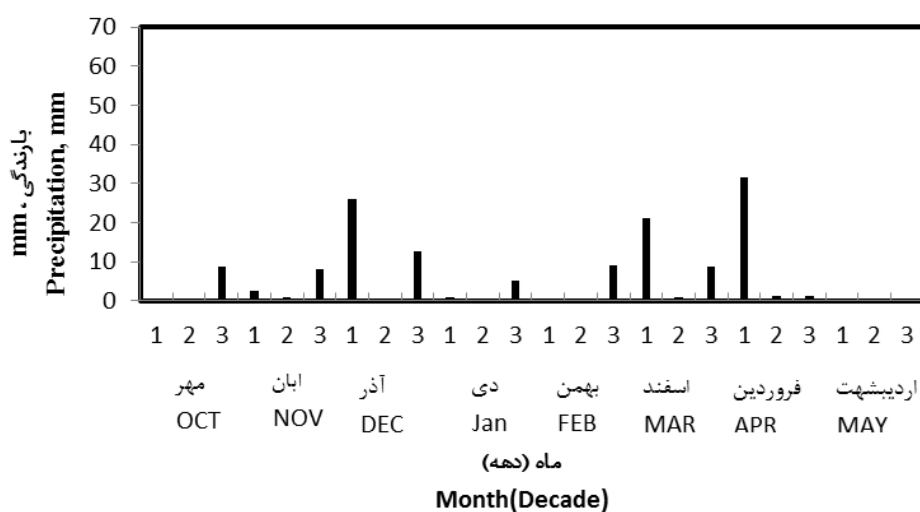
Selected pilots پایلوت‌های منتخب	Total yield عملکرد کل Kg/ha	Grain yield عملکرد دانه Kg/ha	HI شاخص برداشت %
مزرعه ۱	7433	3057	0.41
مزرعه ۲	8163	3219	0.39
مزرعه ۳	6704	2895	0.43
میانگین	7434	3057	0.41

توسط مدل آکواکراپ، اطلاعات و آمار هواشناسی روزانه در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳ (شامل درجه حرارت ماکزیمم و مینیمم، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی) به همراه آمار بارندگی از ایستگاه هواشناسی سینوپتیک اهواز با طول و عرض جغرافیایی به ترتیب 30° و 48° و 48° و 48° اخذ و مورد پردازش قرار گرفت. شکل ۱ و ۲ تغییرات بارش را به تفکیک ماه‌های مختلف (به صورت دهه) به‌ترتیب برای سال زراعی ۹۴-۹۳ و ۹۵-۹۴ نشان می‌دهد. مقدار کل بارندگی در بازه زمانی مهر تا اردیبهشت ماه برای سال اول و دوم به ترتیب ۱۳۷/۳ و ۲۲۸ میلی‌متر بوده است.

در هر یک از پایلوت‌های منتخب برداشت گندم در سه تکرار و در سطح یک متر مربع در هفته اول اردیبهشت ماه ۱۳۹۴ انجام شد. جدول ۵ متوسط نتایج عملکرد دانه و کل گندم برداشت شده در پایلوت‌های منتخب را در منطقه حمیدیه ارائه می‌نماید.

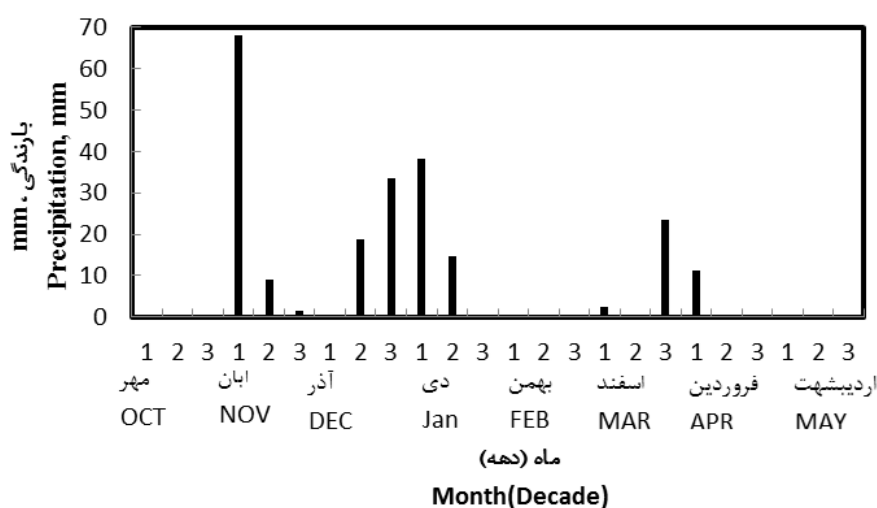
همانگونه که ملاحظه می‌گردد در سال اول متوسط عملکرد دانه گندم حدود ۳ تن در هکتار (با شاخص برداشت ۰/۴۱ درصد) می‌باشد. با توجه به میانگین عملکرد دانه و حجم آب مصرفی در پایلوت‌های مورد نظر، متوسط کارایی مصرف آب در مزارع مورد نظر حدود ۰/۳۳ کیلوگرم دانه بر متر مکعب آب مصرفی می‌باشد.

بمنظور شبیه‌سازی تغییرات عملکرد گندم با نوبت‌های آبیاری و



شکل ۱- توزیع بارندگی در دهه‌های مختلف فصل کشت گندم (۹۴-۹۳)

Figure 1- Distribution of rainfall for different decades of wheat (2014-2015)



شکل ۲- توزیع بارندگی در دهه‌های مختلف فصل کشت گندم (۹۵-۹۴)

Figure 2- Distribution of rainfall for different decades of wheat (2015-2016)

شده عملکرد گندم بدست آمده با مدل قرابت و همخوانی بالایی با مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد داشته و می‌توان در شبیه‌سازی سناریوهای مختلف آبیاری از آن استفاده نمود. با توجه به جدول ۶ که ارتباط بین نوبت آبیاری (۳ تا ۶ نوبت) و عملکرد دانه، حجم آب مصرفی و کارایی مصرف آب گندم را در پایلوت‌های مورد نظر نشان می‌دهد ملاحظه می‌گردد مقدار عملکرد دانه و کل در ۴ نوبت آبیاری با مقادیر متناظر در ۵ نوبت آبیاری تفاوت ندارد. نوبت‌های آبیاری در نظر گرفته شده مطابق نوبت‌های آبیاری معمول منطقه در مراحل کاشت، پنجه‌دهی، ساقه‌دهی، گلدهی و پرشدن دانه بودند (۵ نوبت) که برای ۴ نوبت آبیاری مرحله پنجه‌دهی و برای ۳ نوبت آبیاری مرحله پنجه و ساقه‌دهی حذف گردیدند.

همچنین برای ۶ نوبت آبیاری، ۱ نوبت آبیاری در مرحله رسیدن در نظر گرفته شد. جهت مقایسه عملکرد، مقادیر متوسط شبیه‌سازی شده سه پایلوت در جدول ۷ نشان داده شده است.

نتایج جدول ۷ نشان می‌دهد که میانگین مقادیر عملکرد کل و دانه گندم شبیه‌سازی شده در ۴ و ۵ نوبت آبیاری تفاوت نداشته، در حالی که حجم آب مصرفی در ۴ نوبت آبیاری به میزان ۲۰ درصد نسبت به ۵ نوبت آبیاری کاهش داشته است. از طرف دیگر کارایی مصرف آب در ۴ نوبت آبیاری به میزان ۲۱ درصد نسبت به ۵ نوبت آبیاری افزایش داشته است.

در این ارتباط با توجه به اطلاعات هواشناسی و داده‌های گیاهی و مزرعه‌ای اندازه‌گیری شده که از سطح مزارع در سال اول برداشت شده بود، مدل آکواکراپ واسنجی و تغییرات عملکرد در نوبت‌های مختلف آبیاری با استفاده از مدل شبیه‌سازی شد. بمنظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی شده توسط مدل، مناسب‌ترین سناریو ارائه شده توسط مدل در سال دوم (۹۴-۹۵) در سطح مزارع منتخب اجرا و نتایج حاصل از آن با نتایج شبیه‌سازی توسط مدل مورد مقایسه و ارزیابی واقع شد.

نتایج و بحث

از اطلاعات اندازه‌گیری شده زراعی و گیاهی پایلوت‌ها بمنظور واسنجی مدل آکواکراپ استفاده گردید. از این رو با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده مورد نیاز مدل، شبیه‌سازی در شرایط مختلف نوبت‌های آبیاری انجام پذیرفت. بمنظور مقایسه تغییرات عملکرد دانه گندم با در نظرگیری نوبت‌های مختلف آبیاری (۳ تا ۶ نوبت آبیاری متعارف در منطقه) در پایلوت‌های مختلف، سناریوهای مختلف مدیریتی از نظر نوبت‌های آبیاری اعمال و نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد و سایر اجزا در جدول ۶ ارائه گردیده است. محدوده مقدار شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم در شرایط معمول منطقه (۵ نوبت آبیاری) بین ۲/۴ تا ۲/۹ تن در هکتار (با متوسط ۲/۶ تن در هکتار) بوده که با مقدار اندازه‌گیری شده آن (۳ تن در هکتار) تفاوت چندانی ندارد (با متوسط خطای ۱۳ درصد). بنابراین همانگونه که ملاحظه می‌گردد نتایج شبیه‌سازی

جدول ۶- تغییرات عملکرد گندم شبیه‌سازی شده با اعمال نوبت‌های مختلف آبیاری با مدل آکواکراپ
Table 6- Variation of simulated wheat yield with irrigation events using Aquacrop model

پایلوت Pilots	Irrigation No. نوبت آبیاری	Consumed water حجم آب مصرفی m ³ / ha	ET تبخیر - تعرق mm	Total yield عملکرد کل 1000 kg /ha	Grain yield عملکرد دانه 1000 kg /ha	WUE کارایی مصرف آب Kg/m ³
1	3	5800	234	4.7	1.9	0.33
	4	7600	258	5.8	2.4	0.31
	5	9400	270	5.8	2.4	0.26
	6	11200	297	6.0	2.5	0.22
2	3	5800	272	6.2	2.5	0.43
	4	7600	309	7.2	2.9	0.38
	5	9400	323	7.2	2.9	0.31
	6	11200	333	7.2	2.9	0.26
3	3	5800	267	5.6	2.2	0.38
	4	7600	302	6.6	2.6	0.34
	5	9400	329	6.7	2.6	0.28
	6	11200	328	6.6	2.6	0.23

جدول ۷- متوسط نتایج تغییرات عملکرد گندم شبیه‌سازی شده با اعمال نوبت‌های مختلف آبیاری توسط مدل AquaCrop

Table 7- Mean simulated wheat yield with irrigation events using Aquacrop model					
Irrigation No.	Consumed water	ET	Total yield	Grain yield	WUE
نوبت آبیاری	حجم آب مصرفی m ³ / ha	تبخیر- تعرق mm	عملکرد کل 1000 kg /ha	عملکرد دانه 1000 kg /ha	کارایی مصرف آب Kg/m ³
3	5800	258	5.5	2.2	0.38
4	7600	290	6.5	2.6	0.34
5	9400	307	6.5	2.6	0.28
6	11200	319	6.6	2.7	0.24

عملکرد دانه گندم، در سال دوم (۹۴-۹۵) اطلاعات آب مصرفی و عملکرد در سه مزرعه منتخب اندازه‌گیری (با توجه به نتایج سال اول در ۴ نوبت آبیاری) و با توجه به شرایط اقلیمی سال دوم با نتایج مدل مورد بررسی و ارزیابی واقع شد. نتایج حجم آب آبیاری به همراه کیفیت آب آبیاری در نوبت‌های آبیاری در سال دوم در جدول ۸ ارائه شده است.

در هر یک از پایلوت‌های منتخب برداشت گندم در سه تکرار و در سطح یک متر مربع در هفته اول اردیبهشت ماه ۱۳۹۵ انجام شد. جدول ۹ متوسط نتایج عملکرد دانه و کل گندم برداشت شده در پایلوت‌های منتخب را در منطقه حمیدیه در سال دوم ارائه می‌نماید.

همچنین با توجه به شبیه‌سازی انجام شده ملاحظه می‌گردد که افزایش یک نوبت آبیاری در مرحله رسیدن (فروردین ماه) ضمن اینکه افزایش قابل توجهی در عملکرد دانه و کل ایجاد نکرد، کارایی مصرف آب را به جهت افزایش آب مصرفی (یک نوبت آبیاری) کاهش داد. همچنین در نظریه ۳ نوبت آبیاری موجب کاهش عملکرد دانه به میزان ۱۵ درصد گردید. با عنایت به کاهش عملکرد زیاد در سه نوبت آبیاری نسبت به نوبت‌های بیشتر آبیاری، این سناریو از نظر عملکرد توصیه نمی‌گردد. لذا طبق شبیه‌سازی انجام شده حداقل ۴ نوبت آبیاری (در مراحل کاشت، ساقه‌دهی، گلدهی و پرشدن دانه) جهت حفظ سطح تولید مناسب در شرایط موجود قابل توصیه می‌باشد. بمنظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی

جدول ۸- تعداد و حجم آب آبیاری گندم در مراحل مختلف رشد در پایلوت‌های منتخب (سال ۹۴-۹۵)

Table 8- Number and Volume of wheat irrigation water in different growth stage in selected pilots (2014-2015)

نوبت‌های آبیاری	1	2	3	4
No irrigation				
Growth stages	کاشت	ساقه‌دهی	گلدهی	پر شدن دانه
مرحله رشد	Planting	Stem elongation	Flowering	Grain filling
Irrigation volume (m ³ /ha) حجم آب آبیاری	1450	1400	1200	1450
Irrigation water salinity (dS/m) شوری آب آبیاری	1.9	1.9	1.9	1.9

جدول ۹- میانگین عملکرد دانه و کل گندم اندازه‌گیری شده در مزارع منتخب (سال دوم)

Table 9- Number and volume of irrigations in different growth stage (second year)

Selected pilots	Total yield	Grain yield	HI
پایلوت‌های منتخب	عملکرد کل 1000kg /ha	عملکرد دانه 1000kg /ha	شاخص برداشت %
مزرعه 1	12.1	4.5	0.37
مزرعه 2	11.1	4.2	0.38
مزرعه 3	12.0	4.4	0.36
میانگین	11.7	4.4	0.37

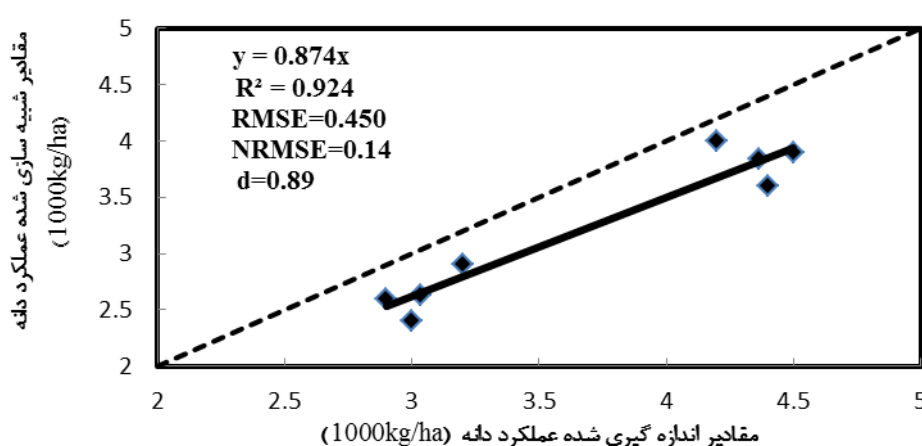
دوم می‌باشد که به دنبال آن عملکرد شبیه‌سازی شده نیز در سال اول کمتر از سال دوم بدست آمده است. با توجه به اینکه در سال اول تحقیق بدلیل تخصیص نامناسب و عدم تأمین حجم آب مورد نیاز، در سه نوبت اول از تلفیق آب آبیاری و آب زهکش استفاده گردید که موجب شد شوری آب آبیاری از ۱/۹ به ۶/۵ دسی زیمنس بر متر افزایش یابد (جدول ۴). به عبارت دیگر استفاده از آب شور در سه نوبت آبیاری موجب گردید تا عملکرد محصول کاهش یافته و نسبت به عملکرد سال دوم (با شوری آب ۱/۸ دسی زیمنس بر متر) تفاوت داشته باشد که نتایج ارائه شده از این مدل نیز مؤید این تغییرات می‌باشد. همچنین از دیگر عوامل تغییرات عملکرد در دوسال مختلف مقدار بارندگی بوده که در سال اول ۱۳۷ و در سال دوم به ۲۲۸ میلی متر افزایش یافته است که این نیز موجب افزایش عملکرد گندم در سال دوم شده است که بیانگر کارایی مدل آکواکراپ در نتیجه این تغییرات (با توجه به نتایج شکل ۳) می‌باشد.

همانگونه که ملاحظه می‌گردد میانگین عملکرد دانه گندم در سال دوم ۴/۴ تن در هکتار شده است. نتایج شبیه‌سازی شده عملکرد در سال دوم توسط مدل آکواکراپ در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱۰ ملاحظه می‌گردد که متوسط عملکرد دانه گندم شبیه‌سازی شده مقدار ۳/۸ تن در هکتار گردیده که نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده آن ۱۴ درصد عملکرد دانه را کمتر از شرایط واقعی پیلوت‌ها برآورد می‌کند و بیانگر دقت و کارایی مناسب این مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط حاضر می‌باشد. روند تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در دو سال زراعی در شکل ۳ ارائه شده است. همانگونه که از شاخص‌های آماری ارائه شده در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده و شاخص توافق به ترتیب برابر با ۰/۹، ۰/۱۴ و ۰/۸۹ می‌باشند که بیانگر عملکرد و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم در دو سال متوالی می‌باشد. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، عملکرد اندازه‌گیری شده در سال اول کمتر از مقادیر عملکرد گندم در سال

جدول ۱۰- تغییرات عملکرد گندم شبیه‌سازی شده پیلوت‌ها با اعمال ۴ نوبت آبیاری توسط مدل AquaCrop در شرایط سال دوم

Table 10- Variation of simulated wheat yield with considering four irrigation events using model (second year)

پیلوت	Consumed water حجم آب مصرفی m ³ /ha	ET تبخیر - تعرق mm	Total yield عملکرد کل 1000kg /ha	Grain yield عملکرد دانه 1000kg /ha	WUE کارایی مصرف آب Kg/m ³
1	5500	271	8.9	3.9	0.71
2	5500	287	9.4	4.0	0.73
3	5500	291	9.0	3.6	0.65
میانگین	5500	283	9.1	3.8	0.70



شکل ۳- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه توسط مدل آکواکراپ با خط یک به یک

Figure 3- Comparison between measured and simulated grain yield using Aquacrop with 1:1 line

نتیجه‌گیری

با دقت مناسب) حائز اهمیت است. نتایج این تحقیق نشان داد که شبیه‌سازی عملکرد گندم در سال اول (۲/۶ تن در هکتار) قرابت و نزدیکی مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد (۳ تن در هکتار) دارد. همچنین اعتبارسنجی مدل با تغییر شرایط در سال دوم نشان داد که عملکرد شبیه‌سازی شده گندم (۴/۴ تن در هکتار) نیز با مقدار اندازه‌گیری شده آن (۳/۸ تن در هکتار) همخوانی مناسبی داشته که بیانگر دقت بالای این مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم در هر دو سال می‌باشد. بنابراین این مدل کارایی و دقت مناسبی در شبیه‌سازی عملکرد گندم در شرایط پژوهش داشته است.

با توجه به اینکه تغییرات شرایط اقلیمی بخصوص بارندگی و کیفیت آب آبیاری (از نظر شوری) تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد گیاهان بوجود می‌آورند، لذا پیش‌بینی و شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط متفاوت اقلیمی، آب و خاک با استفاده از مدل‌های معتبر و قابل توصیه از اهمیت شایانی برخوردار است. نظر به اینکه مدل آکواکراپ جنبه‌های مختلف آب، خاک و گیاه را به صورت توأم در نظر گرفته و تمرکز آن بر مدیریت آب و آبیاری می‌باشد، بنابراین واسنجی و اعتبارسنجی این مدل در شرایط مختلف بمنظور شبیه‌سازی عملکرد

منابع

- 1- Abedinpour M., Sarangib Rajputb A., Man Singhb T.B.S., Pathakc H., and Ahmadd T. 2012. Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*. 110, Pages 55–66.
- 2- Afshar A., and Neshat A. 2013. Evaluation of Aqua Crop computer model in the potato under irrigation management of continuity plan of Jiroft region, Kerman, Iran. *International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research*, 1(12): 1669-1678.
- 3- Babazadeh H., and Sarai Tabrizi M. 2011. Assessment of AquaCrop Model under Soybean Deficit Irrigation Management Conditions. *Journal of Water and Soil*, 26(2):329-339. (In Persian with English abstract)
- 4- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J.A., Taboada C., Mendoza J., Huanca R., Mamani A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V., and Steduto P. 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101: 499–508.
- 5- Guendouz A., Hafsi M., Khebbat Z., and Achiri A. 2014. Performance evaluation of aquacrop model for durum wheat (*Triticum durum* Desf.) crop in semi-arid conditions in Eastern Algeria. *International Journal of Microbiology and Applied Sciences*, 3. 2. 168-176.
- 6- Iqbal M., Shen Y., Stricevic R., Pei H., Sun H., Amiri E., Penas A., and Del Rio S. 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*, 135:61-72.
- 7- Khalili N., Davari K., Alizadeh A., Najafi M., and Ansari H. 2014. Simulation of rainfed wheat yield using AquaCrop model, Case study: Sisab rainfed researches station, Northern Khorasan. *Journal of Water and Soil*, 28 (5), 930-939. (In Persian with English abstract).
- 8- Kumar P., Sarangi A., Singh D.K., and Parihar S.S. 2014. Evaluation of aquacrop model in predicting wheat yield and water productivity under irrigated saline regimes, irrigation and drainage. 63, pages 474–487.
- 9- Montoya F., Camargo D., Ortega J.F., Córcoles J.I., and Domínguez A. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 164, Part 2, Pages 267–280.
- 10- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
- 11- Steduto P., Hsiao T. C., Raes D., and Fereres E. 2009. "AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles." *Journal of Agronomy*, 101:426–437.
- 12- Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M., Stocle C., and Steduto P. 2009. Assessment of Aquacrop, Cropsyst, and Wofost models in the simulation of sunflower Growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101: 509-521.
- 13- Toumia J., Er-Rakib S., Ezzahar J., Khabba S., Jarland L., and Chehbounid A. 2016. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*. 163, Pages 219–235.
- 14- Zhang W.L., Liu W., Xue Q., Chen J., and Han X. 2013. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. *Water Science Technology*, 68(4):821-8.
- 15- Ziaii G., Babazadeh H., Abbasi F., and Kaveh F. 2014. Evaluation of the Aquacrop and CERES-Maize Models in Assessment of Soil Water Balance and Maize Yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(4):435-445. (In Persian with English abstract).



Validation of Aquacrop Model for Simulating Wheat Yield in Different Irrigation Events

M. R. Emdad^{1*}- A. Tafteh²- S. Ghalebi³

Received: 30-01-2018

Accepted: 03-06-2018

Introduction: Simulation models have been used for decades to analyse crop responses to environmental stresses. AquaCrop is a crop water productivity model developed by the Land and Water Division of FAO. It simulates yield response to water of herbaceous crops, and is particularly suited to address conditions where water is a key limiting factor in crop production. It is designed to balance simplicity, accuracy and robustness, and is particularly suited to address conditions where water is a key limiting factor in crop production. AquaCrop is a companion tool for a wide range of users and applications including yield prediction. AquaCrop has high accuracy and performance for yield prediction than other models regarding to irrigation and fertilizer management base foundation. Using AquaCrop model for crop yield simulation in different soil and water managements has high accuracy and its use requires calibration and validation. The use of models saves time and cost and, if calibrated and validated, acceptable results are expected.

Material and Methods: This research was carried out in order to calibrate and validate the AquaCrop model for simulating wheat grain yield in the three selected pilots in Hamidiyeh province of Khuzestan province in two years of cultivation. In this regard, three different plots with a total area of about 10 hectares were selected in Hamidiyeh region. Sampling, measuring and determining the parameters of soil, water, plant, irrigation management (information required for the AquaCrop model) and the existing conditions of the area were carried out. The climatic data required in AquaCrop model was collected from synoptic meteorological weather station of Ahvaz. Irrigation water quality with mean water salinity of 1.9 dS/m has a good quality for irrigation. In the first year, 5 irrigation events (with a total volume of 9500 cubic meters per hectare) are available to the wheat plant at different stages. In this regard, based on meteorological data and field and vegetation data that was taken from the field level in the first year, the AquaCrop model calibration and performance variations were carried out at different times of irrigation using a simulation model. In order to validate the results simulated by the model, the best scenario provided by the model in the second year was implemented at selected farm level and its results were compared with the simulation results by the model.

Results and Discussion: AquaCrop model calibrated for the first year and then compared for different scenarios of irrigation timing (3-6 irrigation event). The amount of grain yield and total in 4 irrigation intervals are not different with the corresponding values in 5 irrigation intervals. Irrigation rotations were considered in accordance with routine irrigation rotations of the region during planting, tillering, stemming, flowering and seed filling (5 turns) for 4 steps of irrigation step and for 3 irrigation stages, the tiller and stem elongation was deleted. The model showed that, using four irrigation timing is the most appropriate irrigation scenario. Using the results of the model with considering 4 irrigation times, wheat was planted in the second year for model validation. In the second year, the average of measured and simulated wheat grain yield was 3.8 and 4.4 t/h (with 14% error). Average values of total yield and simulated wheat seeds in 4 and 5 irrigation intervals were not different, while the amount of water consumed in 4 irrigation intervals decreased by 20% compared to 5 irrigation intervals. On the other hand, water use efficiency increased by up to 21% in 4 irrigation intervals compared to 5 irrigation intervals. Also, according to the simulation, it was observed that increasing the irrigation interval at the arrival stage, while not significantly increasing the grain yield and the total, did not increase the water use efficiency in order to increase the water consumption (one irrigation interval) Reduced. Considering 3 irrigation timing, the grain yield decreased by 15%. Due to the reduced yield in three irrigation intervals than the more irrigation intervals, this scenario is not recommended for performance reasons. So, according to the simulation, at least 4 irrigation intervals (during planting, stemming, flowering and seed filling) are recommended to maintain proper production level in existing conditions. Comparison of statistical indices between measured and simulation values of wheat grain yield in both years showed that the coefficient of correlation, normalized root

1, 2 and 3- Assistant Professors and Instructor of Irrigation and Soil Physics Department, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, Respectively

(*- Corresponding Author Email: emdadmr591@yahoo.com)

mean square error (RMSE) and agreement index were 0.9, 0.14, and 0.89 respectively, which indicates the proper performance of the model for simulating yield of wheat for two consecutive years. The average grain yield of simulated wheat has been estimated at 3.8 ton / ha, which estimates 14% of grain yield less than actual experimental conditions compared to its measured value, indicating the accuracy and efficiency of this model in simulating wheat yield in the present situation. With considering 4 irrigation events, the water use efficiency of wheat grain yield increased by 0.7 kg/m³, which confirms the ability and accuracy of the Aquacrop model for simulating grain yield of wheat and also improving water use efficiency.

Conclusions: The results of this study showed that the simulation of wheat yield in the first year (2.6 t/ha) has a close proximity to the measured values of yield (3 t/ha). Also, validation of the model with changing conditions in the second year showed that the simulated yield of wheat (4.4 t/ha) also had a good agreement with its measured value (3.8 t/ha), which indicates the high accuracy of this model in simulating wheat grain yields every two years. Therefore, this model has the efficiency and accuracy in simulating wheat yield in research conditions.

Keywords: Irrigation interval, Surface irrigation, Water use efficiency, Wheat

بررسی تغییرات شوری پروفیل خاک چهار محصول زراعی دشت قزوین تحت آبیاری تیپ با مدل AquaCrop

هادی رضائی اعتدالی^۱ - مریم پاشازاده^{۲*} - بیژن نظری^۳ - عباس ستوده‌نیا^۴ - عباس کاویانی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

چکیده

به منظور بررسی تغییرات شوری پروفیل خاک ۴ محصول زراعی گندم، ذرت، جو و گوجه‌فرنگی کشت شده در اراضی دشت قزوین با شوری اولیه ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر و با اقلیم گرم و خشک، تحت آبیاری تیپ (قطره‌ای نواری) و طی ۲۰ سال زراعی، ابتدا توزیع شوری با مدل AquaCrop شبیه سازی شده، سپس توسط نرم‌افزارهای Minitab 17 و Excel 2007 مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد، در محصولات ذرت و گوجه‌فرنگی، آبیاری تیپ با شوری آب آبیاری ۱ دسی‌زیمنس بر متر، منجر به افزایش قابل توجه شوری متوسط خاک ناحیه توسعه ریشه از ۱/۵ به ترتیب به ۴ و ۴/۳ دسی‌زیمنس بر متر می‌گردد (معنی‌داری روند در سطح ۵ درصد)، حال آنکه افزایش شوری متوسط ناحیه توسعه ریشه در محصولات گندم و جو در همان حالت، از ۱/۵ به ترتیب به ۲/۰۳ و ۲/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر رسیده که در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیست. علت را می‌توان به نیاز آبی پایین و فیزیولوژی جو و گندم در جذب نمک، نسبت به ذرت و گوجه‌فرنگی نسبت داد که در نتیجه آن آب کمتری وارد خاک شده و در نتیجه شوری کمتری در نتیجه تبخیر آب در زمین تجمع می‌یابد، همچنین وجود بارش در فصل کشت گندم و جو منجر به شستشوی نمک از ناحیه ریشه می‌شود. درستی این فرض از طریق معنی‌داری همبستگی بین بارش و شوری خاک در سطح ۵ درصد آزمون و ثابت گردید. لذا پیشنهاد می‌گردد گندم و جو با مقاومت بالا نسبت به شوری، در اولویت کشت آبیاری موضعی برای نواحی خشک با بارش‌های ناچیز و منابع آبی محدود، قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری تیپ، توزیع شوری، پایداری خاک، محصول زراعی، AquaCrop

مقدمه

اثرات گلخانه‌ای، وابستگی شدید به منابع غیرقابل تجدید و نیاز به حفظ منابع خاک برای استفاده دراز مدت در مقابل بهره‌کشی از خاک برای منفعت کوتاه مدت، بیشتر می‌شود. لذا نیاز به حفظ کیفیت خاک و جلوگیری از تخریب اراضی یا به عبارتی "کشاورزی پایدار"، بیشتر معنی و مفهوم پیدا می‌کند. مدیریت موفق منابع برای رفع نیازهای در حال تغییر بشر همراه با حفظ کیفیت محیط زیست و ذخیره این منابع برای نسل‌های آینده را می‌توان توصیفی از کشاورزی پایدار دانست (۲). از مشکلات بر سر راه کشاورزی پایدار، شور شدن منابع خاک است. شور شدن خاک، فرآیند زمانی و مکانی تخریب خاک است که وسعت و تولید اراضی کشاورزی را کاهش می‌دهد که ناشی از تجمع و رسوب نمک‌های محلول در آب از قبیل کلریدها، سولفات‌ها و کربنات‌های سدیم، منیزیم و یا کلسیم در سطح خاک و آب زیرزمینی می‌باشد (۲). از مشکلات آبیاری تیپ، افزایش شوری خاک است که به مرور زمان و استمرار به کارگیری این روش در اراضی تحت کشت زراعی، بخصوص در نواحی گرم و خشک به علت گرمایش جهانی، تغییر اقلیم و کاهش نزولات جوی، رخ می‌دهد. در این حالت مدیریت

با توجه به نرخ رشد جمعیت و چالش‌های خشکسالی در حال و آینده و رقابت تمام بخش‌ها برای منابع آب، کاربرد سامانه‌های آبیاری با کارایی مصرف آب بالاتر از راهکارهای مؤثر در جهت پایداری توسعه در بخش کشاورزی می‌باشد. در همین راستا در سال‌های اخیر بحث استفاده از روش آبیاری قطره‌ای در گیاهان زراعی در سطح کشور مدنظر قرار گرفته اما استفاده از این سیستم در صورتی با موفقیت همراه خواهد بود که به ارزیابی عملکرد سیستم از نظر پایداری منابع خاک، قبل از اجرا و رفع مشکلات آن پرداخت (۱). روزبه‌روز آگاهی ما در مورد محدودیت زمین‌های قابل کشت دنیا، مشکل فراگیر تخریب خاک، کاهش سریع کیفیت محیط زیست،

۱، ۲، ۳ و ۴ - به ترتیب استادیار، دانشجوی دکتری، استادیار، دانشیار و استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)، قزوین
(*) نویسنده مسئول: Email: Pashazade1387@yahoo.com
DOI: 10.22067/jsw.v32i3.70175

پایدار اراضی کشاورزی زیر سؤال رفته و علی‌رغم صرفه‌جویی در مصرف منابع آب، عملاً استفاده مجدد از اراضی زراعی به‌علت شور شدن خاک سطحی امکان‌پذیر نیست مگر آبخوبی اراضی در دستور کار قرار گیرد (۶). از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به نتایج زیر اشاره نمود:

نتایج تحقیقات اورون و همکاران (۱۹) و فنه و همکاران (۲۰) نشان داد که در آبیاری قطره‌ای سطحی نمک‌هایی که در نزدیکی سطح خاک جمع می‌شوند، می‌توانند روبه پایین حرکت نموده و به ناحیه ریشه برسند و این فرآیند ممکن است از مصرف آب و مواد غذایی جلوگیری کند و بر رشد محصول تأثیر بگذارد. یازار و همکاران (۳۰) بیان کردند با افزایش شوری آب آبیاری تجمع نمک در نیمرخ خاک افزایش یافته و توزیع نمک در نیمرخ خاک در آبیاری قطره‌ای از پیاز رطوبتی پیروی می‌کند و حداکثر شوری در سطح خاک رخ می‌دهد. وان و همکاران (۲۹) طی سه سال آزمایش به مطالعه‌ی اثر آبیاری قطره‌ای با آب شور بر عملکرد محصول و مصرف آب گوجه فرنگی در منطقه‌ی نیمه‌مرطوب شمال دشت چین پرداختند. نتایج نشان داد که شوری آب آبیاری ۱/۱ تا ۴/۹ دسی‌زیمنس بر متر اثرات کمی بر عملکرد گوجه‌فرنگی دارد، اما با افزایش شوری آب آبیاری، مصرف آب گوجه‌فرنگی در طول فصل کاهش یافت و کارایی آب آبیاری مصرفی افزایش یافت. به‌علاوه بعد از سه سال آبیاری با آب شور، شوری خاک در عمق صفر تا ۹۰ سانتی‌متری افزایش نیافت. چن و همکاران (۴) به‌منظور بررسی اثرات و راهکارهای آبیاری قطره‌ای با آب شور برای گیاه آفتابگردان روغنی، آزمایشات مزرعه‌ای دوساله‌ای را در کشور چین انجام دادند. شوری خاک با افزایش شوری آب آبیاری در آغاز افزایش یافت اما شوری خاک در عمق صفر تا ۱۲۰ سانتی‌متر می‌تواند در سال آبیاری بعدی با اعمال آب شور در سطح ثابت نگه داشته شود. عنابی میلانی و همکاران (۳) نشان دادند که آبیاری با آب غیرشور (۲۰۰/۴) دسی‌زیمنس بر متر، به‌طور قابل‌توجهی شوری نیمرخ خاک را کاهش می‌دهد و آبیاری با آب شور (۱۱/۳ - ۱۰/۱) دسی‌زیمنس بر متر باعث افزایش شوری در نیمرخ سطحی خاک می‌شود و نیز تأثیر آبیاری با آب لب‌شور (۴/۷ - ۴/۲) دسی‌زیمنس بر متر در تغییر شوری نیمرخ خاک به‌دلیل اعمال نیاز آبخوبی محسوس نبود. نتایج تحقیق حسن‌لی (۸) نشان داد، استفاده از آب شیرین در سیستم نواری قطره‌ای به‌منظور آبیاری گیاه ذرت، تغییری چشم‌گیر در مقدار شوری خاک در مدت دو سال زراعی ایجاد نمی‌کند. در حالی که آبیاری با آب شور باعث افزایش شوری خاک بخصوص در لایه سطحی، در نتیجه تبخیر آب و تجمع املاح در خاک می‌گردد. در مجموع با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده می‌توان گفت که شوری آب آبیاری باعث کاهش در عملکرد محصول و تجمع نمک در نیمرخ خاک خواهد شد (۹).

معمولاً مطالعات مزرعه‌ای هزینه‌بر و وقت‌گیر هستند. مدل‌های

گیاهی راه‌کاری مفید برای مطالعات و ارزیابی‌های اولیه هستند. مدل‌های شبیه‌سازی که اثر آب و شوری و سایر پارامترها را روی عملکرد گیاه تخمین می‌زنند، ابزاری مناسب در مدیریت آبیاری می‌باشند. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل‌ملاحظه کاهش داده و آنها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده‌است (۲۷). دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های مورد نیاز بستگی داشته و در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها می‌توانند بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در تحقیقات صحرایی و صرف هزینه و زمان کمتر جهت ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به‌کار گرفته‌شوند (۲۳). بنابراین این مدل‌ها توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به‌صورت گسترده بر روی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری و استفاده از آب شور تحت شرایط مختلف تأمین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نمایند (۱۴). در چند دهه گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه معرفی و به‌کار برده شده‌اند از جمله می‌توان به مدل SWAP اشاره نمود که بر اساس معادلات جریان آب و املاح در خاک (معادله ریچاردز) عمل می‌کند و از مدل‌های کاربردی برای توازن آب و املاح در شرایط وجود پوشش گیاهی و همچنین برای مدیریت آبیاری می‌باشد (۱۳). مدل‌های زراعی مانند مدل APSIM (۷) و SOYGRO (۱۱)، CERES (۱۶)، SOYMOD (۱۵) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst هم وجود دارند که به‌صورت تک‌گیاهی عمل می‌کنند در این مدل‌ها یکی از معیارهای اصلی، مطالعه میزان شاخص سطح برگ (LAI) می‌باشد. این مدل‌ها به دلیل نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی بسیار پیچیده، نیاز به داده‌های ورودی زیاد و تغییرپذیری زیاد داده‌های ورودی، دشوار می‌باشد. این مدل‌ها همچنین برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و گیاهی و مکان‌های مختلف دنیا غیرقابل دسترسی هستند (۲۶). AquaCrop یکی از مدل‌های زراعی کاربردی، می‌باشد که از اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به‌دست آمده است. اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران (۲۴) و الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (۲۱) ارائه شده است. این مدل در دامنه‌ای وسیع از محصولات زراعی شامل: علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، دانه‌های روغنی و غده‌ای قابل استفاده است. AquaCrop مدلی قدرتمند و ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد (۲۱). ساده بودن، نیاز به داده ورودی اندک و دقت قابل‌قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد. محمدی و همکاران (۱۷) در تحقیقی نشان دادند نرم‌افزار AquaCrop قادر است مقادیر پروفیل رطوبتی و توزیع شوری را

به‌خوبی شبیه‌سازی کند، اما مقدار محتوای رطوبتی را با دقت بالاتری نسبت به توزیع شوری تخمین می‌زند. از آنجا که اندازه‌گیری توزیع و تغییرات شوری در ناحیه توسعه ریشه ۴ محصول زراعی مهم مانند گندم، ذرت، جو و گوجه فرنگی کشت شده در اراضی تحت آبیاری تیپ، بطور مستقیم و طی چندین سال زراعی امری وقت‌گیر و هزینه‌بر و در عمل ناممکن است، بنابراین هدف از این مطالعه بهره‌گیری از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی و مدیریتی نظیر AquaCrop، برای بررسی توزیع و تغییرات شوری در ناحیه توسعه ریشه ۴ محصول زراعی مهم مانند گندم، ذرت، جو و گوجه فرنگی است. در نهایت از نتایج عملی این تحقیق می‌توان در تصمیمات مدیریتی تعیین الگوی کشت و در موارد مشابه در مورد ارزیابی پایداری منابع آب و خاک در مزرعه بهره گرفت.

مواد و روش‌ها

معرفی مدل

در نرم‌افزار AquaCrop نسخه ۵، ورودی‌های مدل شامل چهار دسته داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل بارندگی، دمای ماکزیمم و مینیمم، تبخیر و تعرق پتانسیل (ET₀)، مدل توزیع جهانی گاز CO₂ است (۲۱). از آمار ایستگاه سینوپتیک قزوین برای محصولات زراعی استفاده شد. مقادیر عملکرد گیاه براساس اطلاعات مربوط به اقلیم، گیاه، خاک و روش مدیریتی که توسط کاربر به مدل داده می‌شود، تخمین زده می‌شود و از آنجا که شوری در این نسخه توسط نرم‌افزار در شبیه‌سازی لحاظ گردیده لذا دقت بالاتری در شبیه‌سازی عملکرد، توزیع شوری و محتوای رطوبتی خاک دارد (۲۲).

مدل AquaCrop برای محاسبه شوری خاک، نیمرخ خاک را به ۱۲ لایه و هر لایه را به ۲ تا ۱۱ سلول تقسیم‌بندی می‌کند. تعداد سلول‌ها بستگی به نوع خاک لایه‌های افقی دارد. از آنجایی که نمک‌ها شدیداً به ذرات رس می‌چسبند لایه‌ی افقی رسی سلول‌های بیشتری نسبت به لایه‌ی افقی شنی دارد. مدل با استفاده از روابط (۱) تا (۳) شوری اشباع خاک را در هر لایه محاسبه می‌کند (۲۱).

$$W_{cell} = 1000 \frac{\theta_{sat}}{n} \Delta Z \quad (1)$$

$$Salt_{cell} = 0.64 W_{cell} EC_{cell} \quad (2)$$

$$EC_e = \frac{\sum_{j=1}^n Salt_{cell,j}}{0.64 (1000 \theta_{sat} \Delta Z)} \quad (3)$$

که در روابط بالا خواهیم داشت:

W_{cell} حجم سلول (میلی‌متر آب)، θ_{sat} رطوبت اشباع خاک (m^3/m^3)، ΔZ ضخامت لایه‌های خاک (m)، n تعداد سلول‌ها، $Salt_{cell}$ مقدار نمک سلول (gr/m^2)، EC_{cell} هدایت هیدرولیکی هر سلول (dS/m) و EC_e هدایت هیدرولیکی اشباع عمق مشخصی از

خاک (dS/m) می‌باشند.

جمع‌آوری آمار و اطلاعات:

مشخصات مزرعه‌ای و خاک مورد مطالعه آن در جدول ۱ آمده است.

شوری اولیه خاک مزرعه در حدود ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر و شوری آب آبیاری برابر با ۱ دسی‌زیمنس بر متر است. پس از انتخاب تاریخ کاشت موجود برای هر محصول از فایل داده‌های گیاهی واسنجی شده، به منظور تعیین زمان مناسب آبیاری در هر یک از تاریخ کاشت هر محصول در مزرعه، در بخش مدیریت آبیاری از گزینه برنامه آبیاری پیشنهادی مدل در شرایط روش آبیاری تیپ (قطره‌ای نواری) با درصد سطح خیس‌شدگی ۳۰ درصد استفاده شده است. تاریخ کشت محصولات مورد نظر و تاریخ شروع و پایان شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار در جدول ۲ ذکر شده است.

عمق خالص آبیاری نیز براساس عمق ریشه هر محصول در طول دوره رشد و به گونه‌ای تعریف شده که رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی باشد. به عبارت دیگر، عمق خالص آبیاری بر اساس کمبود رطوبتی خاک در ناحیه توسعه ریشه گیاه در زمان آبیاری بوده است.

در عمل اطلاعات مربوط به ۴ محصول زراعی گندم، ذرت، جو و گوجه‌فرنگی بر اساس اطلاعات واسنجی گیاهی و نتایج آنالیز حساسیت عملکرد محصول به پارامترهای گیاهی به‌نحوی صورت گرفته که در تاریخ کاشت موردنظر بین مقدار عملکرد مشاهده شده در مزرعه در طی یک سال (مقدار واقعی) و تخمین زده شده توسط مدل، کم‌ترین میزان خطا مشاهده گردد و سپس مدل با استفاده از داده‌های گیاهی واسنجی و کالیبره شده برای محصولات مورد نظر و منطقه موجود (۲۲)، برای یک سال اجرا گردید و از نتایج آن برای شبیه‌سازی سال‌های دلخواه با فرض پیوستگی شبیه‌سازی‌ها در مقدار محتوای رطوبتی خاک استفاده گردید و در نهایت مدل برای تعداد سال‌های مورد نظر (حدوداً ۲۰ سال)، به‌منظور توزیع شوری برای فصول قبل از کشت و بعد از کشت و برای تمام سال‌های تحت کشت محصولات مورد نظر، شبیه‌سازی گردید. با این کار تغییرات رطوبتی و شوری خاک قبل و بعد از کشت محصول با هم و به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شد. خروجی مدل، توزیع شوری در پروفیل عمق ناحیه توسعه ریشه محصولات زراعی مورد نظر را برای ۲۰ سال نشان می‌دهد که به‌طور خلاصه هر ۶ سال یک بار و در انتهای هر سال میلادی، در شکل‌های (۱، ۲، ۳ و ۴) آورده شده است. البته از آنجایی که روز و فصل کشت این ۴ محصول دقیقاً بر هم منطبق نیست (جدول ۲)، به منظور امکان مقایسه بهتر نتایج خروجی توزیع شوری توسط مدل برای هر ۴ محصول مهم مورد نظر، ناگزیر به انتخاب تعداد سال‌های مشابه (از انتهای سال ۱۹۹۴ تا انتهای سال ۲۰۱۲ میلادی) که در هر ۴ محصول مشترک بوده و همپوشانی وجود دارد، برای انجام تحلیل مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱- برخی از مشخصات مطالعات مزرعه‌ای (۲۲)

Table 1- Some characteristics of farm studies (22)

گیاه Crop	محل انجام آزمایش Place of testing	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	بافت خاک Soil texture	$\theta_{F.C}$ (%)	$\theta_{P.W.P}$ (%)	ECe (dS/m)
گندم، جو، ذرت، گوجه‌فرنگی Wheat, Barley, Maize, Tomato	مزرعه تحقیقاتی اسماعیل آباد جهاد کشاورزی استان قزوین Research Farm of Ismail Abad Jihad Agriculture of Qazvin Province	E' 55° 49	N' 15° 36	لومی Loamy	24	12	1/5

جدول ۲- تاریخ کشت، تاریخ شروع و پایان شبیه سازی توسط AquaCrop

Table 2- Date of cultivation, date of the start and end of simulation by AquaCrop

محصول Crop	گندم Wheat	جو Barley	ذرت Maize	گوجه‌فرنگی Tomato
تاریخ کشت محصول Date of crop cultivation	۶ نوامبر ۱۹۹۳ 6 November 1993	۱ نوامبر ۱۹۹۳ 1 November 1993	۲۶ می ۱۹۹۴ 26 May 1994	۱۸ می ۱۹۹۴ 18 May 1994
تاریخ شروع شبیه‌سازی Simulation start date	۱ ژانویه ۱۹۹۳ 1 January 1993	۱ ژانویه ۱۹۹۳ 1 January 1993	۱ ژانویه ۱۹۹۴ 1 January 1993	۱ ژانویه ۱۹۹۴ 1 January 1993
تاریخ انتهای شبیه‌سازی Simulation end date	۱۷ ژوئن ۲۰۱۳ 17 June 2013	۲۳ ژوئن ۲۰۱۳ 23 June 2013	۴ اکتبر ۲۰۱۳ 4 October 2013	۴ اکتبر ۲۰۱۳ 4 October 2013

نتایج و بحث

همان‌طور که مشهود است در شکل ۱ و ۲ توزیع شوری در کل پروفیل ریشه به‌ترتیب گندم و جو در انتهای سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۲ میلادی از مدل آکواکراپ به‌دست آمده و رسم شده است. مشاهده می‌شود با گذشت زمان، شوری در کل پروفیل افزایش یافته است. این در حالی است که مطالعات پیشین مانند چن و همکاران (۴) و عنابی میلانی و همکاران (۳) به‌دلیل عدم لحاظ مدت زمان طولانی آبیاری معتقد به ثابت نگه داشته شدن شوری خاک تحت آبیاری تیپ با آب لب‌شور و شیرین و یا حتی کاهش شوری در مدت زمان یک یا دو سال هستند. البته این امر در حالی است که مطابق رابطه ۴، با هر بار آبیاری به مقدار ۶۴۰ برابر هدایت الکتریکی آب آبیاری بر حسب دسی‌زیمنس بر متر، مقدار نمک بر حسب میلی‌گرم بر لیتر وارد خاک می‌گردد.

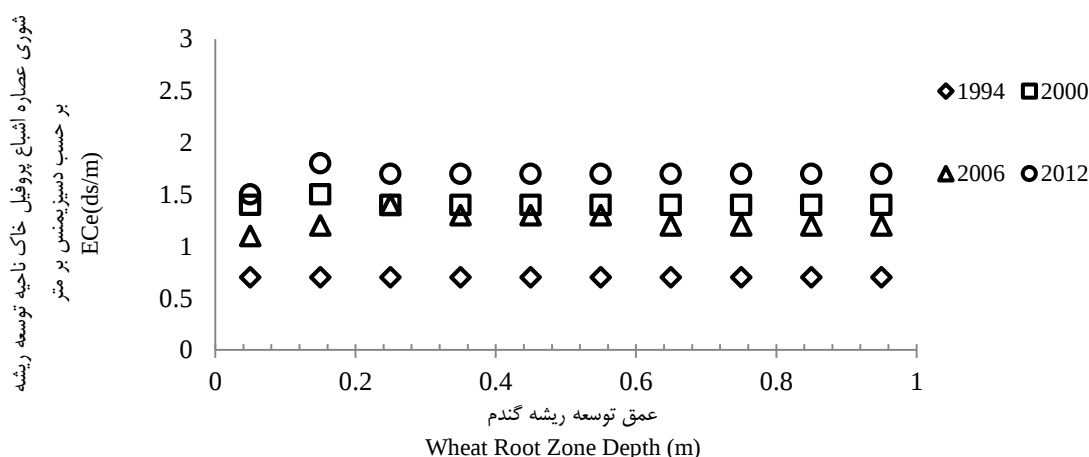
$$TDS (mg/lit) = 640 EC(ds/m) \quad (4)$$

در شکل‌های ۳ و ۴، هم توزیع شوری در کل پروفیل ریشه ذرت و گوجه‌فرنگی در انتهای سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۰، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۲ میلادی از مدل آکواکراپ به‌دست آمده و رسم شده است. مشاهده می‌شود با گذشت زمان، شوری در کل پروفیل افزایش یافته است. البته در تمامی شکل‌ها مشاهده می‌گردد که در سال‌های میانی بعلاوه توزیع مجدد املاح و نمک‌ها در خاک در اثر آبخسویی حاصل از

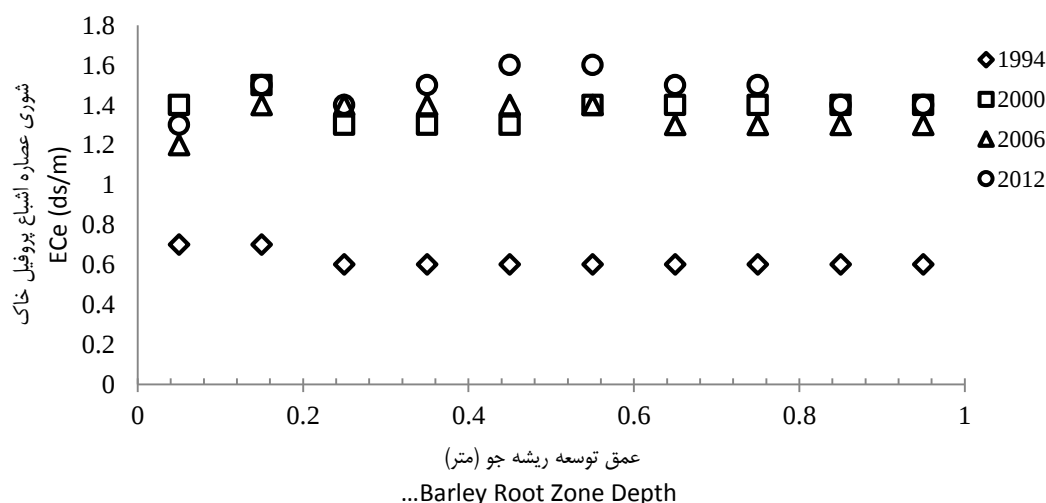
بارندگی، شاهد مقداری جابجایی در توزیع املاح در اعماق پایین‌تر خاک و کاهش شوری با گذشت زمان هستیم که مؤید حرکت شوری به اعماق پایین‌تر خاک و سطوح پایین‌تر ریشه است و تأیید کننده نتایج فنه و همکاران (۲۰) و اورون و همکاران (۱۹) می‌باشد. نکته جالب توجه از شکل‌های (۱، ۲، ۳ و ۴) این است که در تمام تحقیقات انجام شده پیشین که به ارزیابی مقدار شوری در خاک در حضور آبیاری تیپ پرداخته بودند مانند یازار و همکاران (۳۰)، حسن‌لی (۸)، مقدار شوری تجمع یافته در اثر آبیاری تیپ در سطح خاک بیشتر است ولی در این تحقیق، به‌علت احتساب اثر زمان بر تجمع نمک در پروفیل خاک در ناحیه توسعه ریشه، دیده می‌شود، مقدار شوری تجمع یافته در اثر آبیاری تیپ در سطح خاک بیشتر است ولی در این تحقیق، به‌علت احتساب اثر زمان بر تجمع نمک در پروفیل خاک در ناحیه توسعه ریشه، دیده می‌شود که حداکثر تجمع نمک زیر سطح خاک و در عمق حدود (۰/۵، ۱/۵، ۰/۵ و ۰/۱۶) متر از کل عمق توسعه ریشه هر گیاه و به‌ترتیب برای گوجه‌فرنگی، ذرت، جو و گندم رخ داده است. می‌توان گفت با گذشت زمان، نمک تجمع یافته در سطح خاک در اثر تبخیر، با آبیاری دوباره حرکت کرده و در زیر پروفیل خاک توزیع مجدد گشته است. در تحقیقی نوشادی و شهرکی مجاهد (۱۸) که به بررسی توزیع شوری خاک تحت آبیاری سیستم قطره‌ای زیرسطحی با مدیریت یک در میان و نیم در میان آب شور و شیرین بعد از فصل کشت گیاه گوجه‌فرنگی در شیراز پرداخته

خاک برای گوجه‌فرنگی و ذرت، از ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به حدود ۴/۳ و ۴ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است که علت را می‌توان به مقدار کم بارش‌های جوی در مدت کشت گوجه‌فرنگی و ذرت و عدم آبیاری طبیعی خاک نسبت داد. از بررسی نتایج مشاهده می‌گردد که شوری نهایی خاک در اثر کشت گندم و جو طی ۲۰ سال متوالی، از ۱/۵ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب به حدود ۲/۰۳ و ۲/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر رسیده است.

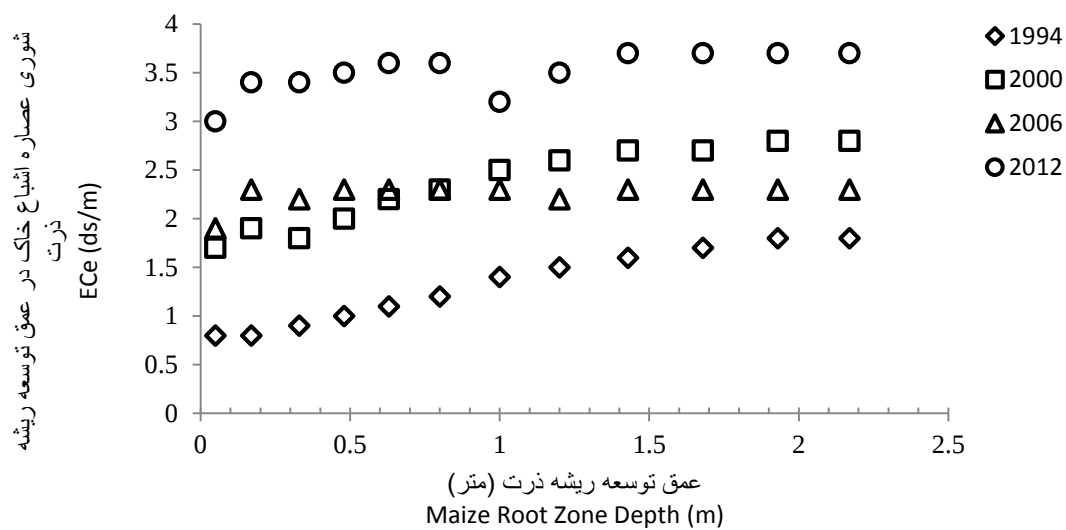
بودند، نشان داده شد که حداکثر شوری عصاره اشباع خاک در عمق حدود ۰/۴ متری زیر خاک و تقریباً برابر با ۳/۳۶ دسی‌زیمنس بر متر رخ می‌دهد که این امر در مدیریت نیم در میان رخ داده است. که تا حدودی مشابه نتایج این مطالعه می‌باشد. در مقایسه این تحقیق با مطالعه کنونی که اثر آبیاری تیپ یا نواری قطره‌ای با آب نسبتاً شیرین با شوری ۱ دسی‌زیمنس بر متر بر شوری خاک تحت کشت گوجه‌فرنگی، ذرت، و گندم و جو طی ۲۰ سال را نشان داده است، می‌توان گفت که حداکثر شوری متوسط



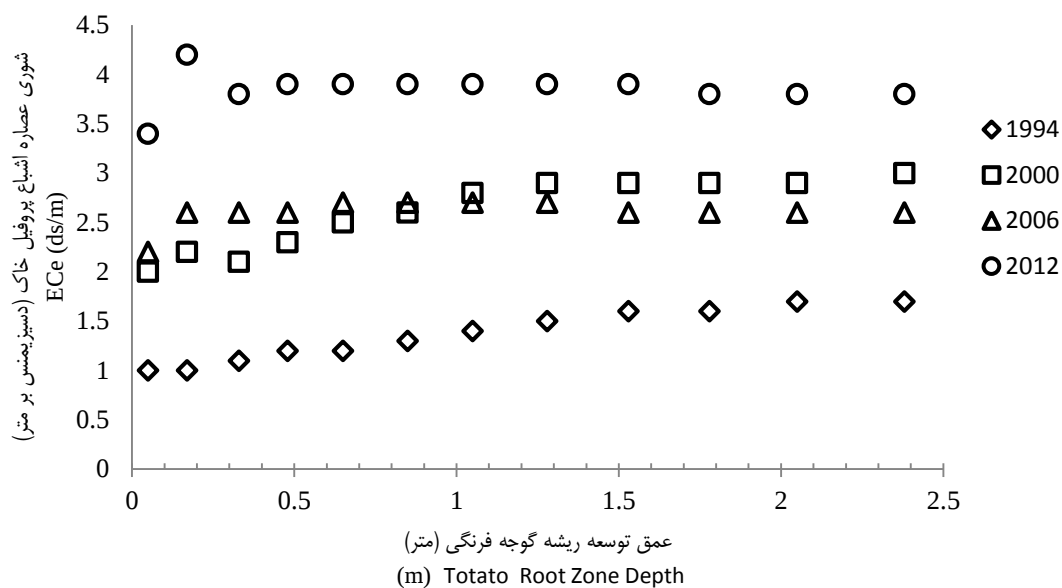
شکل ۱- تغییرات شوری در کل ناحیه توسعه ریشه گندم (در حدود ۲۰ سال)
Figure 1- Salinity changes in the total area of wheat root development (about 20 years)



شکل ۲- تغییرات شوری در کل ناحیه توسعه ریشه جو (در حدود ۲۰ سال)
Figure 2- Salinity changes in the total area of barley root development (about 20 years)



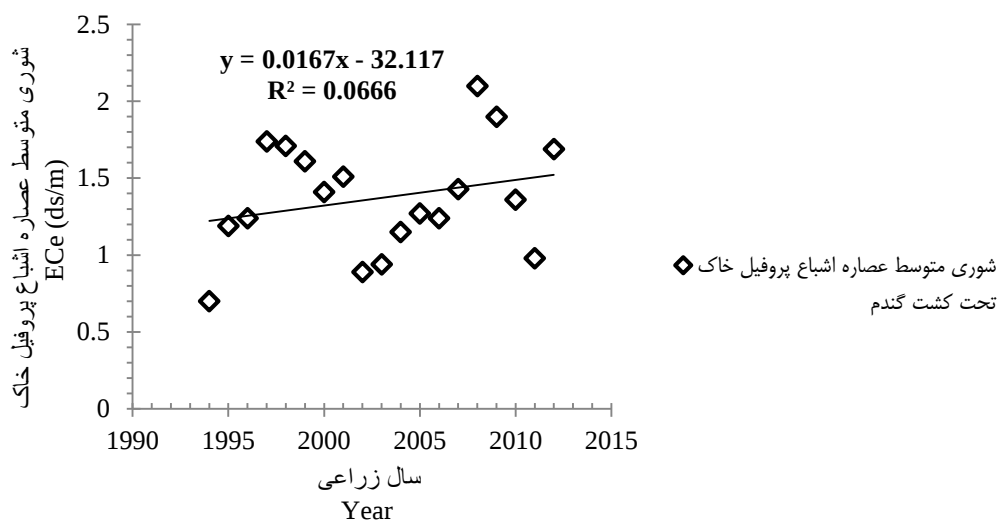
شکل ۳- تغییرات شوری در کل ناحیه توسعه ریشه ذرت و در حدود ۲۰ سال
Figure 3- Salinity changes in the total area of maize root development and about 20 years



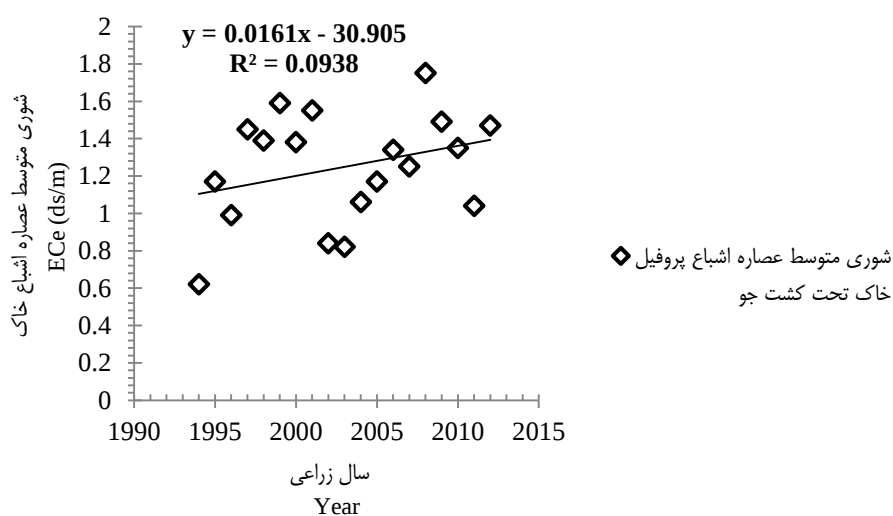
شکل ۴- تغییرات شوری در کل ناحیه توسعه ریشه گوجه‌فرنگی (در حدود ۲۰ سال)
Figure 4- Salinity changes in the total area of tomato root development (about 20 years)

با توجه به اینکه هنوز تحقیقی در زمینه بررسی در پیش‌بینی شوری عصاره اشباع AquaCrop کارایی مدل و بیان املاح در خاک در مدت زمان طولانی صورت نگرفته است، امکان مقایسه نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات در زمینه انتقال املاح در نیمرخ خاک، وجود ندارد. نتایج تحقیقات در مورد انتقال املاح توسط سایر مدل‌ها از جمله مدل SWAP، حاکی از این است که این مدل در پیش‌بینی شوری نیمرخ خاک، دقیق است (۲۸).

همچنین نکته قابل ذکر در خصوص دقت نتایج توزیع شوری عصاره اشباع خاک توسط نرم‌افزار AquaCrop، این است که در اکثر تحقیقات انجام شده، محققان نشان داده‌اند که این نرم‌افزار مقدار شوری عصاره اشباع خاک را کمتر از مقدار داده‌های مشاهده‌ای (مزرعه‌ای) نشان می‌دهد و این کم‌برآوردی در تخمین شوری در بسیاری از تحقیقات مشاهده می‌گردد به گونه‌ای که حداکثر خطای در تخمین مقدار شوری در بعضی موارد نزدیک به ۳۰ درصد هم می‌رسد.



شکل ۵- تغییرات شوری متوسط خاک با زمان برای آبیاری تیپ گیاه گندم
Figure 5- Average soil salinity variation under wheat cultivation under tape irrigation with time



شکل ۶- تغییرات شوری متوسط خاک با زمان برای آبیاری تیپ گیاه جو
Figure 6- Average soil salinity variation under barely cultivation under tape irrigation with time

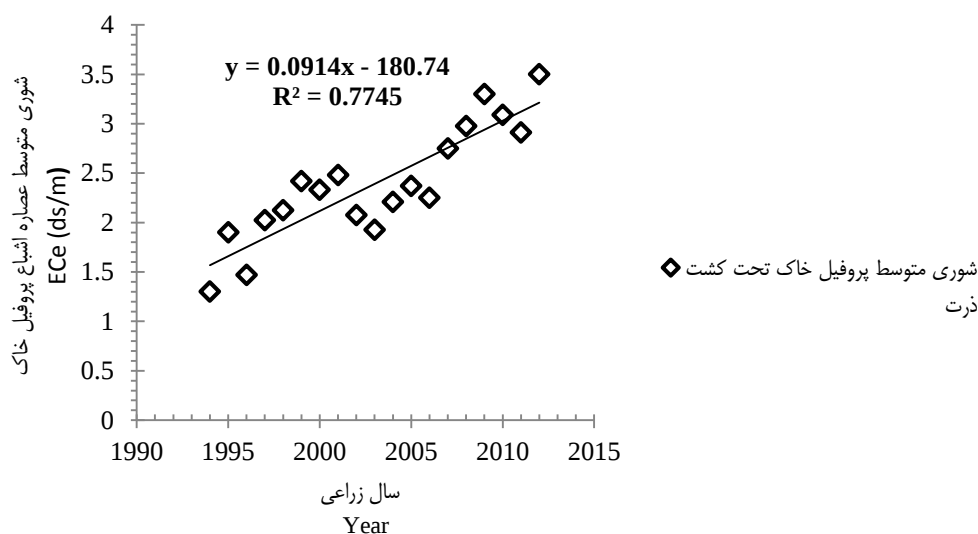
جمله انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، تخریب املاح، رسوب و ... که در AquaCrop تنها فرآیندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است و بر اساس معادله CDE^۱، انتقال املاح بررسی می‌شود، درحالی‌که، املاح تحت تأثیر فرآیندهای دیگر نیز قرار دارند (۱۲). اما آنچه مسلم است این است که حتی اگر کم‌برآوردی در پیش‌بینی توزیع شوری عصاره اشباع خاک

همچنین در تحقیقی که توسط حسن‌لی و همکاران (۱۰) صورت گرفت، نشان داده شد که متوسط قدر مطلق خطای نسبی تخمین شوری خاک توسط مدل AquaCrop، SALTMed و SWAP به- ترتیب برابر با ۷/۲۴، ۱۷/۵ و ۱۲/۹ درصد می‌باشد. یکی از دلایل نتیجه‌گیری غیر قوی از مدل AquaCrop در شبیه سازی شوری را می‌توان به معادلات حاکم بر پدیده انتقال املاح نسبت داد. عوامل مختلف بر انتقال املاح در نیمرخ خاک مؤثرند؛ از

1- CDE: Convection-Diffusion Equation

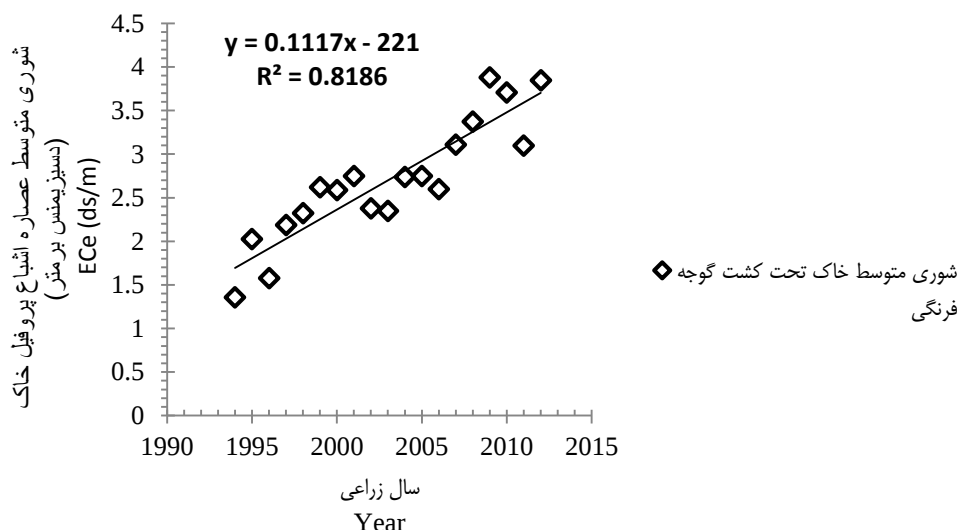
پروفیل ناحیه توسعه ریشه به ترتیب گندم و جو، در انتهای هر سال متوسط گیری شده و در مقابل زمان رسم شده است. مشاهده می شود که ضریب تبیین (R^2) در مورد وجود رابطه خط رگرسیونی بین شوری متوسط و زمان در مورد گندم و جو بسیار کوچک می باشد که البته نتایج تحلیل آزمون معنی داری ضریب همبستگی بین شوری متوسط و زمان به روش پارامتری و ناپارامتری در Minitab 17 هم در سطح ۵ درصد معنی دار نشد و مؤید ضریب تبیین پایین به دست آمده گردید. این بدان معناست که افزایش شوری خاک تحت کشت گندم و جو بعد از گذشت ۲۰ سال از لحاظ آماری معنی دار نیست.

توسط مدل Aquacrop وجود داشته باشد، این کم برآوردی برای تخمین توزیع شوری عصاره اشباع هر ۴ محصول صورت گرفته است و نه یک محصول و آن هم به یک میزان، بنابراین باز هم می توان توزیع شوری خاک در طول مدت کشت این ۴ محصول را با دقت بالا و در طول زمان با هم مقایسه نمود و در تصمیمات مدیریتی، این نتایج را با قطعیت لحاظ نمود. چون در هر صورت این نرم افزار توزیع شوری را در خوش بینانه ترین حالت و حداکثر با ۳۰ درصد کم برآوردی به ما نشان داده است. در شکل های ۵ و ۶ برای درک بهتر موضوع، از کل شوری در



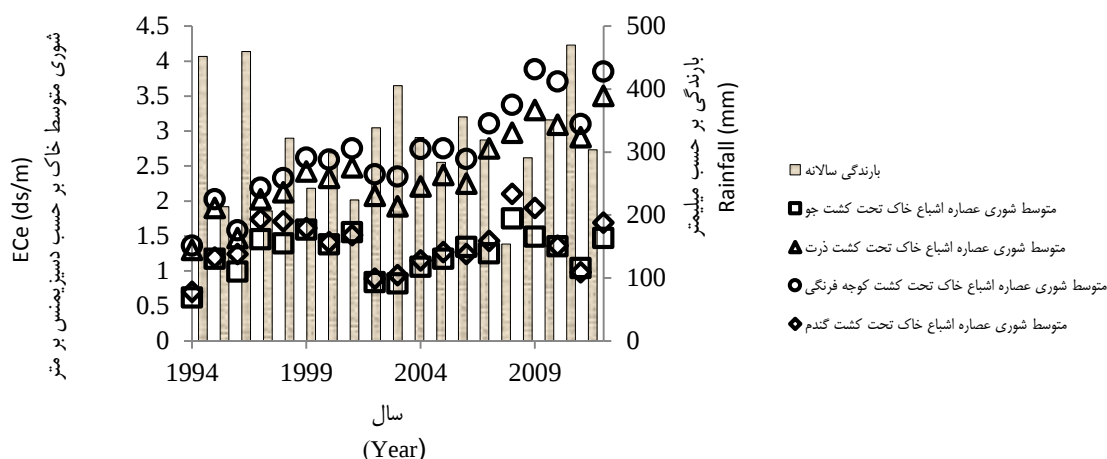
شکل ۷- تغییرات شوری متوسط خاک با زمان برای آبیاری تیپ گیاه ذرت

Figure 7- Average soil salinity variation under maize cultivation under tape irrigation with time



شکل ۸- تغییرات شوری متوسط خاک با زمان برای آبیاری تیپ گیاه گوجه فرنگی

Figure 8- Average soil salinity variation under tomato cultivation under tape irrigation with time



۹- مقایسه شوری متوسط خاک تحت کشت ۴ محصول گندم، جو، ذرت، گوجه فرنگی و بارش سالانه

Figure 9- Comparison of average salinity of soil under cultivation of 4 wheat, barley, maize, tomato and annual precipitation

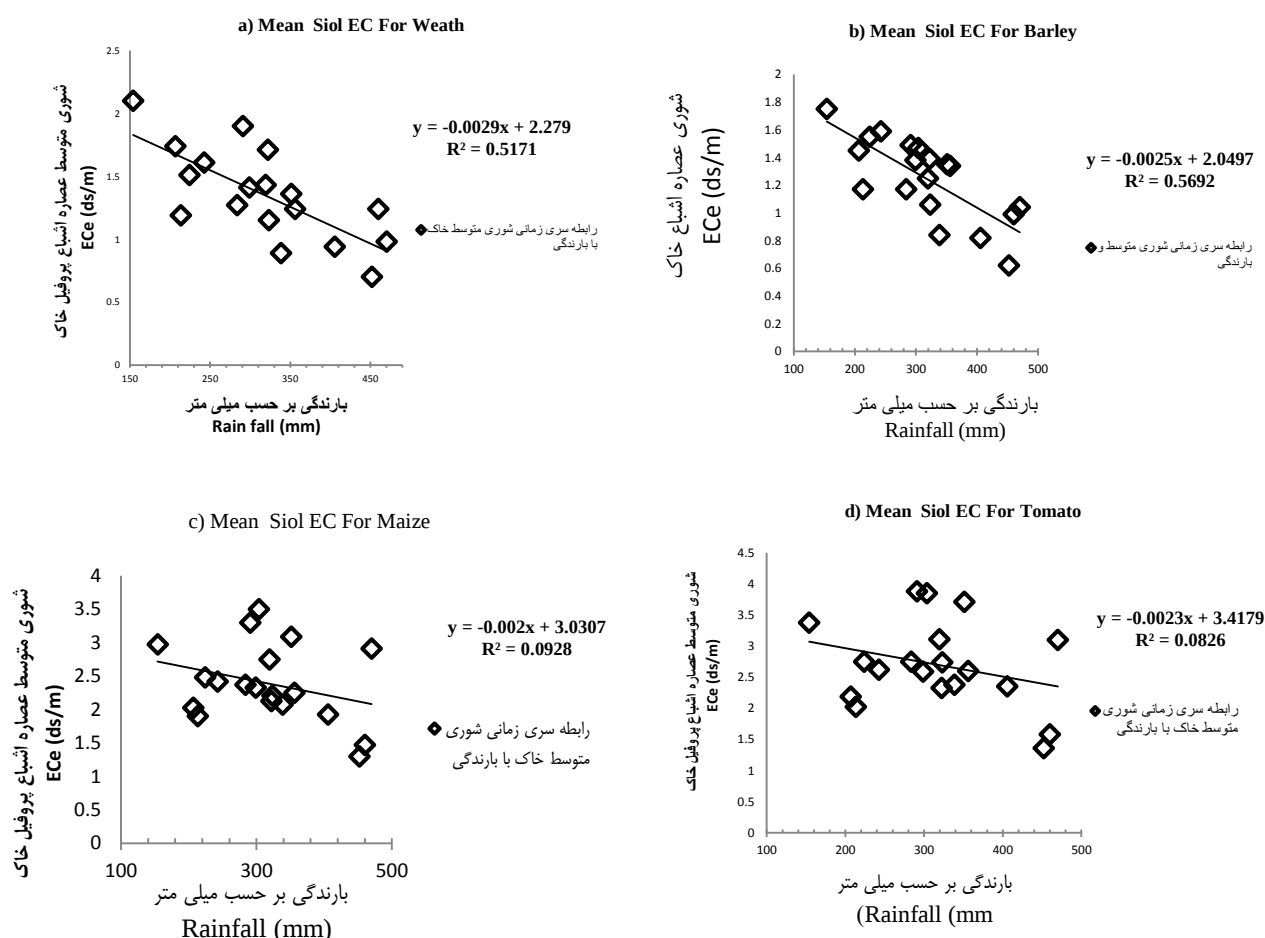
آبیاری، فرصتی برای شستشو نیافته و در نتیجه در مدت زمان طولانی استفاده از سیستم تیپ، در خاک انباشته شده و شوری آن را بالا می برد. از طرفی گندم و جو جزء محصولات مقاوم به شوری هستند که در مکانیسم جذب ریشه^۱ خود قادر به جذب نمک های محلول بیشتری نسبت به دو محصول حساس گوجه فرنگی و ذرت نسبت به شوری هستند. به گونه ای که معمولاً پیشنهاد می گردد در زمین های با شوری بالا به خصوص در سال های ابتدایی کاشت از محصولات مقاوم به شوری و جذب بالای یون های شوری در خاک استفاده کرد تا از طرفی هم شوری خاک تعدیل گردد و هم بتوان به برداشت محصول با تناژ قابل قبول امیدوار بود. جهت اثبات درستی این ادعا، وجود رابطه همبستگی بین بارش سالیانه و شوری متوسط خاک در انتهای هر سال برای هر محصول در نرم افزار MINITAB 17 مورد آزمون پارامتری و ناپارامتری معنی داری ضریب همبستگی قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد که ضریب همبستگی پیرسون ($r = -0.71$) و اسپیرمن ($r = -0.691$) بین بارش و شوری متوسط سالانه برای گندم در سطح ۵ درصد معنی دار بود ($P_Value = 0.001$) و برای جو نیز نتایج مشابهی به دست آمد ($r_{\text{Pierson}} = -0.777$)، ($r_{\text{Spirman}} = -0.691$)، ($P_Value = 0.000$).

و در نهایت در شکل های a و b شماره ۱۰، وجود این رابطه خطی معکوس برای جو و گندم به درستی در EXCEL2007 نشان داده شده است. همچنین از شکل d۱۰ و c۱۰ مشهود است که رابطه خطی بین بارش و شوری متوسط سالانه برای ذرت و گوجه فرنگی وجود ندارد. البته در تمامی نمودارهای زیر مشاهده می گردد که بارش منجر به کاهش شوری می گردد، ولی این کاهش در مورد دو محصول

همچنین به طور مشابه در شکل های ۷ و ۸، از کل شوری در پروفیل ناحیه توسعه ریشه به ترتیب ذرت و گوجه فرنگی، در انتهای هر سال متوسط گیری شده و در مقابل زمان رسم شده است. مشاهده می شود که ضریب تبیین (R^2) در مورد وجود رابطه خط رگرسیونی بین شوری متوسط و زمان در مورد ذرت و گوجه فرنگی بزرگ می باشد که البته نتایج تحلیل آزمون معنی داری ضریب همبستگی بین شوری متوسط و زمان به روش پارامتری و ناپارامتری در Minitab 17 هم در سطح ۵ درصد معنی دار شد و مؤید ضریب تبیین بالای به دست آمده گردید. این بدان معناست که افزایش شوری خاک تحت کشت ذرت و گوجه فرنگی بعد از گذشت ۲۰ سال از لحاظ آماری معنی دار بوده و قابل توجه است.

در شکل ۹، به منظور مقایسه تأثیر آبیاری تیپ بر توزیع شوری خاک و رابطه آن با بارندگی، یک مقایسه بین تغییرات شوری متوسط ناحیه توسعه ریشه ۴ محصول مهم در طول ۲۰ سال کشت محصولات انجام شده است. مشاهده می گردد در محصولات ذرت و گوجه فرنگی، آبیاری تیپ منجر به افزایش قابل توجه شوری متوسط ناحیه توسعه ریشه با گذشت زمان می گردد. حال آنکه افزایش شوری تیپ با گذشت زمان ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. علت را می توان این گونه توجیه نمود که آغاز فصل کشت محصولاتی مانند گندم و جو از ماه نوامبر که مصادف با آبان ماه می باشد است، که در این فصل بر اثر بارش، نمک حاصل از تبخیر آب آبیاری از خاک شسته شده و در آن به مقدار ناچیزی تجمع می یابد. این در حالی است که آغاز فصل کشت محصولاتی چون ذرت و گوجه فرنگی از ماه می که مصادف با اردیبهشت ماه است بوده و در این زمان مقدار کمتری بارش تا اتمام فصل کشت وجود دارد و نمک تجمع یافته در اثر

آخر از نظر آماری معنی‌دار نیست.



۱۰- رابطه همبستگی بین شوری متوسط خاک تحت کشت ۴ محصول (ا) گندم، (ب) جو، (ث) ذرت، (د) گوجه فرنگی و بارش سالانه

Figure 10- Correlation between average salinity of soil under cultivation of 4 products a) wheat, b) barley, c) maize, d) tomato and annual precipitation

نتیجه گیری

ذرات نمک در اثر باندگی و آبیاری و شستشوی املاح خاک صورت پذیرفته است. علت را می‌توان به نیاز آبی پایین و فیزیولوژی جو و گندم نسبت به ذرت و گوجه‌فرنگی نسبت داد که در نتیجه آن آب کمتری وارد خاک شده و در نتیجه شوری کمتری در زمین تجمع می‌یابد، همچنین وجود بارش در فصل کشت گندم و جو منجر به شستشوی نمک از ناحیه ریشه می‌شود. درستی این نظریه از طریق معنی‌داری همبستگی بین بارش و شوری خاک در سطح ۵ درصد آزمون و ثابت گردید. لذا پیشنهاد می‌گردد گندم و جو که جزو گیاهان با مقاومت و تحمل بالا در مقابل تنش شوری هستند، در اولویت کشت آبیاری موضعی در نواحی خشک با بارش‌های ناچیز و منابع آبی محدود، قرار گیرند.

به عبارت بهتر، کشت محصولاتی چون جو و گندم نسبت به ذرت

از نتایج بالا مشاهده گردید در محصولات ذرت و گوجه‌فرنگی، آبیاری تیپ با شوری آب آبیاری ۱ دسی‌زیمنس بر متر، منجر به افزایش قابل توجه شوری متوسط خاک ناحیه توسعه ریشه از ۱/۵ به ترتیب به ۴ و ۴/۳ دسی‌زیمنس بر متر در طول ۲۰ سال می‌گردد (معنی‌داری روند در سطح ۵ درصد)، حال آنکه افزایش شوری متوسط ناحیه توسعه ریشه در محصولات گندم و جو در همان حالت، از ۱/۵ به ترتیب به ۲/۰۳ و ۲/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر رسیده که در سطح ۵ درصد معنی‌دار نیست. همچنین مشاهده گشت که بیشترین مقدار تجمع نمک در زیر سطح خاک و در عمق‌های (۰/۵، ۱/۵، ۰/۵ و ۰/۱۶) متر از کل عمق توسعه ریشه هر گیاه و به ترتیب برای گوجه فرنگی، ذرت، جو و گندم رخ داده است، که این امر بعلا توزیع مجدد

و گوجه‌فرنگی در مناطق با کمبود منابع آب و شوری خاک، مدیریت پایدار اراضی را تضمین می‌نماید. از آنجا که تاکنون تحقیقات جامع و عملی در مورد تغییرات شوری خاک در مدت زمان طولانی و استفاده از آبیاری تیپ، بعد از کشت محصولات مهمی چون گندم، جو، ذرت، گوجه‌فرنگی صورت نگرفته است نتایج این تحقیق می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی از نظر پایداری منابع آب و خاک، انتخاب و اولویت‌بندی الگوی کشت مناسب در مناطق گرم و خشک با نزولات جوی اندک، مفید فایده واقع گردد.

منابع

- 1- Akhavan K. 2015. The Application of Drip Irrigation System (Tape) in Wheat Cultivation. Extention Manuall. Technical Journal, 83: 19. (In Persian)
- 2- Alizadeh Z. 2012. Sample evaluation of EC, PH, SAR changes in surface depth of subsoil sprinklers (Case study: Sprinkler irrigation system of Lands of Hasanlu Dam). Master's thesis, Water engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University. (In Persian)
- 3- Anabi Milani A., and Abedi M. S. 2012. Effect of irrigation water salinity on yield and water use efficiency of three wheat cultivars and salinity of soil profile. The 1th National Conference on Water Management on the Farm, Karaj, Iran. (In Persian)
- 4- Chen M., Kang Y., Wan S., and Liu S. 2009. Drip irrigation with saline water for oleic sunflower (*Helianthus annuus* L.): Agric. Water Manage, 96 (1766–1772).
- 5- Dehghan H., Alizadeh A., Ansari H., and Haghayeghi Moghaddam S. A. 2011. Study of Water Productivity Indices in Irrigated Fields of Wheat (Case Study: Neyshabour Plain). Irrigation and Drainage Journal of Iran, 2(5): 263-275. (In Persian with English abstract)
- 6- Ebrahimi M., Kashani S., and Rohi Moghadam AS. 2016. Effect of Land Use Change from Rangeland to Agricultural Land on Soil Fertility in Taftan Region. Water and Soil Knowledge, 26(1/2):31-44. (In Persian with English abstract)
- 7- Egli D.B., and Bruening W. 1992. Planting date and soybean yield: Evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO, Agricultural and Forest Meteorology Journal, 2:19-29.
- 8- Hassanli M. 2014. "Management of saline water use in drip irrigation in order to increase water use efficiency and land sustainability". thesis for obtaining a master's degree in agricultural engineering from irrigation and drainage, Agricultural Campus and Natural Resources University of Tehran, Karaj. (In Persian with English abstract)
- 9- Hassanli M., Afrasiab P., and Ebrahimiyan H. 2015. Evaluation of SALTMed and AquaCrop models in estimating yield of corn and soil salinity. Iran Water and Soil Researchs, 46(3):487-498. (In Persian)
- 10- Hassanli M., Ebrahimiyan H., Mohammadi E., Rahimi A., and Shokouhi A. 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMed, and SWAP models. J. Agric. Water Manage, 176 (91-99).
- 11- Jones C.A., Kiniry J.R., and Dyke P.T. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development, User's guide of CERES-Maize. Texas University Press College Station (USA).
- 12- Khorsand A., Verdinejad V. R., and Shahidi A. 2014. Performance evaluation of AquaCrop model to predict yield production of wheat, soil water and solute transport under water and salinity stresses. Water and Irrigation Management, 4(1), 89-104 (In Persian).
- 13- Kroes J.G., and Van Dam J.C. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wageningen, Report 1649 (Available at: www.alterra.nl/models/swap).
- 14- Kuo S.F., Lin B.J., and Shieh H.J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management, 82:433-451.
- 15- Marinov D., Querner E., and Roelsma J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. Journal of Contaminant Hydrology, 77: 145-164.
- 16- Meyer G.E., Curry R.B., Streeter J.G., and Baker C.H. 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. Transactions of the ASABE. 24 (2):421- 429.
- 17- Mohammadi M., Davari K., GHahreman B., Ansari H., and Haghverdi A. 2015. Calibration and validation of AquaCrop model for the simulation of spring wheat yield under simultaneous stress of salinity and drought. Journal of Water Research in Agriculture, B, 29(3): 277-295. (In Persian with English abstract)
- 18- Nowshadi M., and Shahraki Mojahed R. 2014. Effect of saline water management on soil and tomato yield in subsurface drip irrigation, Journal of Water Research in Agriculture. B, 28(2): 375-384. (In Persian with English abstract)
- 19- Oron G., DeMalach Y., Hoffman Z., Keren Y., Hartmann H., and Plazner N. 1990. Wastewater disposal by subsurface trickle irrigation. Proceedings, Fifteenth Biennial Conference, IAWPRC, Kyoto, Japan, Jul 29-Aug. 3, pp. 2149-2158
- 20- Phene C. J., Davis K. R., Hutmacher R. B., Bar-Yosef B., and Meek D. W. 1990. Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn. Irrigation Science, 12: 135-140.

- 21- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model or predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101:438-447.
- 22- Ramezani Etedali H., Liaghat A., Parsinezhad M., and Tavakoli A. 2016. Calibration and Validation of AquaCrop Model in Managing Important Cereals Irrigation. *Irrigation and Drainage Journal of Iran*, 3(10): 389-397. (In Persian with English abstract)
- 23- Singh R. 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining Cotton-Wheat in a semi-arid area of north-west India. *Agricultural Water Management*, 66: 153-162.
- 24- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25:189-207.
- 25- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437.
- 26- Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M., Stöckle C., and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101: 509- 521.
- 27- Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., and Kroes J.G. 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7:640-653.
- 28- Verdinejad VR., Rezaie H., Ababaie B., Ahmadi H., and Behmanesh J. 2012. Application SWAP Agrohydrological Model to Predict Crop Yield, Soil Water and Solute Transport with shallow groundwater condition. 8th International Soil Science Congress Çeme- Izmir, Turkey.
- 29- Wan S., Kang Y., Wang D., Liu S., and Feng L. 2007. Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) yield and water use in semi-humid area: *Agric. Water Manage.* 90: 63-74.
- 30- Yazar A., Hamdy A., Gencel B., and Metin S. S. 2003. Sustainable use of highly saline water for irrigation of crops under arid and semi-arid conditions: new strategies Corn yield response to saline irrigation water applied with a trickle system under Mediterranean climatic conditions: In: Hamdy A. (ed.). *Regional Action Programme (RAP): Water resources management and water saving in irrigated agriculture (WASIA PROJECT)*. Bari: CIHEAM, 113-121.

Study of Salinity Changes in Soil Profile of Four Agricultural Crops in Qazvin Plain under Drip-Tape Irrigation with *AquaCrop* Model

H. Ramezani Etedali¹- M. Pashazadeh^{*2}- B. Nazari³- A. Sotoudehnia⁴- A. Kaviani⁵

Received: 30-01-2018

Accepted: 03-06-2018

Introduction: Regarding population growth rate and drought challenges, one of the effective strategies for sustainable development in agricultural sector is irrigation. In this regard, in recent years, the use of tape irrigation method has been considered in crop plants, but the use of this system will be successful if it is to evaluate the system performance in terms of soil sustainability before it is implemented and its problems are solved. Problems in the field of sustainable agriculture are salinification of soil resources that the tape irrigation over time and due to the continuity of its use in cultivated land, especially in warm and dry areas due to global warming, climate change and decline of the atmospheric precipitation leads to salinity accumulation in the soil.

Materials and Methods: In order to investigate the distribution and changes of salinity of soil profile in the root development zone of wheat, maize, barley and tomatoes grown in Qazvin Plain with initial salinity of 1/5 dS/m and salinity of irrigation water 1 dS/m In hot and dry climate, a type of irrigation was used (strip drip) and during the 20 years of cultivation, the AquaCrop version 5 was used. The results of simulation output were analyzed by Minitab 17 and Excel 2007 softwares.

Results and Discussion: The results showed that in all previous studies, the amount of salinity accumulated through the tape irrigation in the soil surface is greater, but in this study, due to the time effect on salt accumulation in the soil profile in the root development area, The maximum salt accumulation below the soil surface and at depths (0/5, 1/5, 0/5 and 0/16) meter of the total root development depth of each plant, respectively, for tomato, maize, barley and Wheat has occurred. It can be said that over time, accumulated salt on the surface of the soil evaporated, re-moved with irrigation and redistributed under the soil profile. Simulation results were obtained after statistical analysis with Minitab 17 and Excel 2007 software showed that in tomato and corn products, tape irrigation with irrigation water salinity of 1 dS/m resulted in significant increase in average salinity of The root development zone from 1/5 is 4 and 4/4 dS/m over the course of 20 years (correlation significance at 5% level) and sustainable utilization of soil resources is questioned, While the increase in average salinity of root development zone in wheat and barley products due to tape irrigation over the course of 20 years has risen from 1.5 to 2/03 and 2/02 dS/m, which is not noticeable and at the level of 5% is not significance. This can be attributed to rainfall during the growing season of wheat and barley, which led to salt salting from the root zone. The correctness of this theory was tested by the significance of the correlation between rainfall and salinity in the 5% level and proved to be. Therefore, it is recommended to wheat and barley with the ability to tolerate high soil salinity are placed in the top priority for local irrigation in hot and dry areas with limited atmospheric rainfall and limited water resources.

Conclusions: From the above results, it was observed that, in products such as maize and tomatoes, tape irrigation resulted in a significant increase in the mean salinity of the root development zone over time. However, the increase in average salinity of root development in wheat and barley products due to the tape irrigation is negligible and canceled over time. In other words, the cultivation of crops such as barley and wheat in areas with scarcity of water resources and soil salinity ensures sustainable land management. These results, while using water with salinity of about 1 dS/m, and soil cultivation with an average salinity of 1/5 dS/m, have been taken. Since comprehensive and practical research has not been done on long-term salinity changes and the use of tape irrigation, after the cultivation of important crops such as wheat, barley, corn, tomato, the results of this research can be used in conducting managerial guidelines, The selection and prioritization of the appropriate cropping pattern in the warm and dry areas will be beneficial with few atmospheric precipitations.

Keywords: Agricultural crop, *AquaCrop*, Drip-tape irrigation, Salinity distribution, Soil stability

1, 2, 3, 4 and 5- Assistant Professor, Ph.D. Student, Assistant Professor, Associate Professor and Assistant Professor of Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Respectively
(* - Corresponding Author Email: Pashazade1387@yahoo.com)

ارزیابی تأثیر شوری آب آبیاری و تنش خشکی بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه گیلاسی

جواد رمضانی مقدم^{۱*} - یاسر حسینی^۲ - محمدرضا نیک پور^۳ - عطیه عبدلی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۰۵

چکیده

بیشترین سهم مصرف منابع آب در ایران مربوط به بخش کشاورزی است. بنابراین جهت صرفه جویی در منابع آب، اولویت با کاهش میزان آب آبیاری است و یکی از راهکارهای مهم در این راستا، استفاده از منابع آب نامتعارف می باشد. بدین منظور در این پژوهش اثر استفاده از آب شور بر عملکرد گوجه گیلاسی تحت شرایط تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای اعمال شده شامل شوری آب آبیاری (در دو سطح $S_1 = 4$ و $S_2 = 7$ دسی زیمنس بر متر) و تنش خشکی (در سه سطح، آبیاری در نقاط ۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک به ترتیب I_1 ، I_2 و I_3) بودند. طرح آزمایشی مورد استفاده در قالب بلوک های کامل تصادفی در چهار تکرار اجرا شد. نتایج نشان داد که اثر تنش شوری آب آبیاری بر عملکرد، مجموع تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب (به ترتیب در سطوح یک، پنج و پنج درصد) معنی دار شد. همچنین بیشترین اثر کاهشی تنش شوری روی عملکرد گوجه گیلاسی (با مقدار ۲۷ درصد کاهش مربوط تیمار شوری ۷ دسی زیمنس بر متر) مشاهده شد. از طرفی استفاده از آب شور (۷ دسی زیمنس بر متر) موجب کاهش ۱۹/۲ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد شد. دلایل این کاهش صفات مورد بررسی می تواند به خاطر اثر منفی پتانسیل اسمزی، کاهش تبخیر و تعرق کل و تجمع یون ها در اندام حساس پایینی باشد. از طرفی گرچه افزایش شوری موجب کاهش عملکرد در سطح معنی دار یک درصد شده است، اما ممکن است در سال های آینده با محدودیت های شدید منابع آبی و افزایش هزینه های تهیه آن، این مقادیر کاهش عملکرد، اقتصادی و قابل توجیه باشد.

واژه های کلیدی: آب نامتعارف، کارایی مصرف آب، کم آبیاری، گوجه گیلاسی

مقدمه

محمدی و همکاران (۱۷) در پژوهشی به بررسی ضرایب حساسیت گوجه فرنگی و بهینه سازی مصرف آب در شرایط توامان شوری و خشکی در شهرستان کرج پرداختند. تیمارها شامل سطوح شوری آب آبیاری (۷/۰، ۱ و ۴ دسی زیمنس بر متر) و سطوح آبیاری (۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد تامین نیاز آبی گیاه) بودند. نتایج نشان داد که می توان با کمک افزایش عمق آب آبیاری، از شوری های بالاتر در آبیاری محصول استفاده کرد بدون اینکه عملکرد کاهش معنی داری (نسبت به آب های با شوری کمتر) داشته باشد.

البته نتایج بسیاری از تحقیقات بیانگر این است که شوری دارای اثر معنی دار بر عملکرد محصول و کاهش کارایی مصرف آب می باشد (۱، ۷، ۱۸، ۱۹، ۲۱، ۲۲ و ۲۳). یکی از نکات قابل توجه در ارتباط با آثار تنش شوری، کاهش معنی دار هدایت هیدرولیکی ریشه ها است که در نتیجه آن شاخص کارایی مصرف آب نیز کاهش می یابد. نتایج مطالعات بر روی واکنش گیاه به شوری نشان دهنده این است که بررسی واکنش گیاهان به شوری بالا در کوتاه مدت در مراحل رویشی می تواند به یک ارزیابی جامع با اطلاعات مفید منجر شود. همچنین مشخص شد که مقاومت گیاه به شوری یک صفت پیچیده است که تحت تأثیر عواملی چون ژنتیک گیاه، صفات فیزیولوژیکی و

در سال های اخیر، کاهش روز افزون منابع آب و افزایش شوری آب های کشاورزی از مهم ترین معضلات بخش کشاورزی به حساب می آیند. از آنجایی که بیشترین مصرف آب مربوط به بخش کشاورزی است استفاده از روش های بهینه مصرف آب مانند کم آبیاری و مصرف آب های با کیفیت پایین (آب شور) می تواند در راستای حل مشکلات بیان شده کارگشا باشد. از طرفی باید دقت داشت که استفاده از آب شور به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، انباشتگی فراوان نمک در منطقه توسعه ریشه و کاهش شدید محصول را در پی خواهد داشت که باید این مساله مدیریت و کنترل شود (۱۰ و ۱۱).

۱ و ۳- استادیاران گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

(*)- نویسنده مسئول: (Email: j_ramezani@uma.ac.ir)

۲- دانشیار گروه علوم آبیاری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی مغان، دانشگاه محقق اردبیلی

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

پارامترهای محیطی قرار دارد (۱۶).

از طرفی بررسی‌ها نشان داده است که شوری از عوامل اصلی تنش‌زای محیطی است که موجب کاهش عملکرد و دارای اثر بازدارندگی در رشد و سوخت و ساز گیاهان می‌باشد. در اثر افزایش تنش شوری، توده و طول ساقه گیاه کاهش می‌یابد. افزایش شوری سبب کاهش یون‌های پتاسیم، کلسیم و منیزیم شد. تحقیقات نشان داده است برخی گیاهان از طریق جذب یون‌ها در اندام‌های مختلف خود نسبت به تنش شوری از خود مقاومت نشان می‌دهد. ضمن اینکه معمولاً اثر شوری بر وزن خشک ریشه کمتر از اندام‌های هوایی است. تجمع سدیم بخصوص در اندام‌های گیاه یکی از دلایل کاهش رشد است. افزایش شوری موجب افزایش معنی‌دار تراکم یونی سدیم و کلر در اندام‌های هوایی و ریشه می‌شود، به گونه‌ای که تجمع این یون‌ها در اندام هوایی (برگ و ساقه) بیشتر از ریشه است. از طرفی با افزایش تنش شوری، مقادیر یون‌های پتاسیم، منیزیم و کلسیم کاهش می‌یابد (۹).

نتایج مطالعات نوروزی و همکاران (۲۰) نشان داد که با افزایش شوری آب‌آبیاری، عملکرد ماده خشک، کیفیت مواد معدنی و علوفه، مقادیر کلسیم، منیزیم و پتاسیم موجود در اندام‌های هوایی ارزن علوفه‌ای به‌طور معنی‌داری (در سطح یک درصد) کاهش یافتند. از طرفی افزایش تنش شوری موجب افزایش محتوای سدیم و درصد فیبر خام شد. افزایش شوری باعث افزایش جذب سدیم، کاهش جذب پتاسیم و کلسیم و شوری موجب کاهش نسبت پتاسیم به سدیم شد. البته باید توجه داشت برخی از گیاهان قابلیت نگهداری یون‌ها را در خود داشته و با تجمع آن‌ها در اندام تحتانی موجب ممانعت از انتقال آن به اندام حساس پایینی شده و از طریق این راهکار نسبت به شوری مقاومت می‌کنند. همچنین حیدری‌نیا و همکاران (۱۱) در یک مطالعه لایسیمتری تاثیر مدیریت بقایای گندم و آب‌شور را در تغییرات شوری نیم‌رخ خاک مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بر اساس نتایج به دست آمده پیشنهاد دادند که با استفاده از بقایای گیاهی می‌توان به طور معنی‌داری آثار منفی استفاده از آب‌شور در کشاورزی را کاهش داد.

از راهکارهای دیگر در راستای کاهش اثر شوری بر عملکرد محصول می‌توان به اختلاط آب‌شور و غیر شور اشاره کرد. مدیریت اختلاط (آب‌شور و غیر شور) می‌تواند موجب بهبود عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری در شوری‌های بالاتر شود. در یک تحقیق، نتایج آزمایش نشان داد به‌ازای افزایش هر واحد شوری خاک، به‌طور متوسط نه درصد کاهش محصول مشاهده می‌گردد (۱۹). روش تلفیقی به‌دلیل کاهش اثر اسمزی آب شور در مناطق مختلف، جهت استفاده در کشاورزی در حال بررسی می‌باشد. این روش می‌تواند جهت صرفه جویی در مصرف آب شیرین و استفاده از آب‌های نامتعارف و دارای کیفیت پایین به‌کار گرفته شود. با کمک این روش می‌توان ضمن

تامین بخش قابل‌توجهی از آب آبیاری با استفاده از آب‌شور، باعث کاهش اثر منفی ناشی از پتانسیل اسمزی وارده به گیاه شد (۸).

کنتور^۱ و همکاران (۲) در تحقیقی اثر مدیریت کم آبیاری (۱۰۰، ۵۰ و صفر (آبیاری دیم) درصد تامین نیاز آبی گیاه) را بر میزان عملکرد، کیفیت میوه و شاخص کارایی مصرف آب گوجه‌گیلاسی^۲ مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق، تیمار مدیریت کم آبیاری دارای اثر معنی‌داری بر روی عملکرد و کیفیت گوجه‌گیلاسی داشت، به‌طوری که در تیمار I₅₀ و I₁₀ به‌ترتیب ۵۲/۷ و ۸۰/۵ درصد کاهش عملکرد محصول نسبت به تیمار آبیاری کامل مشاهده شد. این کاهش محصول به‌علت کاهش وزن و تعداد محصول در خوشه بود. همچنین کمبود آب موجب کاهش شاخص کارایی مصرف آب (در عملکرد گیاه و زیست توده) شد.

نتایج مطالعات طولانی‌مدت تونس^۳ و همکاران (۱۵) روی آثار شوری آب آبیاری نشان داد که اگرچه شوری بالا باعث کاهش معنی دار عملکرد پسته نشده است، اما با توقف استفاده از آب‌شور، عملکرد پسته به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. همچنین با افزایش شوری آب آبیاری نسبت مقادیر N/Na ، P/Na ، K/Na ، Ca/Na ، Na/Na و P/Na تجمعی در برگ درختان پسته کاهش یافت. البته باید به این نکته دقت داشت که گرچه شوری یک عامل محیطی محدودکننده کیفیت و بهره‌وری عملکرد گیاه است، اما واکنش گیاهان نسبت به شوری یکسان نیست. به‌عنوان نمونه، در حالی که بیشتر گیاهان غلات نسبت به شوری حساس هستند تعدادی از علف‌های هالوفیت (مانند علف ریسمانی) توانایی تحمل شوری و رشد در این شرایط (حتی تا شوری حدود ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) را دارند (۳). عامر (۱) در تحقیقی واکنش گیاه ذرت را تحت اثر سطوح مختلف شوری و آبیاری مورد بررسی قرار داد. در اثر افزایش شوری و یا کاهش آب آبیاری عملکرد به‌طور معنی‌داری کاهش یافت، ولی اثر متقابل این دو تیمار معنی‌دار نبود.

در سال‌های اخیر گسترش شهرنشینی، نفوذ فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، وجود خشکسالی‌ها و بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در دشت اردبیل باعث افت کیفیت و سطح آب زیرزمینی آن شده است (۴). بنابراین با توجه به مطالب بیان شده در بالا، بررسی عملکرد و مدیریت کشت گیاه در شرایط تنش خشکی و شوری آب در شهرستان اردبیل امری ضروری و کاربردی به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر، اثر شوری‌های مختلف آب‌آبیاری بر عملکرد، شاخص کارایی مصرف آب و تبخیر و تعرق گوجه‌گیلاسی تحت تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفته است.

1- Cantore

2- Cherry tomato cluster

3- Mehdi Tounsi

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Physical and chemical properties of the studied soil

درصد ذرات خاک Soil particles (%)			بافت خاک Soil texture	چگالی ظاهری ρ_b (gr/cm^3)	هدایت الکتریکی خاک EC (dS/m)	رطوبت اشباع (درصد) θ_s (%)	ظرفیت زراعی (درصد) θ_{FC} (%)	بی‌کربنات HCO_3 (meq/l)	کلسیم+ منیزیم $Ca+Mg$ (meq/l)	کلر Cl (meq/l)	درصد کربن آلی % O.C
شن Sand	سیلت Silt	رس Clay									
34	36	30	لومی رسی	1.14	2.14	47	33	5	8.8	12	3.51

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده

Table 2- Chemical properties of the used water

کربنات CO_3 (meq/l)	بی‌کربنات HCO_3 (meq/l)	کلسیم+ منیزیم $Ca+Mg$ (meq/l)	سولفات SO_4 (mg/l)	کلر Cl (meq/l)	سدیم Na (mg/l)	پتاسیم K (mg/l)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	اسیدیته pH
0	5.3	3.2	50.199	0.8	98.5	2	.646	6.86

تحقیق در جدول ۳ آرایه شده است.

همچنین در شکل ۱ نحوه جانمایی تیمارهای طرح آماری آرایه شده است. در این آزمایش، گوجه‌گیلاسی در گلدان‌هایی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۲۶ و ۲۷ سانتی‌متر کشت شد. در هر گلدان ۸/۵ کیلوگرم خاک (با مشخصات بیان‌شده در جدول ۱ قرار داده شد. خاک‌ها در دو مرحله در درون گلدان‌ها ریخته شد و تا حد ممکن سعی شد تراکم مناسب جهت رسیدن به چگالی ظاهری خاک مزرعه رعایت شود. برای کشت گوجه‌گیلاسی از نشاء استفاده شد (در هر گلدان یک نشاء گوجه‌گیلاسی). اولین آبیاری در اواسط تیرماه ۱۳۹۵ و آخرین آبیاری در اواسط آبان ۱۳۹۵ صورت گرفت.

جدول ۳- ترکیب تیمارهای طرح آماری

Table 3- Combination of statistical design treatments

تنش خشکی Drought stress	شوری آب آبیاری (ds/m) Irrigation water salinity	
	$S_2=7$	$S_1=4$
$I_1=40\% \text{ SMD}$	I_1S_2	I_1S_1
$I_2=50\% \text{ SMD}$	I_2S_2	I_2S_1
$I_3=65\% \text{ SMD}$	I_3S_2	I_3S_1

اعمال تیمارها حدود دو ماه بعد از اولین آبیاری نشاء گوجه‌گیلاسی انجام شد و در این مدت هیچ‌گونه تنش خشکی و شوری به گیاه وارد نشد. از طرفی برای راحت انجام شدن زهکشی، در کف گلدان‌ها دو سانتی‌متر فیلتر شنی قرار داده شد. برای اعمال تیمارهای مختلف شوری از ترکیب نمک کربنات کلسیم و کلرید سدیم (با نسبت ۲:۱) جهت جلوگیری از تأثیر سدیم بر ساختمان خاک استفاده شد.

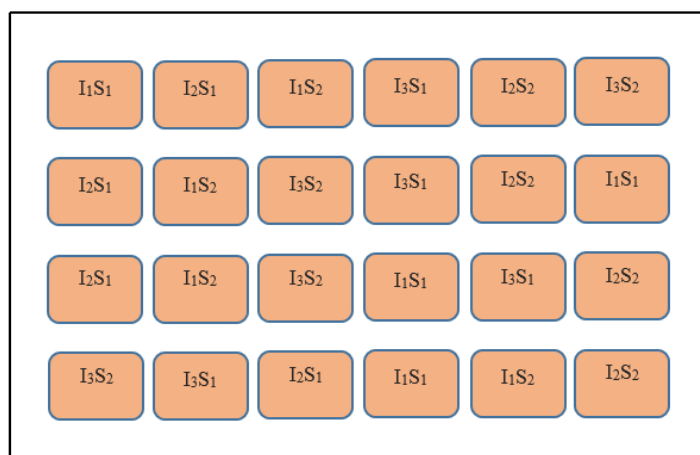
مواد و روش‌ها

این تحقیق در سال ۱۳۹۵ در شهرستان اردبیل مرکز استان اردبیل انجام شد. شهرستان اردبیل دارای آب و هوای سرد و کوهستانی است. محل انجام تحقیق دارای طول جغرافیایی $48^{\circ}17'$ شرقی و عرض جغرافیایی $38^{\circ}12'$ شمالی و ارتفاع ۱۳۸۴ متر از سطح دریا می‌باشد. این تحقیق در شرایط گلخانه و در دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی انجام شد.

مشخصات خاک مزرعه‌ای که جهت کشت به گلدان‌های مورد آزمایش منتقل شد در جدول ۱ آرایه شده است. بر اساس نتایج جدول ۱، بافت خاک لومی رسی است. همچنین مقادیر رطوبت حجمی در نقاط رطوبتی اشباع و ظرفیت مزرعه به ترتیب برابر ۴۷ و ۳۳ درصد و مقدار کربن آلی برابر ۳/۵۱ درصد به دست آمد. همچنین در جدول ۲ خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده در این تحقیق آرایه شده است (تیمار شاهد).

در این مطالعه، تیمارها شامل شوری آب آبیاری و تنش خشکی بودند. تیمار شوری آب آبیاری در دو سطح ($S_1=4$ و $S_2=7$ دسی‌زیمنس بر متر) و تیمار تنش خشکی در سه سطح (آبیاری در نقاط ۴۰، ۵۰ و ۶۵ درصد تخلیه رطوبتی خاک به ترتیب I_1 ، I_2 و I_3) انجام شد. طرح آزمایشی در این پژوهش فاکتوریل بود که در قالب بلوک-های کامل تصادفی با چهار تکرار اجرا شد.

از طرفی جهت مقایسه عملکرد گیاه در شرایط تنش خشکی و شوری با شرایط بدون تنش، از تیمار شاهد با مشخصات شوری کمتر از یک دسی‌زیمنس و آبیاری بدون تنش خشکی در سه تکرار استفاده شد. محاسبات آماری در این تحقیق، با کمک نرم‌افزار (VERSION 2.10) MSTATC انجام شد. ترکیب تیمارهای طرح آماری این



شکل ۱- جانمایی طرح آماری
Figure 1- Lay out of statistical design

تبخیر و تعرق واقعی گیاه، ET_{max} : بیشینه تبخیر و تعرق گیاه و K_y : ضریب واکنش عملکرد گیاه نسبت به تنش خشکی است (۵).

نتایج و بحث

بررسی نتایج آماری

نتایج تحلیل آماری اثر تیمارهای تنش خشکی و شوری بر عملکرد، اجزای عملکرد، کارایی مصرف آب و مجموع تبخیر و تعرق در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد اثر متقابل دو عامل تنش خشکی و شوری بر پارامترهای مورد مطالعه معنی‌دار نبود. نتایج مطالعات عامر (۱) نیز نشان داد اثر متقابل شوری و کاهش میزان آب آبیاری بر مقدار عملکرد گیاه معنی‌دار نیست. از طرفی بر اساس نتایج جدول ۴، اثر تیمار تنش خشکی فقط بر تعداد گل در هر گلدان (در سطح پنج درصد) معنی‌دار بود. نتایج برخی تحقیقات مشابه نیز مویید این مطلب بود. به‌طور نمونه در تحقیقی که بر روی گیاه گوجه‌فرنگی انجام شد، نتایج نشان داد میان سود خالص به‌دست آمده در اثر اعمال ۲۵ درصد کم آبیاری و آبیاری کامل تفاوتی وجود نداشت که این کاهش حجم آب مصرفی و هزینه در سطح کشور رقم بسیار قابل توجهی است (۶).

اما از طرفی بررسی اثر تیمار شوری آب آبیاری بر مجموع تبخیر و تعرق، عملکرد گوجه‌فرنگی و کارایی مصرف آب به‌ترتیب در سطوح پنج، یک و پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). در جدول ۵ مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن برای تیمار شوری آب آبیاری ارائه شده است که در ادامه هر کدام از صفات به‌طور مفصل مورد بحث قرار گرفته است.

به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک و تعیین زمان آبیاری از دستگاه رطوبت‌سنج مدل PMS-714 استفاده شد (۱۳). به‌منظور اطمینان از صحت کار دستگاه رطوبت‌سنج، پیش از شروع کار دستگاه واسنجی شد. رابطه ریاضی مربوط به واسنجی دستگاه رطوبت‌سنج مدل PMS-714 در زیر ارائه شده است (رابطه (۱)).

$$\Theta_{VR} = 7.6703\Theta_V^{2.658} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Θ_{VR} : رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه رطوبت‌سنج مدل PMS-714 و Θ_V : رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده به روش مستقیم اندازه‌گیری رطوبت است. همچنین مقدار ضریب R^2 در این رابطه برابر ۰/۹۲ به‌دست آمد که بیانگر میزان برازش بالا بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده توسط دستگاه و روش مستقیم می‌باشد.

مقادیر تبخیر و تعرق گیاه نیز از طریق اندازه‌گیری‌های روزانه وزن گلدان‌ها و محاسبه اختلاف دو روز متوالی به‌دست آمد. همچنین جهت محاسبه کارایی مصرف آب از رابطه پیشنهادی فائو (رابطه (۲)) استفاده شد.

$$WUE = (Y/ET) \times 100 \quad (2)$$

که در رابطه (۲)، WUE: شاخص کارایی مصرف آب (برحسب کیلوگرم بر متر مکعب)، Y: عملکرد (بر حسب تن در هکتار) و ET: تبخیر و تعرق گیاه (بر حسب میلی‌متر) می‌باشد (۱۴).

از طرفی جهت تعیین میزان حساسیت عملکرد گیاه به تنش خشکی از رابطه (۳) که توسط فائو ارائه شده است استفاده شد.

$$1 - (Y/Y_{max}) = K_y \times (1 - (ET/ET_{max})) \quad (3)$$

در رابطه (۳):

Y: مقدار عملکرد واقعی گیاه، Y_{max} : بیشینه عملکرد گیاه، ET:

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده

Table 4- Analysis results of variance of the measured characteristics

منابع تغییرات Sources of variance	درجه آزادی Df	مجموع تبخیر و تعرق Total of evapotranspiration	عملکرد Yield	کارایی مصرف آب WUE	تعداد میوه در هر گلدان Number of fruits per pot	تعداد گل در هر گلدان Number of flower per pot
تکرار Replication	3	207.57 ^{ns}	1245.4 ^{ns}	9.06 ^{ns}	40.15 ^{ns}	55.48 ^{ns}
تنش خشکی Drought stress (A)	2	159.22 ^{ns}	773.7 ^{ns}	31.44 ^{ns}	120.12 ^{ns}	*543.04
شوری آب Water salinity (B)	1	*976.65	**3626.04	*60.8	26.04 ^{ns}	35.04 ^{ns}
تنش خشکی × شوری A × B	2	76.74 ^{ns}	123.04 ^{ns}	3.99 ^{ns}	76.79 ^{ns}	38.29 ^{ns}
خطا Error	15	199.5	337.7	9.48	54.88	93.9

ns, * و **: به ترتیب بیانگر عدم اختلاف معنی دار و اختلاف معنی دار در سطوح احتمال پنج و یک درصد می باشند
ns, * and **: Non significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively

جدول ۵- میانگین تبخیر و تعرق کل، عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری گوجه‌گیلاسی در دو تیمار شوری آب آبیاری

Table 5- Average Total of evapotranspiration, yield and irrigation water productivity of the Cherry tomato cluster in the two irrigation water salinity treatments

شوری آب آبیاری (ds/m) irrigation water salinity	مجموع تبخیر و تعرق (mm) Total of evapotranspiration	عملکرد در هر گلدان (gr) Yield per pot	کارایی مصرف آب (kg.m ⁻³) Water use efficiency
S ₁ = 4	144 ^a	91.5 ^a	11.968 ^a
S ₂ = 7	131.3 ^b	66.9 ^b	9.617 ^b

حرف یکسان در هر ستون بیانگر عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین اعداد با احتمال $p < 0.05$ است

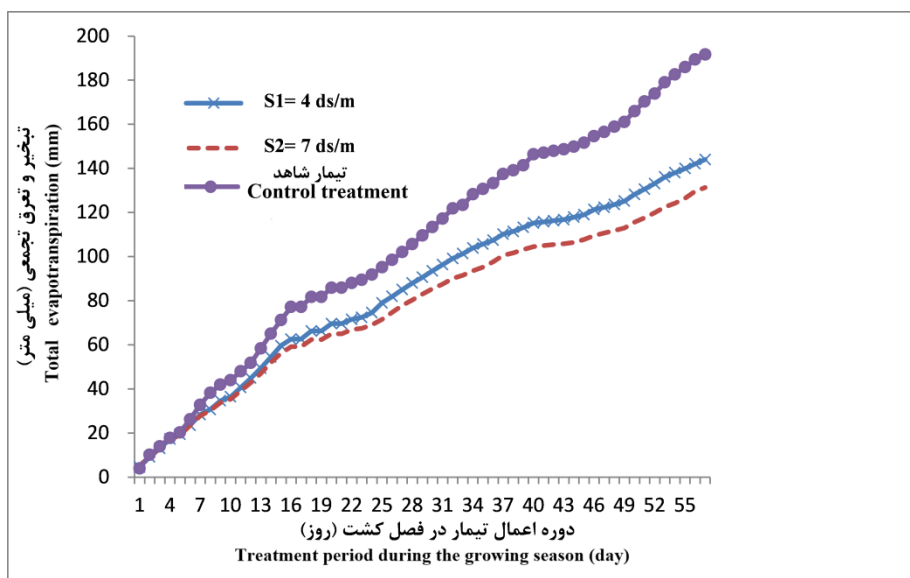
Same letters at each column are indicating not significant difference between numbers at probability $p < 0.05$

مجموع تبخیر و تعرق

بر اساس نتایج این تحقیق (جدول ۴) اثر شوری آب آبیاری بر مجموع تبخیر و تعرق گوجه‌گیلاسی در سطح پنج درصد معنی‌دار بود. مطابق داده‌های جدول ۵ میزان کل تبخیر و تعرق (در دوره اعمال تیمار شوری آب آبیاری) در تیمار S₂ حدود ۱۰ درصد نسبت به تیمار S₁ کاهش یافته است. از آنجایی که تبخیر و تعرق گیاه رابطه مستقیم با عملکرد آن دارد این مساله می‌تواند موجب کاهش عملکرد گیاه گردد که حتماً باید در مدیریت آبیاری به آن توجه شود. حیدری‌نیا و همکاران (۹) نیز در تحقیقات خود مشاهده کردند که با افزایش شوری آب آبیاری از ۲ دسی‌زیمنس بر متر به ۴/۵ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر مقدار تبخیر و تعرق به ترتیب ۱۲/۴ و ۲۴/۸ درصد کاهش یافت. یکی از این راهکارهایی که می‌تواند اثر منفی شوری را تا حد زیادی جبران نماید افزایش مقدار آب آبیاری در شوری‌های بالاتر

است. نتایج پژوهش محمدی و همکاران (۱۷) نشان داد می‌توان با کمک افزایش عمق آب آبیاری، از شوری‌های بالاتر در آبیاری محصول استفاده کرد بدون اینکه عملکرد کاهش معنی‌داری (نسبت به آب‌های با EC کمتر) داشته باشد.

مقایسه روند تبخیر و تعرق در طول فصل کشت (دوره اعمال تیمار) بین تیمارهای شوری و شاهد در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌گردد در هفته اول مقادیر تبخیر و تعرق در تیمارهای شوری و شاهد تقریباً یکسان بوده است که نشان می‌دهد هنوز گیاه تحت تأثیر شوری و اثرات منفی آن قرار نگرفته است. در ادامه از هفته دوم تفاوت بین تیمارهای شوری و شاهد به وضوح دیده می‌شود و از هفته سوم هم تفاوت بین مقادیر شوری متوسط (S₁) و بیشتر (S₂) مشخص می‌گردد.

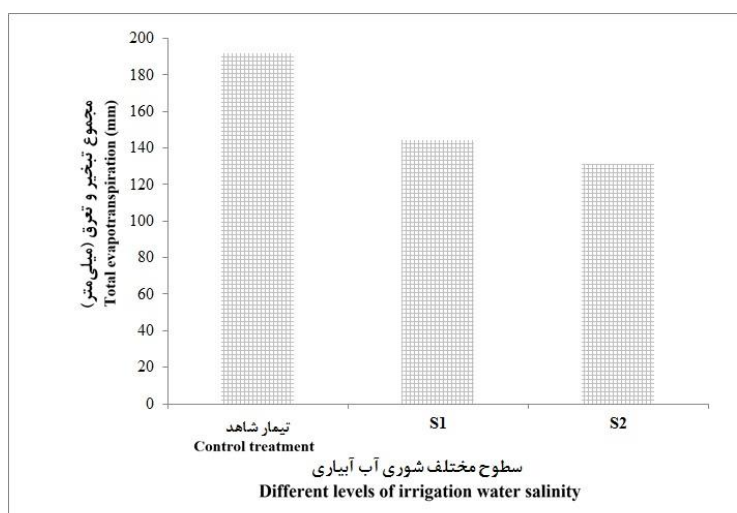


شکل ۲- مقایسه روند تبخیر و تعرق تجمعی در تیمارهای مختلف
Figure 2- Comparison of cumulative evapotranspiration in different treatments

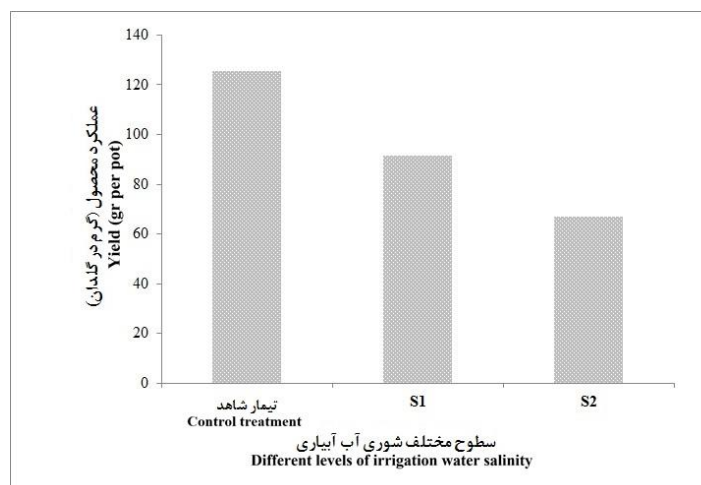
عملکرد

نتایج این تحقیق بیانگر اثر معنی دار (کاهش) شوری آب آبیاری بر عملکرد گوجه گیلاسی بود (جدول ۴). همان طور که در جدول ۵ مشاهده می گردد با افزایش میزان شوری آب آبیاری از چهار به هفت دسی زیمنس بر متر میزان عملکرد ۲۷ درصد کاهش یافت. نتایج بسیاری از تحقیقت مشابه بیانگر کاهش معنی دار عملکرد و شاخص های رشد گیاه در اثر آبیاری با آب شور داشته است (۷، ۱۰، ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۹، ۲۱، ۲۲ و ۲۳).

مقایسه مجموع تبخیر و تعرق در طول دوره اعمال تیمار در دو سطح شوری S_1 و S_2 با تیمار شاهد در شکل ۳ ارایه شده است. بر اساس نتایج این تحقیق، مقادیر تبخیر و تعرق در تیمارهای شوری S_1 و S_2 به ترتیب ۲۵ و ۳۲ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است (شکل ۳). از دلایل کاهش تبخیر و تعرق در تیمارهای شور نسبت به تیمار شاهد می توان به شرایط ایجاد شده در اثر تنش شوری مانند تجمع نمک در ناحیه ریشه و کاهش تهویه در تیمارهای دارای آب شور اشاره کرد (۱۲).



شکل ۳- مقایسه مجموع تبخیر و تعرق در تیمارهای مختلف
Figure 3- Comparison of total evapotranspiration in different treatments



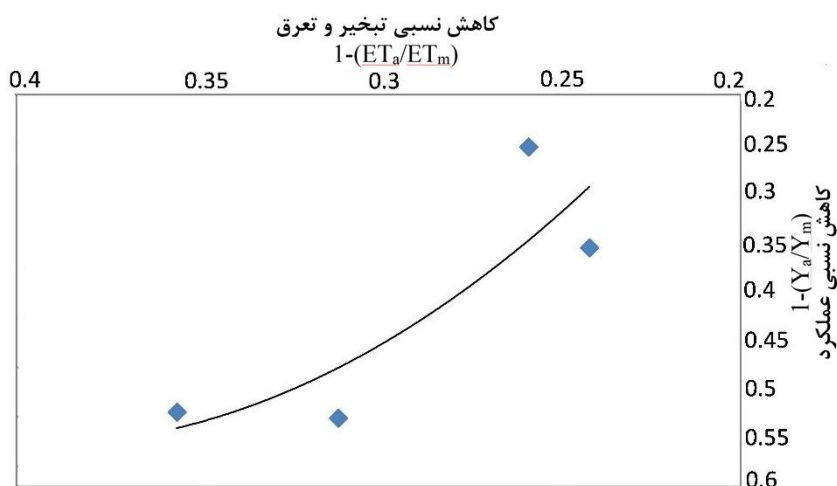
شکل ۴- مقایسه عملکرد در تیمارهای مختلف
Figure 4- Comparison of yield in different treatments

تیمارهای شور نسبت به تیمار شاهد می‌شود. در این پژوهش‌ها راهکارهایی جهت کاهش اثرات منفی شوری وارده بر عملکرد گیاه ارایه شد که اختلاط آب شور با آب شیرین یکی از این روش‌ها می‌باشد که می‌تواند موجب کاهش اثر منفی ناشی از پتانسیل اسمزی وارده به گیاه گردد (۸ و ۲۰).

بررسی تغییرات ضریب واکنش به آبیاری
رابطه بین کاهش نسبی تبخیر و تعرق با کاهش نسبی محصول به‌وسیله نمودار در شکل ۵ ارایه شده است.

به‌طور مثال نتایج مطالعات نصرالهی و همکاران (۱۹) و حیدری‌نیا و همکاران (۹) نشان داد که استفاده از تیمارهای آب آبیاری شور از ۴ تا ۶ و ۷ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب موجب کاهش عملکرد با مقادیر ۲ تا ۲۰ درصد و ۲۳ تا ۵۹ درصد می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد میزان عملکرد در تیمارهای شوری S_1 و S_2 به ترتیب $27/2$ و $46/7$ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است. یکی از دلایل اصلی کاهش عملکرد در اثر افزایش شوری آب آبیاری می‌تواند کاهش میزان تبخیر و تعرق گیاه باشد.

بررسی سایر تحقیقات مشابه نشان داد افزایش شوری موجب کاهش عملکرد، اجزای عملکرد و کاهش نسبت پتاسیم به سدیم در

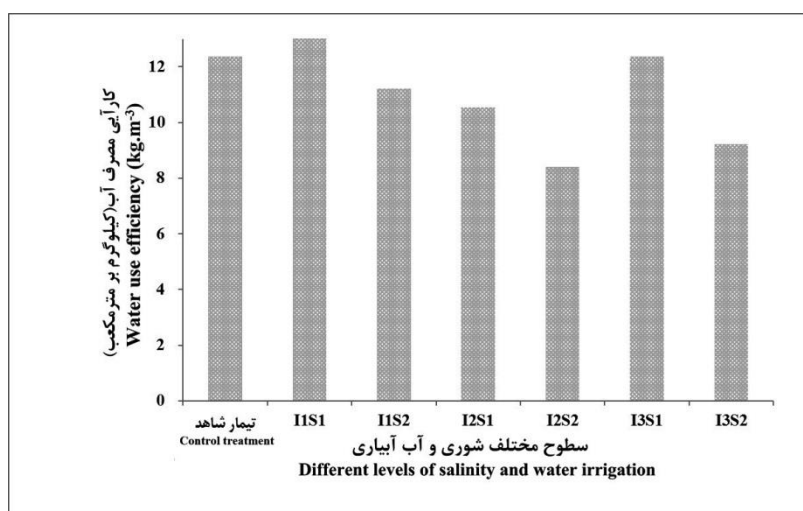


شکل ۵- رابطه کاهش نسبی تبخیر و تعرق و کاهش نسبی عملکرد
Figure 5- Relation between relative reduction of evapotranspiration and relative reduction of yield

همان طور که در شکل مشاهده می‌گردد با بالا رفتن مقادیر کاهش نسبی تبخیر و تعرق، میزان عملکرد هم کاهش می‌یابد. در این تحقیق مقادیر K_y بین ۰/۹۷ تا ۱/۶۷ متغیر بود. میانگین مقادیر K_y برابر با ۱/۳۹ به دست آمد که نسبت به مقدار K_y گزارش شده توسط فائو برای گیاه گوجه‌فرنگی در شرایط تنش خشکی (برابر با ۱/۰۵) بیشتر است. علت این امر می‌تواند اثر قابل توجه شوری آب آبیاری بر عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی باشد. محمدی و همکاران (۱۷) در تحقیقی مشابه دریافتند که با افزایش افت نسبی تبخیر و تعرق، میزان افت نسبی عملکرد گوجه‌فرنگی افزایش می‌یابد. آن‌ها در تحقیق‌شان مقادیر K_y را برابر ۱/۰۹ تا ۲/۹۴ به دست آوردند.

شاخص کارایی مصرف آب

میانگین مقادیر کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف شوری و آب آبیاری در شکل ۶ ارایه شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌گردد کمترین و بیشترین مقادیر کارایی مصرف آب مربوط به تیمار I_1S_1 و I_2S_2 به ترتیب برابر با ۸/۴۱ و ۱۳/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب مترمکعب بودند. اما به‌طور کلی بر اساس نتایج این تحقیق، فقط اثر تیمار شوری آب آبیاری بر کارایی مصرف آب (در سطح پنج درصد) معنی‌دار بود (جدول ۴).



شکل ۶- مقایسه کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف

Figure 6- Comparison of water use efficiency in different treatments

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر شوری آب آبیاری بر گیاه گوجه‌گیلاسی در شرایط اعمال تنش خشکی مورد بررسی قرار گرفت. به‌طور کلی نتایج این تحقیق بیانگر اثر معنی‌دار شوری آب آبیاری بر مقادیر مجموع تبخیر و تعرق، عملکرد و کارایی مصرف آب (به‌ترتیب در سطوح پنج، یک و پنج درصد) بود. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش شوری آب آبیاری از چهار به هفت دسی‌زیمنس بر متر، میزان کل تبخیر و تعرق ۱۰ درصد کاهش یافت. از طرفی در اثر تنش شوری اعمال شده میزان عملکرد گوجه‌فرنگی در بیشترین مقادیر شوری آب آبیاری تا ۲۷ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت که یکی از دلایل اصلی آن می‌تواند کاهش میزان تبخیر و تعرق کل در فصل کشت باشد. در پایان، نکته مهمی که باید به آن توجه داشت این است که گرچه بر اساس نتایج این تحقیق استفاده از آب شور آبیاری موجب

از طرفی، مقدار شاخص کارایی مصرف آب در تیمار شاهد برابر ۱۲/۳۷ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دست آمد (شکل ۶). بر اساس نتایج این تحقیق، مقدار شاخص کارایی مصرف آب در تیمارهای S_1 و S_2 به‌ترتیب ۳/۴ و ۲۲/۳ درصد نسبت به تیمار شاهد کاهش یافت. این نتایج بیانگر این است که اختلاف ناچیزی از نظر میزان کارایی مصرف آب بین تیمار شاهد و تیمار S_1 وجود داشت در حالی که این تفاوت بین تیمار شاهد و تیمار S_2 قابل توجه و معنی‌دار بود. در تحقیقات مشابه اثر معنی‌دار و کاهشی شوری آب آبیاری بر مقدار شاخص کارایی مصرف آب تایید شده است (۲، ۱۶، ۱۸ و ۱۹). نتایج تحقیق میشل مولز و همکاران (۱۶) روی گوجه‌فرنگی نشان داد که در اثر تنش شوری، هدایت هیدرولیکی ریشه‌ها به‌طور معنی داری کم شده و در نتیجه میزان کارایی مصرف آب کاهش یافت.

قبول و توجیه‌پذیر باشند. بنابراین انجام مطالعات در زمینه اثر شوری بر کشت و شاخص‌های کارایی مصرف آب و مباحث اقتصادی مربوط به آن امری ضروری به‌نظر می‌رسد.

کاهش عملکرد، تبخیر و تعرق کل و کارایی مصرف آب به‌ترتیب برابر ۲۷، ۸/۹ و ۱۹/۲ درصد نسبت به تیمار شاهد شد، اما چه بسا در آینده‌ای نزدیک با افزایش میزان هزینه‌های تولید آب و کاهش کمی و کیفی منابع آب، حتی مقادیر بیان شده نیز از نظر اقتصادی قابل

منابع

- 1- Amer K.H. 2010. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. *Agricultural Water Management*, 97:1553– 1563.
- 2- Cantore V., Lechkar O., Karabulut E., Sellami M.H., Albrizio R., Boari F., Stellacci A.M., and Todorovic M. 2016. Combined effect of deficit irrigation and strobilurin application on yield, fruit quality and water use efficiency of “cherry” tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Agricultural Water Management*, 167:53–61.
- 3- Courtney A.J., Xu J., and Xu Y. 2016. Responses of growth, antioxidants and gene expression in smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) to various levels of salinity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 99: 162- 170.
- 4- Daneshvar Vousoughi F., Dinpashoh Y., and Aalami M. 2011. Effect of drought on groundwater level in the past two decades (case study: Ardebil Plain). *Water and Soil Science*, 21(4): 165- 179. (In Persian with English abstract)
- 5- Doorenbos J., and Kassam A.H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage paper no. 33*.
- 6- Faalian A., Ansari H., Kafi M., Alizadeh A., and Moghaddasi M. 2015. Effect of combined salinity and drought stress on economy of soilless culture of greenhouse tomato. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3):317-330. (In Persian with English abstract)
- 7- Faalian A., Ansari H., Kafi M., Alizadeh A., and Moghaddasi M. 2015. Effect of combined salinity and water stress on tomato yield in soilless culture. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(4):447-463. (In Persian with English abstract)
- 8- Ghaedi S., Afrasiab P., and Liaghat A.M. 2016. Comparison of conjunction methods of sorghum grown in saline and non-saline water and salt adjustment- physiological properties in the soil profile. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 39(1):167-179. (In Persian with English abstract)
- 9- Heydarnejad S., and Ranjbar Fordoii A. 2014. Assessment of salinity stress on some growth characteristics and ion accumulation in *Seidlitzia rosmarinus*. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 4:1-10. (In Persian)
- 10- Heydarynia M., Naseri A.A., and Broomandnasab S. 2016. Effect of wheat residues management and irrigation with saline water on spring maize yield and soil profile salinity changes. *Journal of Water Research in Agriculture*, 30(3):285-298. (In Persian with English abstract)
- 11- Karandish F., and Torajzadeh A.A. 2015. Effect of irrigation method with saline water on yield of sorghum and improving water and nutrient use efficiency. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(1):49-61. (In Persian with English abstract)
- 12- Karimi Gh. H. 2012. Groundwater contribution with different salinities on providing maize water requirements and maize yields. Ph.D. Thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian with English abstract)
- 13- Kesari Sh., Mandal R., Bhunia G.S., Kumar K., and Das P. 2014. Spatial distribution of *P. argentipes* in association with agricultural surrounding environment in North Bihar, India. *Journal of Infection in Developing Countries*, 8(3):358-364.
- 14- Kheirabi J., Tavakkoli A.R., Entesari M.R., and Salamat A.R. 1996. Deficit irrigation manual. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage, Tehran. (In Persian)
- 15- Mehdi Tounsi H., Chelli Chaabouni A., Mahjoub Boujnah D., and Boukhris M. 2017. Long-term field response of pistachio to irrigation water salinity. *Agricultural Water Management*, 185:1– 12.
- 16- Michele Moles T., Pompeiano A., Huaranca Reyes T., Scartazza A., and Guglielminetti L. 2016. The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109: 262- 272.
- 17- Mohammadi M., Liaghat A.M., and Molavi H. 2010. Optimization of water use and determination of tomato sensitivity coefficients under combined salinity and drought stress in Karaj. *Journal of Water and Soil*, 24(3):583-592. (In Persian with English abstract)
- 18- Mohammadi M., Liaghat A.M., Parsinejad M., and Hasanoghli A.R. 2011. Evaluation of effect of surface and groundwater irrigation with saline water on yield, yield components and water use efficiency of Tomato. *Journal of Water Research in Agriculture*, 25(1):47-55. (In Persian with English abstract)
- 19- Nasrolahi A.H., Houshmand A.R., and Broomandnasab S. 2015. Evaluation of Maize response to salinity under drip irrigation and irrigation management. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38(4):25-32. (In Persian with English abstract)
- 20- Norouzi H., roshanfekr H.A., hasibi P., and mesgarbashi M. 2014. Effect of irrigation water salinity on yield and

- quality of two forage millet cultivars. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(3):551-560. (In Persian with English abstract)
- 21- Ors S., and Suarez D.L. 2017. Spinach biomass yield and physiological response to interactive salinity and water stress. *Agricultural Water Management*, 190: 31– 41.
- 22- Reis M., Coelho L., Santos G., Kienle U., and Beltrao J. 2015. Yield response of stevia (*Stevia rebaudiana* Bertoni) to the salinity of irrigation water. *Agricultural Water Management*, 152: 217– 221.
- 23- Yazdani V., Davari K., Ghahreman B., and Kafi M. 2015. Modeling the effects of salinity and water deficit stress on growth and yield parameters of two cultivars of Canola. *Journal of Irrigation Science and Engineering*, 38(4):137-154. (In Persian with English abstract)



Evaluation the Effects of the Irrigation Water Salinity and Water Stress on Yield Components of Cherry Tomato

J. Ramezani Moghaddam^{1*}- Y. Hosseini²- M. R. Nikpour³- A. Abdoli⁴

Received: 31-01-2018

Accepted: 26-05-2018

Introduction: The largest share of water consumption in Iran is related to the agricultural sector. Therefore, in order to save water resources, priority is given to reducing irrigation water consumption. On the other hand, reducing of water quality and salinization are the main problems which are commonly found in the areas with limited water resources. One of the most important effects of salinity is the reduction of yield and its inhibitory effects on plant growth and metabolism. Also, increasing salinity can reduce potassium, calcium and magnesium ions. One of the significant points regarding the effects of salinity stress is a significant decrease in the hydraulic conductivity of the roots, which leads to a decrease in the water use efficiency index. According to the food and agriculture organization (FAO), more than 40 percent of Iran's irrigated lands are affected by salinity stress, which is generally found in dry and semi-arid areas. Therefore, studying the combined effect of stress caused by salinity and water stress can be used to provide management solutions for irrigation and crop production.

Materials and Methods: This study was conducted in greenhouse laboratory at University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran during August to November 2016. In this research, the effects of saline water on cherry tomato yield under water stress conditions were investigated. The applied treatments included irrigation with saline water (in two levels: $S_1=4\text{ds/m}$ and $S_2=7\text{ds/m}$) and water stress (in three levels, irrigation at 40, 50 and 65% field capacity, respectively, I1, I2, I3). The experimental design used in this research was a completely randomized block design with four replications. On the other hand, in order to compare the plant yield under water stress and salinity conditions with non-stress conditions, control treatment with salinity characteristics less than 1ds/m and irrigation without water stress were used in three replications. In this experiment, cherry tomatoes were cultivated in the pots with diameter and height of 26 and 27 centimeters, respectively. The moisture meter (Model: PMS-714) was also used to measure soil moisture and determine the irrigation time. The most important parameters included cherry tomato yield, total evapotranspiration and water use efficiency index. It should be mentioned that analyses of the results were done by MSTATC software (Version: 2.10).

Results and Discussion: The results of this study showed that the interaction between two factors of water and salinity stress on the parameters was not significant, but the effects of salinity stress on yield, total evapotranspiration and water use efficiency (in two levels: 2% and 5%) are significant. Also, the greatest effect of salinity stress on cherry tomato yield was observed, so that by increasing the amount of irrigation water salinity from 4 to 7 ds/m, the yield was decreased by 27%. Also, the performance in salinity treatments of S_1 and S_2 decreased by 27.2% and 46.7%, respectively, compared to the controlled treatment. Probably the reason for the yield reduction caused by decreasing in plant evapotranspiration and plant growth and metabolism. In addition, water use efficiency index in treatments of S_1 and S_2 decreased by 3.4% and 22.3%, respectively, compared to the controlled treatment. As it can be seen, the differences in water use efficiency between the control and S_1 treatments were not significant. In this study, the average values of Ky (plant response coefficient to salinity and water stresses) were achieved 1.39, which was higher than the value that was reported by FAO for tomato plant under water stress conditions (equal to 1.05). This can be due to the significant effect of saline irrigation water on the yield of the tomato plants. Finally, based on the results of this research, it can be said that although salinity decreased yield significantly at 1% confidence level, in the coming years, with severe water resource

1 and 3- Assistant Professors of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Iran

(*- Corresponding Author Email: j_ramezani@uma.ac.ir)

2- Associate Professor of Irrigation Department, Agriculture and Natural Resources Faculty of Moghan, University of Mohaghegh Ardabili

4- Former M.Sc. Student in Irrigation and Drainage, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

constraints and increased costs for its preparation, this yield loss can be economical and feasible.

Conclusions: In this research, the effect of saline water on cherry tomato yield under water stress conditions was investigated. According to the results of this study, with increasing salinity of irrigation water from 4 to 7 ds/m, total evapotranspiration decreased by 10%. On the other hand, due to salinity stress, tomato yield was decreased to 27% in the most salinity levels of irrigation water compared to control treatment; one of the main reasons of which could be the reduction of total evapotranspiration in the growing season. In the end, the important point to note is that although, based on the results of this study, utilization of irrigation saline water decreased the yield, total evapotranspiration and water use efficiency by 27%, 8.9% and 19.2%, respectively compared to the control treatment, but in the near future, by increasing the water production costs and the quantitative reduction of water resources, even use of saline water is economically feasible and justifiable.

Keywords: Irrigation water salinity, Water stress, Water use efficiency, Yield of cherry tomato cluster



بررسی اثر کم‌آبیاری بخشی ریشه در دورهای آبیاری مختلف بر کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان

مجتبی چراغی زاده^۱ - علی شاهنظری^{۲*} - میرخالق ضیاءتباراحمدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

چکیده

مبنای کم‌آبیاری بخشی ریشه، آبیاری متناوب نیمی از ریشه و خشک نگه داشتن نیمه دیگر است. ریشه گیاه در قسمت تر، آب کافی را جذب می‌کند؛ بخش دیگر از ریشه در خاک خشک، با عکس‌العمل نسبت به خشکی و فرستادن علائمی به روزه‌ها، با تحت تأثیر قرار دادن مقدار بازشدگی آن‌ها، باعث کاهش تلفات آب می‌شود. این پژوهش روی گیاه آفتابگردان در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، در سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ اجرا شد. برای اجرا از آزمایش کرت‌های خرد شده با سه فاکتور اصلی (دور آبیاری) و سه فاکتور فرعی (مقدار آب آبیاری) در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار استفاده شد. دورها شامل آبیاری بعد از ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A بود (به‌ترتیب F-20، F-35 و F-50). مقدار آب آبیاری در ۳ مقدار ۱۰۰٪، ۷۵٪ و ۵۵٪ نیاز آبی بود (به‌ترتیب FI، PRD-75 و PRD-55). اجرای FI به صورت معمولی (دو طرفه) و PRD-75 و PRD-55 به صورت متناوب در طرفین ریشه (آبیاری بخشی) بود. در بررسی عامل دور آبیاری، بر مبنای نتایج ۲ سال انجام آزمایش، بهترین نتایج برای پارامترهای رشد گیاه، در دور آبیاری بعد از ۲۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A بود. همچنین بهترین نتایج برای پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان در آبیاری کامل نتیجه شد. با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار در غالب پارامترهای رشد بین آبیاری کامل و کم‌آبیاری بخشی ریشه در سطح ۵۵٪، در صورت اجرای کم‌آبیاری بخشی ریشه، سطح ۷۵٪ برای کم‌آبیاری توصیه می‌شود. در مورد عامل دور آبیاری، برای غالب پارامترهای رشد گیاه بین تیمارهای F-20 و F-50 اختلاف معنی‌دار وجود داشت؛ لذا با در نظر گرفتن این مورد و نیز مسأله افزایش هزینه بهره‌برداری با کاهش دور آبیاری، دور آبیاری F-35 توصیه می‌شود. بررسی مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری برای عامل دور آبیاری حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار بین هر سه دور آبیاری بود. بیشترین مقادیر در F-50 و کمترین مقادیر در F-20 حاصل شد. با وجود افزایش در مقدار مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری در PRD-75 در مقایسه با سایر تیمارها برای هر دو سال انجام آزمایش، این اختلاف معنی‌دار نبود. با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمار دور آبیاری F-35 و F-50 در سال دوم آزمایش و نیز وجود افزایش نسبی در مقدار این مشخصه در PRD-75 در مقایسه با دو تیمار دیگر، به منظور داشتن کارایی مصرف آب بیشتر، انجام کم‌آبیاری بخشی ریشه در سطح ۷۵٪ با دور آبیاری F-35 توصیه می‌شود. با بررسی همزمان مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری و نیز پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان، این نتیجه حاصل شد که با بهره‌گیری از PRD-75 در دور آبیاری F-35، می‌توان ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری و افزایش در مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری، با کمترین کاهش‌ها در مشخصه‌های رشد گیاه آفتابگردان مواجه شد.

واژه‌های کلیدی: آفتابگردان، تنش آبی، تولید بهینه، صرفه‌جویی، مازندران

مقدمه

آب در مناطق خشک و نیمه خشک موجب شده که آب به عنوان مهم‌ترین نهاده تولید تلقی شود (۲۹). شرایط خاص اقلیمی ایران که خشکی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی واقعیت انکارناپذیر آن است، هرگونه تولید مواد غذایی و کشاورزی پایدار را منوط به استفاده صحیح و منطقی از منابع محدود آب کشور کرده است. بخش کشاورزی با مصرف بیش از ۹۰ درصد از منابع آب، عمده‌ترین مصرف کننده آب به شمار می‌آید؛ لذا هرگونه صرفه‌جویی در این بخش کمک موثری به صرفه‌جویی در منابع آب تلقی می‌شود (۱۱). تولید غذا و استفاده از آب دو فرآیند وابسته به هم هستند. افزایش جهانی تقاضا

طبق گزارش مرکز آمار ایران، جمعیت کشور بین سال‌های ۱۳۳۵ تا ۱۳۹۵ از حدود ۱۹ میلیون نفر به حدود ۸۰ میلیون نفر افزایش داشته است؛ با افزایش جمعیت نیاز به استفاده از آب بیشتر شده و منابع آب به طور فزاینده‌ای مورد تهدید قرار می‌گیرد. محدودیت منابع

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، دانشیار و استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(*) نویسنده مسئول: (Email: aliponh@yahoo.com)

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.70224

برای آب، محدودیت این منبع حیاتی و نیاز به تولید بیشتر برای رفع فقر و گرسنگی، متفکرین را بر آن داشته است تا به فکر تولید بیشتر با آب کمتر باشند (۲۳). در چنین شرایطی ضروری است تا اولویت‌بندی تخصیص منابع آبی بر مبنای حصول به حداکثر کارایی مصرف آب برنامه‌ریزی شود و از رسیدن به حداکثر تولید با مصرف آب کامل مورد نیاز گیاه پرهیز شود (۱۲). واژه کارایی مصرف آب (WUE_1) که رابطه بین رشد گیاه و مقدار آب مصرفی را مشخص می‌کند برای اولین بار توسط ویتز (۳۴) وارد مباحث مرتبط با بخش کشاورزی شده است. از آن به بعد کارایی مصرف آب به عنوان یک شاخص تصمیم‌گیری در مقیاس مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (۲۰). کارایی مصرف آب یا مقدار ماده خشک تولیدی به ازای واحد آب مصرفی، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد. به طور نسبی، در شرایط زراعی، افزایش کمبود آب سبب افزایش راندمان مصرف آب می‌شود. به عبارت دیگر در شرایط نزدیک به تنش کمبود آب، گیاه در مقایسه با شرایط آبی، نسبت به مقدار آب مصرف شده محصول بیشتری تولید می‌کند (۱۷، ۱۸ و ۳۱). طی دو دهه گذشته روش‌های صرفه‌جویی در آب آبیاری از قبیل کم‌آبیاری و آبیاری بخشی ریشه توسعه پیدا کرده و برای گیاهان و درختان میوه مورد امتحان واقع شده‌اند (۲۱ و ۳۰). هدف اساسی کم‌آبیاری، افزایش راندمان مصرف آب به وسیله افزایش کفایت آبیاری است (۷). کم‌آبیاری یک راهکار بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که معمولاً همراه با کاهش محصول در واحد سطح می‌باشد (۲۹). روش آبیاری بخشی ریشه برای اولین بار در کشور استرالیا مطرح شد و هدف اصلی آن در شروع کار، کنترل رشد اضافی ساقه درخت انگور بوده است (۶). مبنای این روش، آبیاری متناوب نیمی از ریشه و خشک نگه داشتن نیمه دیگر می‌باشد (۳۰). در آبیاری بخشی ریشه، در قسمتی از ریشه که آبیاری به صورت کامل صورت گرفته است، گیاه آب کافی را جذب می‌نماید و به رشد و نمو خود ادامه می‌دهد و تغییری در میزان فتوسنتز رخ نمی‌دهد (۱۴). بخش دیگر از ریشه که در خاک خشک قرار گرفته، با عکس‌العمل نسبت به خشکی و فرستادن علائمی از ریشه به روزه‌ها، میزان بازشدگی آن‌ها را تحت تاثیر قرار داده و باعث کاهش میزان تلفات آب می‌شود (۴). اثرات مثبت بهره‌گیری از روش‌های کم‌آبیاری، این لازمه را ایجاد می‌کند که این روش‌ها در مورد گروه‌های مختلف گیاهان مورد بررسی واقع شود. با توجه به اهمیت دانه‌های روغنی و واردات بیش از ۹۰ درصدی روغن مورد نیاز کشور، افزایش سطح زیر کشت و عملکرد دانه در واحد سطح این دسته از گیاهان در کشور مهم تلقی می‌شود (۱۱). آفتابگردان یکی از چهار گیاه عمده تولید روغن در جهان است (۵ و ۲۷)؛ به دلیل نیازهای متوسط زراعی و بالا بودن کیفیت روغن،

مساحت اراضی تحت پوشش آن، هم در کشورهای توسعه یافته و هم در کشورهای در حال توسعه افزایش داشته است (۳۳). طبق گزارش سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) برای فصل زراعی ۲۰۱۳-۲۰۱۲ آفتابگردان با سهم ۸ درصدی در تولید روغن‌های گیاهی، بعد از سویا، کلزا، پنبه‌دانه و بادام‌زمینی، رتبه پنجم بین گیاهان روغنی را داشته است. طبق گزارش جباری و همکاران، در سال ۱۳۸۶، ۹۰ درصد روغن مورد نیاز کشور از خارج وارد شده است (۱۳). حجم بالای واردات این محصول سبب وابستگی شدید کشور به واردات روغن و خروج ارز از کشور می‌شود. اگرچه کلیه تنش‌های زنده و غیرزنده از عوامل مهم کاهش تولید محسوب می‌شوند، اما تنش کمبود آب از عوامل اصلی محدودکننده تولید آفتابگردان در مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌آید (۲). در مطالعه اثر تنش آبی بر گیاه آفتابگردان مطالعات مختلفی انجام شده است. طی این پژوهش‌ها اعمال کم‌آبیاری در مراحل مختلف رویش گیاه، اعمال کم‌آبیاری بر مبنای برآورده کردن بخشی از نیاز آبی گیاه، اعمال کم‌آبیاری بر مبنای تنظیم دور آبیاری بر مبنای تبخیر از تشت تبخیر کلاس A و اعمال کم‌آبیاری با وارد کردن تنش بر مبنای دور ثابت آبیاری مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعه انجام شده توسط کرم و همکاران (۱۵)، تبخیر، عرق، محصول دانه و کارایی مصرف آب را در آفتابگردان در شرایط آبیاری مناسب و کم‌آبیاری مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش در حالی که کم‌آبیاری هیچ افزایش قابل توجهی را در شاخص محصول نداشت، در مقدار کارایی مصرف آب به صورت معنی‌داری بین تیمارها اختلاف ایجاد شد؛ به این صورت که بیشترین مقادیر ($0/83 \text{ kg/m}^3$) و کمترین مقادیر ($0/71 \text{ kg/m}^3$) به ترتیب در تیمارهای کم‌آبیاری در ابتدای تشکیل دانه و کم‌آبیاری در مرحله ابتدای گلدهی حاصل شد. قدمی فیروزآبادی (۱۰) طی پژوهشی تاثیر کم‌آبیاری تنظیم شده (DI) و کم‌آبیاری بخشی ریشه (PRD) را روی گیاه آفتابگردان مورد بررسی قرار داد. تیمارهای آبی در پژوهش انجام شده شامل آبیاری کامل، کم‌آبیاری تنظیم شده در دو سطح ۷۵ و ۵۵ درصد و آبیاری بخشی ریشه در دو سطح ۷۵ و ۵۵ درصد بود. نتایج ایشان نشان داد که اعمال تیمارهای PRD75 و DI75 به طور میانگین باعث کاهش ۱۶/۴ درصدی در مصرف آب در مقایسه با تیمار آبیاری کامل شد. بیشترین مقدار عملکرد مربوط به آبیاری کامل بود. اختلاف بین عملکرد در آبیاری کامل با PRD75 معنی‌دار نبود. جباری و همکاران (۱۳) برای ارزیابی تنش کم‌آبی بر خصوصیات زراعی هیبریدهای آفتابگردان، سه آزمایش جداگانه در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا کردند. در آزمایش اول که در شرایط مطلوب اجرا شد، گیاهان بر اساس ۶۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر از زمان جوانه‌زنی تا پایان دوره رشد آبیاری شدند. در آزمایشات دوم و سوم که در شرایط تنش کم‌آبی اجرا شدند، آبیاری به ترتیب بر اساس ۱۲۰ و ۱۸۰ میلی‌متر تبخیر از

تشتک تبخیر کلاس A انجام شد. اثر تنش کم آبی بر تعداد روز تا ۷۵ درصد گلدهی، وزن هزار دانه، تعداد دانه در گیاه، عملکرد دانه، تلاش بازآوری، شاخص برداشت و درصد روغن دانه معنی دار بود. در شرایط تنش شدید کم آبی عملکرد ۸۳ درصد کاهش یافت و محصول دانه ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار بود که ناشی از کاهش وزن هزار دانه (۵۰ درصد) و تعداد دانه در گیاه (۵۴ درصد) بود. کریپم زاده اصل و همکاران (۱۹) به منظور مطالعه اثر چهار دور آبیاری بر روی عملکرد و صفات کمی سه رقم آفتابگردان آزمایشی را با بهره‌گیری از طرح کرت‌های یک بار خرد شده در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تکرار انجام دادند. ۴ دور آبیاری اعمال شده شامل دور آبیاری هر ۷ روز یک بار (شاهد)، دور آبیاری هر ۱۱ روز یک بار، دور آبیاری هر ۱۵ روز یک بار و دور آبیاری هر ۱۹ روز یک بار بودند. نتایج نشان داد با افزایش دور آبیاری صفات تعداد دانه در طبق، عملکرد دانه در هکتار، درصد روغن، شاخص برداشت، قطر طبق و وزن هزار دانه افزایش یافتند و درصد پوکی دانه‌ها افزایش یافت.

با توجه به مطالب اشاره شده در ارتباط با اهمیت مشخصه کارایی مصرف آب و عدم انجام پژوهش در ارتباط با بررسی اثر همزمان مشخصه‌های دور آبیاری و مقدار آب آبیاری با اعمال آبیاری بخشی ریشه، در این پژوهش اثر تنش آبی به دو صورت بر کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان مورد بررسی قرار گرفت. اولین نوع از تنش آبی، اعمال کم آبیاری بخشی ریشه در سطوح مختلف نسبت به آبیاری کامل و تنش آبی نوع دوم، آبیاری در دوره‌های آبیاری مختلف بود. در ادامه این موارد به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی گیاه آفتابگردان رقم هایسان ۲۵، در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری (استان مازندران)، واقع در طول جغرافیایی ۵۳/۰۴ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۹/۳۶ درجه شمالی، در سال‌های زراعی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ اجرا شد. مساحت زمین در نظر گرفته شده برای انجام آزمایش‌های

مزرعه‌ای حدود ۸۲۵ متر مربع (۵۵ متر در ۱۵ متر) بود. آزمایش در ۲۷ کرت به ابعاد ۵ × ۵ (متر مربع) اجرا شد. هر کرت شامل ۶ ردیف کاشت به فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر و به طول ۵ متر بود. بذرهاى آفتابگردان در عمق ۴ سانتی‌متری خاک و به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از یکدیگر، کاشته شدند. برای آماده کردن زمین برای کاشت، ۲ مرتبه شخم نیمه عمیق (شخم اول قبل از فصل کاشت و شخم دوم قبل از کاشت در بهار) اجرا شد. بعد از انجام شخم دوم، برای تکمیل فرایند آماده‌سازی زمین نسبت به اجرای روتاری روی خاک اقدام شد. زمان کاشت بذرها برای سال‌های اول و دوم اجرای طرح به ترتیب ۱۴ و ۹ خرداد بود. آبیاری گیاهان در این پژوهش با استفاده از سیستم آبیاری تحت فشار (موضعی) با استفاده از نوارهای تیپ آبیاری با دبی ۳ لیتر بر ساعت در واحد طول نوار با فاصله درز ۲۰ سانتی‌متر روی نوار استفاده شد. عرض خیس شده برای نوار آبیاری استفاده شده برای خاک محل انجام طرح ۳۵ سانتی‌متر بود. منبع آب آبیاری برای طرح، آب چاه بود. نتایج تجزیه کیفیت شیمیایی آب در جدول ۱ ارائه شده است. همانطوری که از نتایج جدول مشخص می‌باشد، هیچ یک از مشخصه‌های مورد بررسی محدودیتی را برای رشد گیاه ایجاد نمی‌نمایند. برای تصفیه آب از ایستگاه کنترل مرکزی شامل هیدروسیکلون، فیلتر شنی و فیلتر توری استفاده شد. کنترل حجم آب تحویلی به هر یک از تیمارها با استفاده از کنتور حجمی آب، انجام شد.

پس از ارائه نمونه خاک از محل طرح به آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم، ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل و مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره به عنوان توصیه کودی از طرف آزمایشگاه تعیین و این مقادیر به خاک محل طرح اضافه شد. نتایج آزمایش خاک در جدول ۲ ارائه شده است. برای اجرای این پژوهش از آزمایش کرت‌های خرد شده (اسپلیت پلات) با سه فاکتور اصلی (دور آبیاری) و سه فاکتور فرعی (مقدار آب آبیاری) در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی استفاده شد.

جدول ۱- نتایج تجزیه کیفیت شیمیایی آب
Table 1- The results of water quality analysis

نسبت جذبی سدیم SAR	قلیابیت pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کل املاح محلول TDS (mg/lit)	بی کربنات (HCO3)- (meq/lit)	کلر Cl- (meq/lit)	سولفات (SO4)2- (meq/lit)	کلسیم Ca2+ (meq/lit)	منیزیم Mg2+ (meq/lit)	سدیم Na+ (meq/lit)	پتانسیوم K+ (meq/lit)	نیترات (NO3)- (meq/lit)	فسفات (PO4)3- (meq/lit)
1.4	8	0.73	468	4.7	2.2	0.2	3.2	0.9	1.61	0.07	0.016	0.009

جدول ۲- نتایج بررسی عناصر نمونه خاک گرفته شده از محل طرح

Table 2- The analysis' results of the field's soil sample

اجزای میکرو Micronutrients				اجزای ماکرو Macronutrients			
منگنز Mn (ppm)	آهن Fe (ppm)	روی Zn (ppm)	مس Cu (ppm)	جزء آلی (%) OC	نیتروژن (%) N	پتاسیم K (ppm)	فسفر P (ppm)
4.93	14.88	0.77	1.53	0.63	0.06	98	0.15

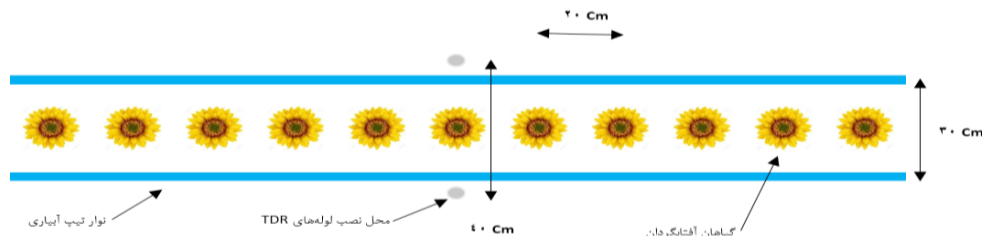
$$D_n = \sum_{i=1}^m [(\theta_{Fci} - \theta_{li}) \times Bdi \times D_i] \quad (1)$$

در این معادله، θ_{Fci} رطوبت جرمی در حد ظرفیت زراعی (اعشار)، θ_{li} رطوبت جرمی خاک پیش از آبیاری (اعشار)، D_i اندازه عمقی که در رطوبت در آن اندازه‌گیری شده (در محدوده توسعه ریشه) (cm)، Bdi جرم مخصوص ظاهری خاک ($gr.cm^{-3}$)، i شماره فاصله عمقی خاک بررسی شده و m تعداد لایه خاک بررسی شده می‌باشد.

برای مشخص کردن مقدار رطوبت در لایه‌های مختلف خاک (معادله ۱) از رطوبت‌سنج‌های الکترومغناطیس TDR (Trime-FM- IMKO-Germany) استفاده شد. چگونگی قرارگیری گیاهان، نوارهای تیپ آبیاری و لوله‌های دسترسی TDR در شکل ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان، در مرحله رسیدگی فیزیولوژیکی (قهوه‌ای شدن پشت طبق و اطراف آن) ۱۰ بوته از ۴ ردیف میانی انتخاب، به صورت کفبر برداشت و به آزمایشگاه منتقل شدند. صفات بررسی شده در این پژوهش شامل مشخصه‌های کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m^3)، ارتفاع گیاه (cm)، قطر طبق (cm)، تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه (gr) و کلروفیل برگ (شاخص SPAD) بود. تحلیل آماری داده‌ها با کاربرد نرم‌افزار SAS با استفاده از آزمون آماری دانکن در سطح احتمال ۱ درصد انجام شد. به منظور رسم نمودارها نرم‌افزار Microsoft Excel مورد استفاده واقع شد.

دوره‌های آبیاری در نظر گرفته شده برای این پژوهش (فاکتور اصلی) انجام آبیاری بعد از ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشت تبخیر کلاس A بود (به ترتیب F-20، F-35 و F-50). این مقادیر بر مبنای مقادیر ۳، ۶ و ۹ برابر متوسط تبخیر تعرق گیاه در مرحله میانی رشد در نظر گرفته شدند (در انتخاب این مقادیر، شرایط رایج در منطقه شامل دور آبیاری سه روزه، هفتگی و ده روزه نیز در نظر گرفته شد). برای تعیین متوسط مقدار تبخیر تعرق گیاه در مرحله میانی رشد پس از گردآوری داده‌های هواشناسی ایستگاه هواشناسی دشت ناز ساری بین سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۳، نسبت به برآورد مقدار تبخیر تعرق گیاه با استفاده از نرم افزار کراپ‌وات اقدام شد. نتایج نشان داد، متوسط مقدار تبخیر تعرق برای دوره اشاره شده در حدود ۶ میلی‌متر بر روز بوده است. فاکتور فرعی، مقدار آب آبیاری به ۳ مقدار ۱۰۰٪ نیاز آبی، ۷۵٪ نیاز آبی و ۵۵٪ نیاز آبی بود (به ترتیب PRD-75، PRD-55 و PRD-25). انجام آبیاری در تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی به صورت معمولی (دوطرفه) و در تیمارهای کم‌آبیاری به صورت متناوب در طرفین ریشه (آبیاری بخشی) انجام شد. زمان تغییر جهت آبیاری‌ها از یک سمت ریشه به سمت دیگر بر مبنای دور آبیاری تعریف شده برای هر یک از تیمارها تعیین شد. اعمال تیمارهای کم‌آبیاری شش هفته پس از کاشت، همزمان با استقرار گیاه انجام شد. تعیین مقدار آب مورد نیاز برای تیمار ۱۰۰٪ نیاز آبی (D_n) بر مبنای کنترل رطوبت خاک انجام شد (۱۶؛ ۲۲). در تیمار آبیاری کامل، آبیاری تا رسیدن رطوبت خاک به نقطه رطوبت ظرفیت زراعی ادامه پیدا کرد (معادله ۱). مقدار رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی با استفاده از دستگاه صفحات فشاری در آزمایشگاه، با انجام آزمایش روی نمونه‌های گرفته شده از خاک در محدوده توسعه ریشه گیاه، تعیین شد (جدول ۳).



شکل ۱- نمایی از چگونگی قرارگیری گیاهان، نوارهای تیپ آبیاری و لوله‌های دسترسی TDR

Figure 1- A plan of plants, irrigation tapes and TDR access tubes' arrangement

جدول ۳- مشخصات فیزیکی خاک محل آزمایش در فاصله‌های عمقی مختلف

Table 3- The soil physical characteristics of farm at different depths

رطوبت حجمی (%)				
عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture	Moisture (% volumetric)		جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm³)
		ظرفت زراعی F.C.	نقطه پژمردگی دائم P.W.P.	
0-20	Sandy loam	30.3	15.4	1.46
20-40	Clay loam	32.5	15.6	1.36
40-60	Clay loam	32	14	1.35
60-80	Clay loam	32	14	1.37

نتایج و بحث

معنی‌دار شد (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر عامل دور آبیاری بر مشخصه‌های کارایی مصرف آب، ارتفاع گیاه و نیز قطر طبق در سال اول آزمایش نشان داد که بین همه تیمارهای دور آبیاری اختلاف معنی‌دار وجود داشته است. بیشترین مقادیر برای مشخصه کارایی مصرف آب در تیمار F-50 و کمترین مقادیر در تیمار F-20 حاصل شد. در مورد دو مشخصه ارتفاع گیاه و قطر طبق بیشترین مقادیر در تیمار F-20 و کمترین مقادیر در تیمار F-50 وجود داشت (جدول ۵).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در سال اول آزمایش نشان داد، اثر عامل مقدار آب آبیاری بر مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری معنی‌دار بوده است. اثر دور آبیاری و نیز اثر متقابل دور و مقدار آب آبیاری بر این مشخصه معنی‌دار نبود. برای مشخصه‌های ارتفاع گیاه و قطر طبق، اثر عوامل دور آبیاری و نیز مقدار آب آبیاری بر هر دو مشخصه معنی‌دار بود. اثر متقابل این عوامل تنها بر مشخصه ارتفاع گیاه

جدول ۴- تجزیه واریانس آزمایش اثر دور و مقدار آب آبیاری بر مقدار کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان (هایسان ۲۵) در طرح کرت‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در سال اول

Table 4- Analysis of variance of the study of the effect of irrigation interval and irrigation water amount on irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant (Hysun25) in split plot design with randomized complete block design in 3 replications in the first year

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	کارایی مصرف آب آبیاری IWUE		ارتفاع گیاه H		قطر طبق گیاه D	
		SS	MS	SS	MS	SS	MS
تکرار Repeat (R)	2	0.004	0.002 ns	4.22	2.11 ns	6.89	3.44 ns
دور آبیاری (عامل اصلی) F (factor A)	2	0.003	0.001 ns	524.22	262.11 **	4168.22	2084.11 **
خطای a E (a)	4	0.005	0.001	6.22	1.56	12.89	3.22
پلات‌های اصلی Main Plots (MP)	8	0.011	0.001	534.67	66.83	4188	523.5
مقدار آب آبیاری (عامل فرعی) I (Factor B)	2	0.015	0.008 **	104.22	52.11 **	784.22	392.11 **
اثر متقابل Interaction (AB)	4	0.003	0.001 ns	30.22	7.56 *	168.89	42.22 ns
خطای b E (b)	12	0.003	0.000	19.56	1.63	160.89	13.41
زیرپلات‌ها Subplots (SP)	18	0.021	0.001	154	8.56	1114	61.89
کل Total	26	0.032	0.001	688.67	26.49	5302	203.92

** معنی‌دار در احتمال سطح ۱٪، * معنی‌دار در احتمال سطح ۵٪، ns: غیر معنی‌دار، SS: مجموع مربعات، MS: میانگین مربعات

** Significant at 1% probability level, * Significant at 5%, ns: not significant, SS: Sum of Squares, MS: Mean of Squares

جدول ۵- مقایسه میانگین کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان در دوره‌های آبیاری مختلف در سال اول
Table 5- The means' comparison of irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant under different irrigation intervals (F) in the first year

دور آبیاری F	کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) IWUE (kg/m ³)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) H (cm)	قطر طبق گیاه (میلی‌متر) D (mm)
F-20	0.89 c	202.11 a	200.00 a
F-35	0.99 b	196.22 b	181.11 b
F-50	1.07 a	191.75 c	169.89 c

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

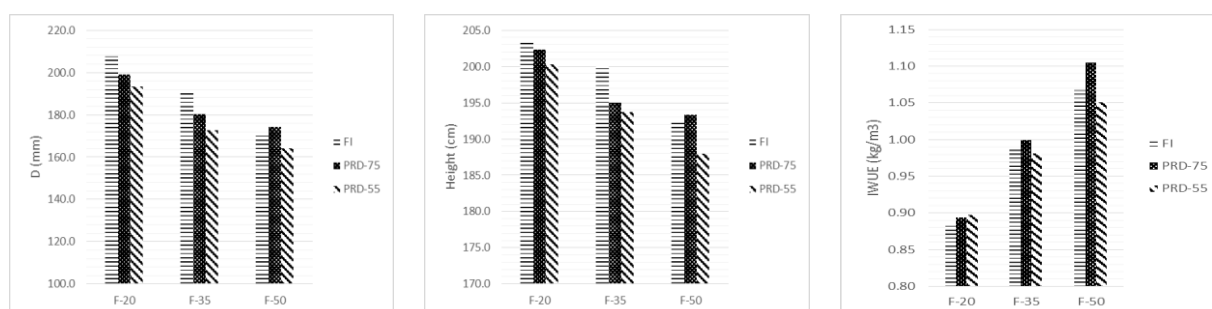
Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)

جدول ۶- مقایسه میانگین کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان با مقادیر مختلف آب آبیاری در سال اول
Table 6- The means' comparison of irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant under different irrigation water amounts (I) in the first year

مقدار آب آبیاری I	کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) IWUE (kg/m ³)	ارتفاع گیاه (سانتی‌متر) H (cm)	قطر طبق گیاه (میلی‌متر) D (mm)
FI	0.98 a	198.78 a	189.78 a
PRD-75	1.00 a	196.89 a	184.56 a
PRD-55	0.98 a	195.75 b	176.67 b

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)



شکل ۲- به ترتیب از راست به چپ نمودارهای کارایی مصرف آب آبیاری (IWUE)، ارتفاع گیاه (Height) و قطر طبق (D) برای ۹ حالت مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری در سال اول

Figure 2- Respectively, from right to left, irrigation water use efficiency (IWUE), plant height (Height) and diameter (D) for nine different irrigation interval and irrigation water amount in the first year

شکل ۲ نشان داده شده است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری در سال دوم آزمایش حاکی از اثر معنی‌دار عامل مقدار آب آبیاری بود. اثر عامل دور آبیاری و اثر متقابل دو عامل دور آبیاری و مقدار آب آبیاری بر این مشخصه معنی‌دار نبود. نتایج تجزیه واریانس اثر عوامل دور آبیاری و مقدار آب آبیاری بر مشخصه‌های ارتفاع و قطر طبق گیاه برای سال دوم آزمایش حاکی از تأثیر معنی‌دار هر دو عامل یاد شده بر این مشخصه‌ها بود (جدول ۷). مقایسه میانگین مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری برای سال دوم آزمایش اختلاف معنی‌دار بین تیمار F-20 با دو تیمار دیگر را نتیجه داد. اختلاف بین

در بررسی عامل مقدار آب آبیاری برای مشخصه‌های ارتفاع گیاه و قطر طبق، اختلاف‌ها برای تیمارهای FI و PRD-75 معنی‌دار نبود. اما در مورد تیمار PRD-55، اختلاف‌ها برای این دو مشخصه با دو تیمار دیگر معنی‌دار بود. در مورد این مشخصه‌ها بیشترین مقادیر در تیمار FI و کمترین مقادیر در تیمار PRD-55 مشاهده شد (جدول ۶). در بررسی مشخصه‌های ارتفاع گیاه و قطر طبق، بین تیمارهای مختلف مشخص شد که بیشترین مقادیر مربوط به F-20، FI بوده است. کمترین مقادیر در F-50، PRD-55 مشاهده شد. اثر عامل مقدار آب آبیاری بر مشخصه کارایی مصرف آب معنی‌دار نبود. میانگین مشخصه کارایی مصرف آب برای ۹ حالت مورد بررسی در

برای FI, F20 و کمترین مقادیر در F-50, PRD-55 بود. افزایش در مقدار مشخصه کارایی مصرف آب تحت تأثیر تنش خشکی در مطالعه انجام شده توسط رضایی استخرویه و همکاران (۲۶) گزارش شده است. در مطالعه انجام شده توسط رحیمی زاده و همکاران (۲۵) و رضایی استخرویه و همکاران (۲۶) کاهش معنی دار مشخصه ارتفاع گیاه تحت تأثیر تنش خشکی گزارش شده است. به علاوه کاهش معنی دار مشخصه ارتفاع گیاه تحت تأثیر تنش ناشی از افزایش دور آبیاری در در مطالعات انجام شده توسط عطایی کچویی و همکاران (۱) و دانشیان و جباری (۳) گزارش شده است. از مطالعاتی که قطر گیاه آفتابگردان تحت تأثیر اعمال تنش خشکی را مورد بررسی قرار داده، می توان به مطالعه انجام شده توسط رحیمی زاده و همکاران (۲۵) و رضایی استخرویه و همکاران (۲۶) اشاره نمود. در مطالعات ایشان کاهش معنی دار قطر طبق تحت تأثیر تنش خشکی گزارش شده است. در مطالعات انجام شده توسط رشدی و همکاران (۲۸)، کریم زاده اصل و همکاران (۱۹) و دانشیان و جباری (۳) اعمال تنش در نتیجه افزایش دور آبیاری موجب کاهش معنی دار مشخصه قطر طبق در گیاه آفتابگردان شد.

دو تیمار F-35 و F-50 معنی دار نبود. در مورد این مشخصه تیمار F-50 دارای مقدار بیشینه و تیمار F-20 دارای مقدار کمینه بود. برای مشخصه ارتفاع گیاه بین همه تیمارهای دور آبیاری اختلاف معنی دار وجود داشت. در مورد مشخصه قطر طبق بین دور آبیاری F-50 با دو تیمار دیگر اختلاف معنی دار وجود داشت. اختلاف بین تیمارهای F-20 و F-35 معنی دار نبود. در مورد هر دو مشخصه ارتفاع گیاه و قطر طبق بیشترین مقادیر در F-20 و کمترین مقادیر در F-50 مشاهده شد (جدول ۸). بر خلاف مشخصه های ارتفاع گیاه و قطر طبق که بین تیمارهای مختلف مقدار آب آبیاری اختلاف معنی دار وجود داشت، اثر تیمارهای مختلف این عامل بر مشخصه کارایی مصرف آب معنی دار نبود. بیشترین مقادیر برای مشخصه های ارتفاع گیاه و قطر طبق در FI و کمترین مقادیر در PRD-55 بود (جدول ۹). نمودارهای کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه برای ۹ حالت مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری در سال ۱۳۹۵ در شکل ۳ ارائه شده است. در مورد مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری بیشترین مقادیر در F-50, PRD-75 و کمترین مقادیر در F-20, PRD-75 وجود داشت. در مورد دو مشخصه ارتفاع و قطر طبق گیاه بیشترین مقادیر

جدول ۷- تجزیه واریانس آزمایش مطالعه اثر دور و مقدار آب آبیاری بر مقدار کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان (هایسان ۲۵) در طرح کرت های خرد شده با طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در ۳ تکرار در سال دوم

Table 7- Analysis of variance of the study of the effect of irrigation interval and irrigation water amount on irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant (Hysun25) in split plot design with randomized complete block design in 3 replications in the second year

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	کارایی مصرف آب آبیاری IWUE		ارتفاع گیاه H		قطر طبق گیاه D	
		SS	MS	SS	MS	SS	MS
تکرار Repeat (R)	2	0.002	0.001 ns	13.41	6.70 *	10.30	5.15 ns
دور آبیاری (عامل اصلی) F (factor A)	2	0.003	0.001 ns	265.85	132.92 **	844.52	422.26 **
خطای a E (a)	4	0.007	0.002	2.37	0.59	11.93	2.98
پلات های اصلی Main Plots (MP)	8	0.011	0.001	281.63	35.20	866.74	108.34
مقدار آب آبیاری (عامل فرعی) I (Factor B)	2	0.152	0.076 **	200.07	100.04 **	631.63	315.81 **
اثر متقابل Interaction (AB)	4	0.005	0.001 ns	29.04	7.26 *	117.93	29.48 **
خطای b E (b)	12	0.019	0.002	22.22	1.85	44.44	3.70
زیر پلات ها Subplots (SP)	18	0.175	0.010	251.33	13.97	794	44.11
کل Total	26	0.187	0.007	532.96	20.50	1660.74	63.87

** معنی دار در احتمال سطح ۱٪، * معنی دار در احتمال سطح ۵٪، ns غیر معنی دار، SS مجموع مربعات، MS میانگین مربعات

** Significant at 1% probability level, * Significant at 5%, ns: not significant, SS: Sum of Squares, MS: Mean of Squares

جدول ۸- مقایسه میانگین کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان در دوره‌های آبیاری مختلف در سال دوم

Table 8- The means' comparison of irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant under different irrigation intervals (F) in the second year

دور آبیاری F	کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب) IWUE (kg/m ³)	ارتفاع گیاه (سانتی متر) H (cm)	قطر طبق گیاه (میلی متر) D (mm)
F-20	0.92 b	196.33 a	188.44 a
F-35	1.01 a	193.78 b	186.33 a
F-50	1.10 a	188.78 c	175.67 b

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)

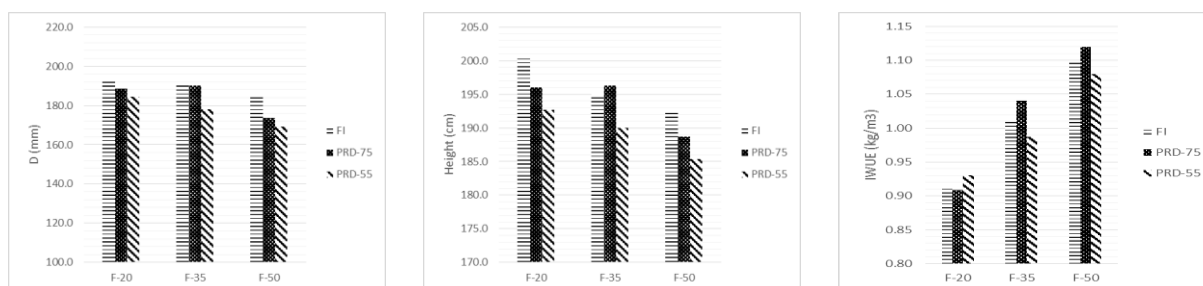
جدول ۹- مقایسه میانگین کارایی مصرف آب آبیاری، ارتفاع و قطر طبق گیاه آفتابگردان با مقادیر مختلف آب آبیاری در سال دوم

Table 9- The means' comparison of irrigation water use efficiency (IWUE), height (H) and diameter (D) of sunflower plant under different irrigation water amounts (I) in the second year

مقدار آب آبیاری I	کارایی مصرف آب آبیاری (کیلوگرم بر متر مکعب) IWUE (kg/m ³)	ارتفاع گیاه (سانتی متر) H (cm)	قطر طبق گیاه (میلی متر) D (mm)
FI	1.01 a	195.89 a	189.00 a
PRD-75	1.02 a	193.67 b	184.22 b
PRD-55	1.00 a	189.33 c	177.22 c

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)



شکل ۳- به ترتیب از راست به چپ نمودارهای کارایی مصرف آب آبیاری (IWUE)، ارتفاع گیاه (Height) و قطر طبق (D) برای ۹ حالت مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری در سال دوم

Figure 3- Respectively, from right to left, irrigation water use efficiency (IWUE), plant height (Height) and diameter (D) for nine different irrigation interval (F) and irrigation water amount (I) in the second year

میانگین، مشخصه‌های تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه تحت تأثیر عامل مقدار آب آبیاری، اختلاف بین تیمارهای PRD-75 و FI معنی‌دار نبود. همچنین اختلاف معنی‌دار بین PRD-55 با دو تیمار دیگر نتیجه شد. اختلاف‌های مشخصه شاخص کلروفیل برگ تحت تأثیر عامل مقدار آب آبیاری در سال اول آزمایش معنی‌دار نبود (جدول ۱۲). نمودارهای مربوط به مقادیر مشخصه‌های تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ تحت اثر ۹ حالت مختلف دور و مقدار آب آبیاری برای سال اول آزمایش به ترتیب در شکل ۴ ارایه شده است. در مورد دو مشخصه تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه بیشترین مقادیر در F-20، FI و کمترین مقادیر در F-50، PRD-55 مشاهده شد.

نتایج تجزیه واریانس عوامل دور و مقدار آب آبیاری بر مشخصه‌های تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ در سال اول آزمایش، در جدول ۱۰ ارایه شده است. بر مبنای نتایج حاصله اثر هر دو عامل دور و مقدار آب آبیاری و نیز اثر متقابل این دو عامل بر مشخصه‌های یاد شده معنی‌دار بود. اثر عوامل دور و مقدار آب آبیاری بر مشخصه شاخص کلروفیل برگ معنی‌دار نبود. بر مبنای نتایج مقایسه میانگین، اختلاف بین تیمارهای مختلف دور آبیاری بر دو مشخصه تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه معنی‌دار بود؛ بیشترین مقادیر در F-20 و کمترین مقادیر در F-50 وجود داشت. اختلاف بین تیمارهای مختلف دور آبیاری در مورد مشخصه شاخص کلروفیل برگ معنی‌دار نبود (جدول ۱۱). بر مبنای نتایج مقایسه

جدول ۱۰- تجزیه واریانس آزمایش مطالعه اثر دور و مقدار آب آبیاری بر مقدار تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان (هایسان ۲۵) در طرح کرت‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در سال اول

Table 10- Analysis of variance of the study of the effect of irrigation interval and irrigation water amount on the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant (Hysun25) in split plot design with randomized complete block design in 3 replications in the first year

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	تعداد دانه در طبق SN		وزن هزار دانه W		شاخص کلروفیل برگ گیاه SPAD	
		SS	MS	SS	MS	SS	MS
تکرار Repeat (R)	2	12459.85	6229.93 **	32.70	16.35 ns	95.88	47.94 ns
دور آبیاری (عامل اصلی) F (factor A)	2	64159.19	320784.59 **	1.73	0.86 ns	1652.62	826.31 **
خطای a E (a)	4	589.04	147.26	31.30	7.82	38.97	9.74
پلات‌های اصلی Main Plots (MP)	8	654618.07	81827.26	65.73	8.22	18787.47	223.43
مقدار آب آبیاری (عامل فرعی) I (Factor B)	2	115350.52	57675.26 **	5.82	2.91 ns	236.22	118.11 **
اثر متقابل Interaction (AB)	4	27767.70	6941.93 *	31.16	7.79 ns	37.21	9.30 *
خطای b E (b)	12	19591.11	1632.59	40.76	3.40	25.08	2.09
زیرپلات‌ها Subplots (SP)	18	162709.33	9039.41	77.74	4.32	298.50	16.58
کل Total	26	81732741	31435.67	143.47	5.52	2085.98	80.23

** معنی‌دار در احتمال سطح ۱٪، * معنی‌دار در احتمال سطح ۵٪، ns غیر معنی‌دار، SS مجموع مربعات، MS میانگین مربعات
** Significant at 1% probability level, * Significant at 5%, ns: not significant, SS: Sum of Squares, MS: Mean of Squares

جدول ۱۱- مقایسه میانگین تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان در دوره‌های آبیاری مختلف در سال اول
Table 11- The means' comparison of the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant under different irrigation intervals (F) in the first year

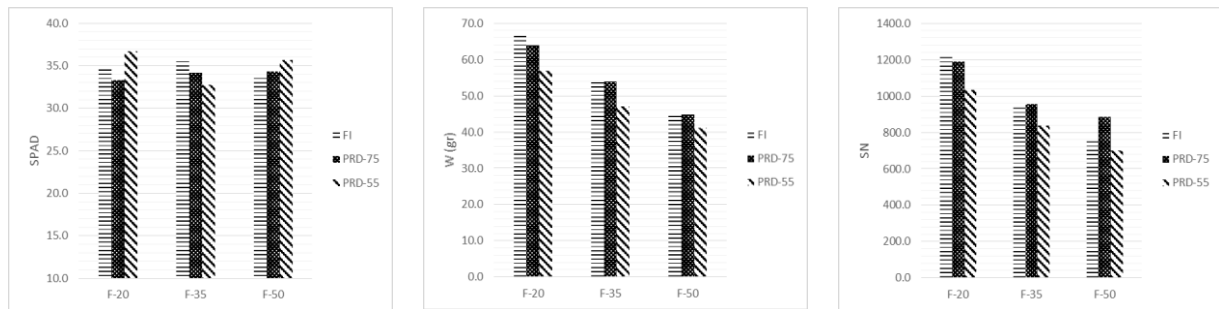
دور آبیاری F	تعداد دانه در طبق SN	وزن هزار دانه (گرم) W (gr)	شاخص کلروفیل برگ گیاه SPAD
F-20	1152.00 a	62.59 a	34.83 a
F-35	912.00 b	51.58 b	34.23 a
F-50	779.56 c	43.50 c	34.67 a

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)
Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)

جدول ۱۲- مقایسه میانگین تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان با مقادیر مختلف آب آبیاری در سال اول
Table 12- The means' comparison of the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant under different irrigation water amounts (I) in the first year

مقدار آب آبیاری I	تعداد دانه در طبق SN	وزن هزار دانه (گرم) W (gr)	شاخص کلروفیل برگ گیاه SPAD
FI	976.89 a	55.05 a	34.74 a
PRD-75	1009.33 a	54.22 a	33.94 a
PRD-55	857.33 b	48.40 b	35.04 a

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)
Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)



شکل ۴- به ترتیب از راست به چپ نمودارهای تعداد دانه در طبق (SN)، وزن هزار دانه گیاه (W) و کلروفیل برگ (شاخص SPAD) برای ۹ حالت مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری در سال اول

Figure 4- Respectively, from right to left, the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) for nine different irrigation interval and irrigation water amount (I) in the first year

بین همه تیمارها منتج شد. مقایسه میانگین مشخصه وزن هزار دانه تحت تأثیر مقادیر مختلف دور آبیاری در سال دوم آزمایش، حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمارهای F-20 و F-50 بود. اختلاف بین F-35 با دو تیمار دیگر معنی‌دار نبود (جدول ۱۴).

نتایج تجزیه واریانس مشخصه‌های تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ برای سال دوم آزمایش در جدول ۱۳ ارائه شده است. بر مبنای نتایج حاصله اثر عوامل دور آبیاری و مقدار آب آبیاری بر مشخصه‌های تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه معنی‌دار بود. مقایسه میانگین مشخصه تعداد دانه در طبق تحت اثر عامل دور آبیاری برای سال دوم آزمایش به وجود اختلاف معنی‌دار

جدول ۱۳- تجزیه واریانس آزمایش مطالعه اثر دور و مقدار آب آبیاری بر مقدار تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان (هایسان ۲۵) در طرح کرت‌های خرد شده با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار در سال دوم

Table 13- Analysis of variance of the study of the effect of irrigation interval and irrigation water amount on the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant (Hysun25) in split plot design with randomized complete block design in 3 replications in the second year

منبع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	تعداد دانه در طبق SN		وزن هزار دانه W		شاخص کلروفیل برگ گیاه SPAD	
		SS	MS	SS	MS	SS	MS
تکرار Repeat (R)	2	1710.22	855.11 **	5.15	2.57 ns	0.41	0.21 ns
دور آبیاری (عامل اصلی) F (factor A)	2	138691.56	69345.78 **	234.15	117.08 *	13.79	6.89 ns
خطای a E (a)	4	78.22	19.56	33.85	8.46	9.34	2.33
پلات‌های اصلی Main Plots (MP)	8	140480.0	17560.00	273.16	34.14	23.54	2.94
مقدار آب آبیاری (عامل فرعی) I (Factor B)	2	146179.56	73089.78 **	378.05	189.02 **	7.98	3.99 ns
اثر متقابل Interaction (AB)	4	41870.22	10467.56 **	65.45	16.36 **	19.28	4.82 ns
خطای b E (b)	12	1614.22	134.52	36.27	3.02	33.36	2.78
زیرپلات‌ها Subplots (SP)	18	189664.00	10536.89	479.77	26.65	60.63	3.37
کل Total	26	330144.00	12697.85	752.92	28.96	84.16	3.24

** معنی‌دار در احتمال سطح ۱٪، * معنی‌دار در احتمال سطح ۵٪، ns: غیر معنی‌دار، SS مجموع مربعات، MS میانگین مربعات

** Significant at 1% probability level, * Significant at 5%, ns: not significant, SS: Sum of Squares, MS: Mean of Squares

جدول ۱۴- مقایسه میانگین تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان در دوره‌های آبیاری مختلف در سال دوم
 Table 14- The means' comparison of the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant under different irrigation intervals (F) in the second year

شاخص کلروفیل برگ گیاه	وزن هزار دانه (گرم)	تعداد دانه در طبق	دور آبیاری
SPAD	W (gr)	SN	F
F-20	53.73 a	943.56 a	
F-35	48.87 ab	892.00 b	
F-50	46.69 b	772.44 c	

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

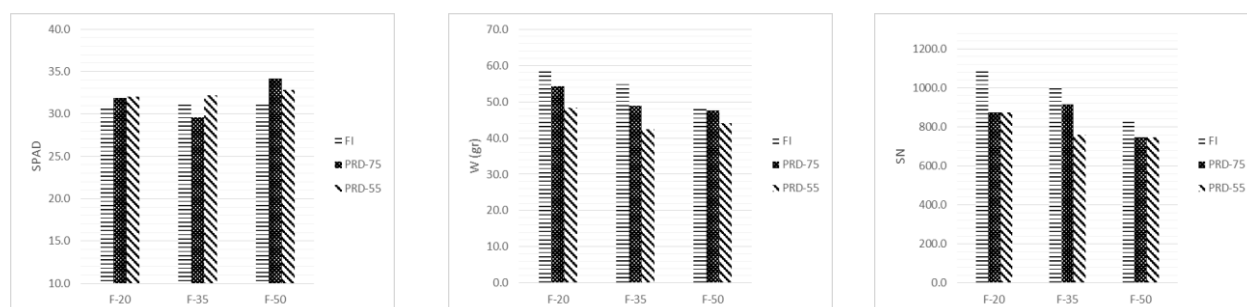
Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)

جدول ۱۵- مقایسه میانگین تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ گیاه آفتابگردان با مقادیر مختلف آب آبیاری در سال دوم
 Table 15- The means' comparison of the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) of sunflower plant under different irrigation water amounts (I) in the second year

شاخص کلروفیل برگ گیاه	وزن هزار دانه (گرم)	تعداد دانه در طبق	مقدار آب آبیاری
SPAD	W (gr)	SN	I
FI	54.07 a	968.89 a	
PRD-75	50.28 b	845.78 b	
PRD-55	44.94 c	793.33 c	

میانگین‌های با حروف مشابه با یکدیگر اختلاف معنی‌داری با آزمون دانکن ندارند (در سطح ۱٪)

Means followed by the same letters do not have significant difference by the Duncan test (1% level)



شکل ۵- به ترتیب از راست به چپ نمودارهای تعداد دانه در طبق (SN)، وزن هزار دانه گیاه (W) و کلروفیل برگ (شاخص SPAD) برای ۹ حالت مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری در سال دوم

Figure 5- Respectively, from right to left, the number seed per flower (SN), 1000 seed weight (W) and the leaf Chlorophyll index (SPAD) for nine different irrigation interval and irrigation water amount in the second year

بیشترین مقادیر مشخصه تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه در FI، F-20 مشاهده شد. کمترین مقادیر این مشخصه‌ها در F-50 وجود داشت. رحیمی‌زاده و همکاران (۲۵)، سی و سه مرده و همکاران (۳۲)، اسفینی فراهانی و همکاران (۸) و امیدداری و بحرانی (۲۴) کاهش معنی‌دار مشخصه تعداد دانه در طبق در نتیجه اعمال تنش خشکی روی گیاه آفتابگردان را گزارش کرده‌اند؛ به علاوه کاهش معنی‌دار مشخصه تعداد دانه در طبق در نتیجه اعمال تنش خشکی با افزایش دور آبیاری، در مطالعات انجام شده توسط رشدی و همکاران (۲۸)، عطایی کجویی و همکاران (۱)، کریم‌زاده اصل و همکاران (۱۹) و جباری و همکاران (۱۳) گزارش شده است. رشدی و همکاران (۲۸)، عطایی کجویی و همکاران (۱)، کریم‌زاده اصل و

نتایج مقایسه میانگین مشخصه‌های تعداد دانه در طبق و وزن هزار دانه تحت اثر مقادیر مختلف آب آبیاری برای سال دوم آزمایش، اختلاف معنی‌دار بین همه تیمارها را نشان داد. بیشترین مقادیر برای هر دو مشخصه در آبیاری کامل و کمترین مقادیر در کم‌آبیاری بخشی ریشه در سطح ۵۵٪ وجود داشت (جدول ۱۵). بر مبنای نتایج حاصله اختلاف معنی‌داری در مشخصه شاخص کلروفیل برگ تحت تأثیر عوامل دور آبیاری و مقدار آب آبیاری مشاهده نشد (جدول‌های ۱۴ و ۱۵).

نمودار تعداد دانه در طبق، وزن هزار دانه و شاخص کلروفیل برگ تحت اثر مقادیر مختلف دور آبیاری و مقدار آب آبیاری برای سال دوم آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. بر مبنای نتایج حاصله

همکاران (۱۹) و جباری و همکاران (۱۳) کاهش معنی‌دار مشخصه وزن هزار دانه آفتابگردان در نتیجه تنش وارده به گیاه تحت تأثیر افزایش دور آبیاری را گزارش کرده‌اند. در مطالعات انجام شده توسط سی و سه مرده و همکاران (۳۲)، اسفینی فراهانی و همکاران (۸) و امیدی اردلی و بحرانی (۲۴) کاهش معنی‌دار در مشخصه وزن هزار دانه در نتیجه اعمال تنش خشکی گزارش شده است. در مطالعه انجام شده توسط رحیمی‌زاده و همکاران (۲۵) یک افزایش معنی‌دار در شاخص SPAD در اعمال تنش شدید خشکی گزارش شده است. با این وجود در مطالعه انجام شده توسط غلامحسینی و همکاران (۱۱) اثر تنش خشکی روی این مشخصه معنی‌دار گزارش نشده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر کم‌آبیاری بخشی ریشه در دوره‌های آبیاری مختلف بر کارایی مصرف آب و پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان مورد بررسی قرار گرفت. در بررسی عامل دور آبیاری، بر مبنای نتایج حاصله از داده‌های ۲ سال انجام آزمایش، بهترین نتایج برای پارامترهای رشد گیاه، در دور آبیاری بعد از ۲۰ میلی‌متر تبخیر از تنش تبخیر کلاس A وجود داشت. به علاوه بهترین نتایج برای پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان در آبیاری کامل نتیجه شد. با توجه به وجود اختلاف معنی‌دار در غالب پارامترهای رشد بین آبیاری کامل و کم آبیاری بخشی ریشه در سطح ۵۵٪، در صورتی که کم‌آبیاری بخشی ریشه مد نظر باشد، سطح ۷۵٪ برای کم‌آبیاری توصیه می‌شود. در

منابع

- 1- Ataei Kachooei M., Karimi M., Majd Nasiri B., Lotfifar O., and Motaghi S. 2010. Investigating the effect of limited irrigation on agronomic characteristics and yield of sunflower cultivars. *Journal of Plant and Ecosystem*, 22(6): 89-110. (In Persian)
- 2- Chimenti C. A., and Hall A.T. 2002. Genetic variation and changes with ontogeny of osmotic adjustment in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Euphytica*, 71: 201-210.
- 3- Daneshian J., and Jabari H. 2009. Effect of limited irrigation and plant density on morphological characteristics and grain yield in a dwarf sunflower hybrid (cms26 × r103) as second crop. *Iranian Journal of Crop Sciences*, 10(40): 377-388. (In Persian with English abstract)
- 4- Davies W.J., and Zhang J.H. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 42: 55-76.
- 5- Demir A.O., Goksoy A.T., Buyukcangaz H., Turan Z.M., and Koksall E.S. 2006. Deficit irrigation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in a sub-humid climate. *Irrigation Science*, 24: 279-289.
- 6- Dry P.R., Loveys B.R., and Duering H. 2000. Partial drying of the root-zone of grape. Transient changes in shoot growth and gas exchange, 39(1): 3-8.
- 7- English M.J., Musick J.T., and Murty V.V.N. 1990. Deficit irrigation. In: Management of farm irrigation systems (Hoffman G.J., Howell T.A. and Solomon K.H., Editors). ASAE Monograph no. 9. American Society of Agricultural Engineers publisher, 1020p.
- 8- Esfani Farahani M., Paknejad F., Kashani A., Ardakani M.R., Bakhtiari Moghadam M., and Rezaei M. 2012. Effect of methanol spraying on yield and yield components of sunflower (*Helianthus annuus* L. Azargol hybrid) under different moisture conditions. *Iranian Journal of Agronomy and Plant Breeding*, 8(1): 115-126. (In Persian)

مورد عامل دور آبیاری، برای غالب پارامترهای رشد گیاه بین دور آبیاری بعد از ۲۰ میلی‌متر تبخیر از تنش تبخیر کلاس A و دور آبیاری بعد از ۵۰ میلی‌متر تبخیر، اختلاف معنی‌دار وجود داشت؛ لذا با در نظر گرفتن این مورد و نیز مساله افزایش هزینه بهره‌برداری با کاهش دور آبیاری، دور آبیاری بعد از ۳۵ میلی‌متر تبخیر از تنش تبخیر کلاس A توصیه می‌شود. بررسی مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری برای عامل دور آبیاری حاکی از وجود اختلاف معنی‌دار بین هر سه دور آبیاری بود. بیشترین مقادیر در F-50 و کمترین مقادیر در F-20 حاصل شد. با وجود افزایش در مقدار مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری در PRD-75 در مقایسه با سایر تیمارها برای هر دو سال انجام آزمایش، این اختلاف معنی‌دار نبود. با توجه به عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین تیمار دور آبیاری F-35 و F-50 در سال دوم آزمایش و نیز وجود افزایش نسبی در مقدار این مشخصه در PRD-75 در مقایسه با دو تیمار دیگر، به منظور داشتن کارایی مصرف آب بیشتر، انجام کم‌آبیاری بخشی ریشه در سطح ۷۵٪ با دور آبیاری F-35 توصیه می‌شود. در مجموع با بررسی همزمان مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری و نیز پارامترهای رشد گیاه آفتابگردان، این نتیجه حاصل شد که با بهره‌گیری از آبیاری بخشی ریشه در سطح ۷۵٪ و دور آبیاری بعد از ۳۵ میلی‌متر تبخیر از تنش تبخیر کلاس A، می‌توان ضمن صرفه‌جویی در مصرف آب آبیاری و افزایش در مشخصه کارایی مصرف آب آبیاری، با کمترین کاهش‌ها در مشخصه‌های رشد گیاه آفتابگردان مواجه شد.

- 9- Eshraghi F., and Ghasemiyani S.D. 2010. Investigating the Economic Productivity of Water in Golestan Province. Journal of Water Research in Agriculture, 26 (3): 317-322. (In Persian)
- 10- Ghadami Firouzabadi A. 2015. Management of water use and soil moisture changes in full irrigation, regulated deficit irrigation and partial rootzone drying in sunflower plant. Ph.D. thesis in irrigation and drainage. Irrigation engineering department. Sari agricultural sciences and natural resources university. (In Persian)
- 11- Gholamhosseini M., Ghalavand A., and Jamshidi E. 2008. The effect of irrigation regimes and fertilizer treatments on grain yield and elements concentration in leaf and grain of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Agronomy and Horticulture, 21(2): 91-100. (In Persian with English abstract)
- 12- Hamdy A. 2005. Water use efficiency in irrigated agriculture: An analytical review. P 9-20, In Lamadalena N., Shatawi M.R., Todorovic M., Bogliotti C. and Albrizio R. (eds), Proceedeengs of 4th WASAMED (Water Saving in Mediterranean agriculture), Water /use Efficiency and Water Productivity, Amman, Jordan.
- 13- Jabbari H., Akbari Gh.A., Daneshian J., Allahdadi A., and Shahbazian N. 2007. Effects of water stress on agronomic characteristics sunflower hybrids. Agricultural Journal, 9(1): 13-22. (In Persian)
- 14- Jones H.G. (1992) Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology (2nd ed.). Cambridge: Cambridge university press.
- 15- Karam F., Masaad R., Sfir T., Mounzer O., and Rouphael Y. 2007. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions .Agr. Water Manag .75:226-244.
- 16- Karandish F., Mirlatifi M., Shahnazari A., Abbasi F. and Gheysari M. 2013. Investigating the effect of partial rootzone drying irrigation and deficit irrigation on water use efficiency and yield and yield components of maize. Iranian Journal of Soil and Water Research, 44(1): 33-44. (In Persian)
- 17- Karbasi A.R., and NooriTuopkanloo Z. 2008. Analysis the factors influencing on *Cuminum cyminum* production productivity in Khorasan province. Research and development in natural resources: 80, 2-7. (In Persian with English abstract)
- 18- Karimi Kakhaki M., and Sepehri A. 2000. Effect of low irrigation during reproductive period on water use efficiency and drought tolerance of new sunflower cultivars. Water and soil science, 13, 163-176. (In Persian)
- 19- KarimzadeAsl Kh., Mazaheri D., and Peighambari S.A. 2003. Effect of four irrigation intervals on the seed yield and quantitive characteristics of three sunflower cultivars. Iranian. Journal of Agriculture Science, 34(2): 293-301. (In Persian with English abstract)
- 20- Kiani A.R., and Raesi S. 2013. Assessment of water use efficiency in some soybean cultivars under different amount of irrigation. Journal of water and soil conservation, 20 (5): 179-192. (In Persian with English abstract)
- 21- Liu F., Jensen C.R., and Andersen M.N. 2005. A review of drought adaptation in crop plants: changes in vegetative and reproductive physiology induced by ABA-based chemical signals. Australian Journal of Agricultural Research, 56: 1245-1252.
- 22- Miri F.S., Shahnazari A., ZiatabarAhmadi M.Kh., and Zebardast Rostami H. 2014. Effect of regulated deficit irrigation and partial rootzone drying on quantitative and qualitative performance of orange fruit. Journal of Horticultural Science, 28(1): 80-86. (In Persian)
- 23- OhabYazdi S.A., Ahmadi A., and Nikouei A. 2014. Employing Economic Instruments to Increase Water Productivity: A Case Study, Zayandehrood River Basin. Iran-Water Resources Research, 10 (1): 62-71. (In Persian with English abstract)
- 24- Omid Ardali Gh., and Bahrani M.J. 2011. Effects of Water Stress, Nitrogen Levels and Application Times on Yield and Yield Components of Sunflower at Different Growth Stages. Journal of Water and Soil Science, 15(55): 199-207. (In Persian)
- 25- Rahimizadeh M., Kashani A., Zare Fezabady A., Madani H., and Soltani E. 2010. Effect of micronutrient fertilizers on sunflower growth and yield in drought stress condition. Electronic journal of crop production, 3 (1): 57-72. (In Persian with English Abstract)
- 26- Rezaei Estakhroeih A., Khoshghadam S., Ebrahimi Serizi M., and Badiehneshin A. 2014. Evaluation Yield of Sunflower (Farrokh cultivar) under Effects of Conventional Deficit Irrigation and Partial Root Zone Drying. Journal of Water and Soil, 28(5): 867-875. (In Persian with English abstract)
- 27- Richard J. D., Louis J.G., and Henry L.A. 1984. Crop production (5th Ed.). London: Englewood Cliffs, Prentice-Hall International.
- 28- Roshdi M., Heydari Sharifabad H., Karimi M., Nourmohammadi Gh., and Darvish F. 2006. A survey on the impact of water deficiency over the yield of sunflower seed cultivar and its components. Journal of Agricultural Sciences, 12(1): 109-121. (In Persian with English abstract)
- 29- Sepaskhah A.R., Tavakoli A.R., and Mousavi S.F. 2000. Principles and applications of deficit irrigation. (pp. 1-10). Tehran: Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID). (In Persian)
- 30- Shahnazari A., Jensen C.R., Liu F., Jacobsen S.E., and Andersen M.N. 2005. Partial root zone drying for water saving. Organized by Kasetsart University and Swiss federal institute of technology (ed.), in: Ikke angivet. Kasetsart University, pp. 75-80.

- 31- Shubairi S., Ghasemi Golaazani K., Golchin A., and Saba J. 2007. Effect of irrigation water on the phenology and performance of three chickpea cultivars (*Ciecer arietinum* L.). Journal of Agriculture Science, 16(2): 137-147. (In Persian)
- 32- Siosemardeh A., Ranjbar-balkhkanlou H., Sohrabi Y., and Bahramnejad B. 2011. Evaluation of Grain Yield, Gas Exchange and Source and Sink Limitation in Sunflower under Drought Stress at Different Levels of Defoliation. Iranian Journal of Field Crop Science, 42(3): 585-596. (In Persian)
- 33- Skoric D. 1992. Achievements and future directions of sunflower breeding. Field Crops Research. 30: 231-270.
- 34- Viets F.G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Advances in Agronomy, 14: 223-264.



Investigating the Effect of Partial Root Zone Drying (PRD) Deficit Irrigation at Different Irrigation Intervals on Water Use Efficiency and Growth Parameters of Sunflower Plant

M. Cheraghizade¹- A. Shahnazari^{2*}- M. Kh. Ziatabar Ahmadi³

Received: 31-01-2018

Accepted: 03-06-2018

Introduction: According to the Statistical Center of Iran, the country's population between 1957 and 2017, has increased approximately from 19 people to 80 million. With population growth, the water demand is increased and water resources are threatened cumulatively. Agriculture is recognized as the main water consumer in the country. Due to the arid and semi-arid climate of the country, it is essential to use water reduction strategies such as deficit irrigation (DI) and partial root zone drying (PRD) deficit irrigation in agriculture. In case of water shortages, DI is an optimal solution for production, which is usually accompanied by a reduction in product per unit area. The base of PRD is keeping dry the half of root while irrigating the other half. The plant root in the wet area absorbs enough water. The other part of the root in dry soil, with a reaction to dryness and sending symptoms to the stomata, affects their opening size and reduces water losses. Sunflower is one of the four major oil producing plants in the world. The high volume of this product's import causes the country's strong dependence on oil import and the currency's outflow from the country. Although all living and non-living stresses are considered to be major factors in reducing production, water deficit stress is one of the main factors limiting the production of sunflower; Therefore, studying the reaction of this plant to different drought stress conditions and providing a solution to reduce the negative effects of dryness would be essential.

Materials and Methods: The present study was conducted on sunflower plant (Hysun 25) in a research farm of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU) in 27 plots (5 × 5 square meters). Each plot consisted of 6 rows of planting at a distance of 75 cm from each other and 5 meters long. Sunflower seeds were planted at a depth of 4 cm from the soil and at a distance of 20 cm from each other. The experiment was conducted by using split-plot design, with three main factor (irrigation interval) and three sub-factor (irrigation water amount) in randomized complete block design in three replication. The irrigation intervals were irrigation after 20, 35 and 50 mm evaporation from class-A evaporation pan (F-20, F-35 and F-50 respectively). The sub-factor was irrigation water in levels of 100%, 75% and 55% of water demand (FI, PRD-75 and PRD-55 respectively). Controlling the volume of water delivered to each treatment was carried out using a volumetric flow meter. The application of irrigation treatments was carried out six weeks after planting. The irrigation for FI was conducted regularly at both sides of the root and for PRD it alternatively changed at the right and left sides of the root. The studied traits were irrigation water use efficiency (IWUE, kg/m³), height (H, cm), the flower diameter (D, cm), the seeds number per flower (SN), the 1000 seeds weight (W, gr) and the chlorophyll index (SPAD). Statistical analysis of data conducted by SAS software using Duncan test (1% level). Diagrams extracted by Microsoft Excel software.

Results and Discussion: Evaluation of irrigation interval factor based on the experiment two years data, indicated that the best results for plant growth parameters was for F-20. Also, the best results for sunflower plant growth parameters was for FI. According to the significant difference between FI and PRD-55 at most of the growth parameters, it's suggested to conduct PRD-75 for PRD. For the irrigation interval factor, there was significant difference for most of the plant growth parameters between F-20 and F-50. Therefore, considering this case as well as the problem of increasing the operating cost by reducing the irrigation interval, F-35 is recommended for irrigation interval. It's concluded that there was significant difference between all of the irrigation interval treatments by analyzing the IWUE trait. The highest amounts was for F-50 and the lowest was for F-20. Despite the increase in the value of IWUE in PRD-75 in comparison with other treatments for each two years of the experiment, this difference was not significant. According to the non-significant difference between F-35 and F-50 for IWUE at the second year of the experiment and this trait relative increase at PRD-75 in

1, 2 and 3- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Associate Professor and Professor Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (SANRU), Respectively

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

comparison with two other treatments, it's suggested to conduct PRD-75 with F-35 to have higher IWUE.

Conclusion: Simultaneous analysis of sunflower's IWUE and its growth parameters showed that it could be possible to save in irrigation water use and increase the IWUE with the lowest decrease in the sunflower plant growth parameters by applying PRD-75 and F-35.

Keywords: Mazandaran, Optimal Production, Saving, Sunflower, Water stress



تأثیر کادمیم بر صفات رویشی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تربچه نقلی (*Raphanus sativus* L.)

کلثوم دالوندگماری^۱ - سیدعبدالله افتخاری^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

چکیده

به منظور بررسی تأثیر کادمیم بر صفات رویشی، شاخص‌های فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی در گیاه تربچه نقلی آزمایشی در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز در به صورت طرح فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با دو تیمار و ۳ تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل کلرید کادمیم در سه سطح (۰ (شاهد)، ۳۰، ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم)، دو زمان برداشت (بلوغ تجاری (زمان اول) و یک هفته پس از بلوغ تجاری (زمان دوم)) بود. صفات مورد اندازه‌گیری طی دو زمان برداشت شامل وزن تر و خشک بخش زیرزمینی و بخش هوایی، سطح برگ و تعداد برگ، طول و عرض برگ و طول ریشه، شاخص‌های فیزیولوژیکی شامل نشت الکترولیت و محتوای رطوبت نسبی (RWC) و شاخص‌های بیوشیمیایی شامل کلروفیل a، b، کلروفیل کل، کارتنوئیدها، پرولین، ویتامین ث هیپوکوتیل بود. نتایج نشان داد که کادمیم ویژگی‌های رشدی (وزن تر و خشک) را کاهش داد. همچنین کادمیم باعث کاهش معنی‌دار سطح برگ، تعداد برگ، طول و عرض برگ و طول ریشه گردید. غلظت ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیم نشت الکترولیت (۲۸/۲ درصد) و میزان پرولین (۴۸/۸ میلی گرم در گرم) را نسبت به گیاه شاهد افزایش داد. محتوای رطوبت نسبی تحت تنش کادمیم کاهش یافت. شاخص‌های بیوشیمیایی شامل کلروفیل a و b، کلروفیل کل، کارتنوئیدها، ویتامین ث کاهش معنی‌داری مشاهده شد. در غلظت‌های به کار برده شده، غلظت ۶۰ کادمیم بیشترین اثر را در مقایسه با غلظت ۳۰ میلی گرم در کیلوگرم روی شاخص‌ها نشان داد. بیشترین تجمع کادمیم در گیاه در غلظت ۶۰ کادمیم مشاهده شد. به نظر می‌رسد افزایش غلظت کادمیم از طریق کاهش شاخص‌های فیزیولوژیکی باعث کاهش ویژگی‌های رشدی در تربچه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: پرولین، تربچه، شاخص‌های فیزیولوژیکی، کادمیم، ویتامین

مقدمه

فیتوکسی به غلظت‌های مختلف کادمیم به کار برده در بستر ریشه، مدت تیمار و ویژگی‌های گونه و کولتیوار تحت تیمار دارد (۳۷). ابواودا^۳ و همکاران (۲۰۱۰) گزارش دادند کادمیم افزوده شده به خاک ویژگی‌های رشدی مانند وزن تر و خشک ریشه و شاخه را در هویج کم می‌کند (۱). حضور فلزات سنگین در منطقه ریزوسفر و ورود آنها به گیاه باعث کاهش رشد شده و متابولیسم سلولی را به هم می‌زند (۳۶). یون‌های فلزات سنگین زمانی که در مقادیر زیاد در محیط وجود داشته باشند به وسیله ریشه گیاهان جذب و به اندام هوایی منتقل می‌شوند که این امر موجب اختلال در سوخت و ساز گیاه و کاهش رشد می‌گردد (۳۵). اتحادیه اروپا حداکثر مجاز کادمیم در خاک‌های زراعی را ۱ تا ۳ میلی گرم در کیلوگرم خاک تعیین نموده است (۴). تربچه با نام علمی *Raphanus sativus* از خانواده چلیپاییان (Brassicaceae)

کادمیم (Cd) متعلق به گروه عناصر سنگین می‌باشد که در گیاهان هیچ گونه نقش بیولوژیکی ندارد و برای حیوانات و گیاهان بسیار سمی است (۳۷). در بین فلزات سنگین کادمیم دارای اهمیت ویژه‌ای است زیرا به راحتی توسط سیستم گیاه جذب می‌شود و سمیت آن ۲ تا ۲۰ برابر سایر فلزات سنگین می‌باشد (۳۵). بخشی از خاک‌های کشاورزی در سراسر دنیا به طور کم تا متوسط در اثر گسترش استفاده از کودهای سوپر فسفات، کاربرد فاضلاب‌ها آلوده به کادمیم هستند (۱۰). در همه تحقیقات اثرهای محدود کننده کادمیم روی وزن تر، وزن خشک، بیومس، ارتفاع، طول ریشه، سطح برگ و دیگر پارامترهای بیومتری گزارش شده است. اختلاف در درجه ظهور

می‌باشد. قسمت ضخیم خوراکی ریشه در انواع نقلی از هیپوکوتیل و در انواع دراز و کشیده از ریشه و هیپوکوتیل است. تربچه گیاهی یک ساله است قسمت خوراکی که اصطلاحاً ریشه نامیده می‌شود به رنگ‌های سفید، سیاه، صورتی، بنفش و دورنگ سفید و قرمز (نوع ژاپنی) وجود دارد، تربچه گیاهی روزبلند می‌باشد (۲۸). شواهد واضحی وجود دارد که گونه‌های مختلف گیاهان در توانایی جذب، تحمل و تجمع فلزات سنگین تفاوت بسیار زیادی وجود دارد و بدین ترتیب مشخص می‌شود که در بررسی فلزات در سیستم‌های مختلف و پیچیده گیاه و خاک عوامل زیادی وجود دارند که مرتبط با ویژگی‌های خاک، خصوصیات گیاه و دیگر عوامل زیست محیطی می‌باشند (۲۵). در همه تحقیقات اثرهای محدود کننده کادمیم روی وزن تر، وزن خشک، بیومس، ارتفاع، طول ریشه، سطح برگ و دیگر پارامترهای بیومتری گزارش شده است. اختلاف در درجه ظهور فیتوکسی به غلظت‌های مختلف کادمیم به کار برده در بستر ریشه، مدت تیمار و ویژگی‌های گونه و کولتیوار تحت تیمار دارد همچنین کاربرد کادمیم میزان رنگدانه‌های گیاهی را کاهش می‌دهد به طوری که غلظت کلروفیل a نسبت به کلروفیل b بیشتر کاهش می‌یابد تأثیر کادمیم بر رنگدانه‌های گیاهی به سن برگ و نمو گیاه بستگی دارد (۳۷). آلودگی محیط زیست با فلزات سنگین و انتقال آن به محصولات کشاورزی به عنوان یک مشکل جهانی، مطرح می‌باشد با توجه به اهمیت این موضوع و اطلاعات محدود در زمینه اثرات کادمیم در محصولات غده‌ای، تحقیقی به منظور بررسی اثر کادمیم بر روی شاخص‌های رشدی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تربچه نقلی رقم ایرانی سرخان انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

آزمایش در قالب طرح فاکتوریل بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی با تیمار کادمیم از منبع کلرید کادمیم در سه غلظت ۰ (شاهد)، غلظت ۳۰ میلی‌گرم در کیلوگرم و غلظت ۶۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، دو زمان برداشت با سه تکرار به صورت کشت در گلدان و قرار دادن گلدان‌ها در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید چمران اهواز اجرا شد. با توجه به اینکه منابع آلاینده مانند زه‌آب‌های کارخانجات صنعتی که گاه‌ا در کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرند دارای مقادیر زیادی کادمیم می‌باشد (۱۶) و سایر محققان از غلظت‌های متفاوت کادمیم حتی تا ۲۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک استفاده نموده‌اند (۳۵)، در این پژوهش از غلظت‌های ۰، ۳۰ و ۶۰ استفاده گردید با توجه به بررسی منابع و مطالعه مقالات مختلف، انتخاب غلظت‌ها انجام گرفت در

مطالعات و تحقیقات بسیاری از جمله سالاسکار^۱ و همکاران (۲۰۱۱) از کلرید کادمیم استفاده شده است (۳۲). خاک مورد استفاده با مش ۲ میلی‌متر الک شد و جهت اعمال تیمار کادمیم توزین شد. نتایج تجزیه خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. کلرید کادمیم در غلظت‌های مذکور به صورت محلول بر روی خاک‌ها محلول پاشی شد. خاک‌ها به مدت بیست روز به منظور تثبیت کادمیم در کیسه‌های پلاستیکی در بسته رها شدند و در طی این مدت رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت زراعی نگه داشته شد. بذرهایی تربچه در گلدان‌های پلاستیکی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر (با حجم ۳ کیلوگرم خاک) کشت شدند. با توجه به ظرفیت گلدان و متناسب با ویژگی‌های رشد رویشی رقم انتخاب شده، تعداد سه گیاه در هر گلدان پرورش داده شد. در زمان‌های ذکر شده برداشت صورت گرفت و فاکتورهای ذیل اندازه‌گیری شدند. برای تعیین وزن تر و خشک نمونه‌ها از ترازوی دقیق استفاده و برای اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه سطح برگ سنج استفاده شد. طول و عرض برگ و طول ریشه با خط کش اندازه‌گیری شد. آنالیز آماری با نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین‌ها با آزمون دانکن انجام شد.

اندازه‌گیری میزان کلروفیل و کارتنوئید

میزان کلروفیل در برگ بر اساس روش پیشنهادی لیختن تالر^۲ (۱۹۸۷) با استفاده از استون ۸۰ درصد جهت استخراج کلروفیل و اندازه‌گیری جذب در طول موج‌های ۶۶۳ و ۶۴۵ و ۴۷۰ نانومتر انجام شد (۲۱).

اندازه‌گیری پرولین

اندازه‌گیری پرولین با استفاده از روش بیتس^۳ و همکاران (۱۹۷۳) انجام گرفت. جذب نمونه‌ها با اسپکتروفتومتر در ۵۲۰ نانومتر قرائت گردید و منحنی استاندارد آنها رسم شد. برای بدست آوردن مقدار پرولین (mg/g FW) میزان جذب قرائت شده نمونه‌ها را در فرمول حاصل از منحنی قرار داده، و در معادله حاصل از منحنی استاندارد قرار گرفته، مقدار پرولین موجود در آنها محاسبه می‌شود (۲).

اندازه‌گیری ویتامین ث

میزان ویتامین ث^۴ با روش هرناندز^۵ و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از تیتراسیون دی کلروایندوفنل^۶ (DCIP) اندازه‌گیری شد (۱۵).

4- Vitamin c

5- Hernandez

6- 2,6,dichloroindophenol

1- Salaskar

2- Lichtenthaler

3- Bates

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک مورد استفاده قبل از کشت

Table 1- Analysis of soil used before cultivation

کادمیم خاک (قابل جذب)	بافت خاک	پتاس قابل جذب	فسفر قابل جذب	درصد مواد آلی	اسیدیته	هدایت الکتریکی
Soil cadmium (ave) (mg kg ⁻¹)	Soil texture	K (ave) (mg kg ⁻¹)	P (ave) (mg kg ⁻¹)	Percent organic matter	pH	EC (dS/m ⁻¹)
0.17	لومی‌شنی Sandy Loam	188	33	0.82	7.06	3

هفته پس از بلوغ تجاری) با تیمار ۳۰ میلی گرم و ۶۰ میلی گرم اختلاف معنی‌داری وجود دارد. در تیمار ۶۰ میلی گرم نیز بین زمان اول (بلوغ تجاری) و زمان دوم (یک هفته پس از بلوغ تجاری) اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. کادمیم با اختلال در فتوسنتز، تنفس و متابولیسم نیتروژن در گیاهان منجر به کاهش رشد می‌شود که به دنبال آن توده زنده کاهش می‌یابد. مشخص شده است که کاهش وزن ریشه و اندام هوایی گیاهان لوبیا که تحت تنش کادمیم بودند به دلیل اختلال در جذب عناصر غذایی و آب می‌باشد (۱۱). رشد ریشه‌ها و وظیفه آن‌ها به عنوان سطوح جذب کننده آب و مواد غذایی، به عوامل محیطی زیادی بستگی دارد. تنش فلزات سنگین از جمله عوامل محدود کننده رشد ریشه است که این نیز می‌تواند یکی از عوامل کاهش وزن تر و خشک ریشه باشد (۲۹). نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر وزن خشک بخش زیرزمینی در سطح احتمال یک در صد معنی‌دار شده است. اثر زمان نیز در سطح احتمال یک در صد معنی‌دار شده است و اثر متقابل کادمیم و زمان در سطح احتمال پنج درصد ($P < 0/05$) معنی‌دار شد. مقایسه میانگین‌ها در وزن خشک بخش زیرزمینی در جدول ۵ نشان می‌دهد که بیشترین وزن خشک بخش زیرزمینی مربوط تیمار شاهد در زمان دوم (۷۴/۰ گرم) و کمترین وزن خشک بخش زیرزمینی مربوط به تیمار ۶۰ در زمان اول (۲۸/۰ گرم) می‌باشد. اولیورا^۴ و همکاران (۱۹۹۴) بیان کردند که غلظت‌های بالای کادمیم باعث کاهش ماده خشک در ریشه‌های سویا شد. و عملکرد ماده خشک با افزایش سطوح کادمیم کاهش پیدا کرد (۲۷). نتایج تجزیه داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر وزن تر برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر وزن تر برگ معنی‌دار نشد. بیشترین وزن تر برگ در جدول ۵ مربوط به شاهد در زمان دوم (۳/۱۳ گرم) و کمترین وزن تر برگ مربوط به تیمار ۶۰ در زمان اول (۱/۹ گرم)

نشست الکترولیت و محتوای رطوبت نسبی

نشست الکترولیت^۱ با استفاده از روش ژائو^۲ و همکاران (۱۹۹۲) اندازه‌گیری شد (۳۹).

$$\text{Relative Permeability (\%)} = ((EC_1 - EC_0) / (EC_2 - EC_0)) \times 100$$

محتوای رطوبت نسبی برگ‌ها نیز طبق روش ریتیچی^۳ و همکاران (۱۹۹۰) اندازه‌گیری شد (۳۰).

$$\% \text{ RWC} = [(Fw - Dw) / (Tw - Dw)] \times 100$$

اندازه‌گیری کادمیم گیاه و خاک

میزان کادمیم موجود در گیاه به روش هضم سه اسید طبق روش شارما^۴ و همکاران (۲۰۰۷) انجام شد (۳۴). کادمیم قابل استخراج خاک به روش DTPA طبق روش لیندزی و نورول^۵ (۱۹۸۷) اندازه‌گیری شد (۲۰).

نتایج و بحث

اثر کادمیم بر وزن تر و خشک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم، زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر وزن تر بخش زیرزمینی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0/01$) معنی‌دار شده است. جدول ۵ مقایسه میانگین اثر کادمیم را بر صفات رویشی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی نشان می‌دهد. بیشترین وزن تر بخش زیرزمینی مربوط به تیمار شاهد زمان دوم یعنی یک هفته پس از بلوغ تجاری (۱۱/۶۴ گرم) و کمترین وزن تر بخش زیرزمینی مربوط به تیمار ۶۰ میلی گرم در کیلوگرم کادمیم در زمان اول یعنی زمان بلوغ تجاری (۳/۵۴ گرم) می‌باشد. بین شاهد زمان اول (بلوغ تجاری) و شاهد زمان دوم (یک

4- Sharma

5- Lindsay, Norvell

6- Oliveira

1- Electrolyte leakage

2- Zhao

3- Ritchie

می‌باشد. نتایج تجزیه داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر وزن خشک برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل کادمیم و زمان بر وزن خشک برگ معنی‌دار نشد. بیشترین وزن خشک برگ در جدول ۵ مربوط به شاهد زمان دوم (۰/۳۵۳ گرم) و کمترین وزن خشک برگ (۰/۱۳۷ گرم) می‌باشد. کادمیم باعث کاهش فعالیت هورمون سیتوکینین می‌شود که تأثیر بسزایی در تکثیر سلول و رشد گیاه دارد (۲۳). کاهش زی‌توده گیاه در اثر سمیت کادمیم پیامد مستقیم کاهش سنتز کلروفیل و فتوسنتز است (۲۲).

اثر کادمیم بر ویژگی‌های برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر سطح برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان بر سطح برگ معنی‌دار نشد و اثر متقابل کادمیم و زمان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. سطح برگ تریچه در شاهد زمان دوم (۱۴۸/۵۶ سانتی‌متر مربع) نسبت به زمان اول

(۱۳۴/۱۲ سانتی‌متر مربع) افزایش داشته است. در جدول ۵ مشاهده می‌شود که در غلظت ۳۰ بین زمان‌های اول (۹۰/۵۳ سانتی‌متر مربع) و دوم (۸۳/۸۵ سانتی‌متر مربع) اختلاف معنی‌دار نبوده است. کمترین سطح برگ متعلق به غلظت ۶۰ در زمان دوم (۷۰/۲۶ سانتی‌متر مربع) می‌باشد. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در جدول ۲ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر تعداد برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است و اثر زمان در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد ولی اثر متقابل کادمیم و زمان بر تعداد برگ معنی‌دار نشد. در جدول ۵ بیشترین تعداد برگ متعلق به شاهد زمان دوم (۵ عدد) و کمترین تعداد برگ متعلق به تیمار ۶۰ زمان اول می‌باشد. نتایج حاصل از تجزیه داده‌ها در جدول ۳ نشان می‌دهد اثر کادمیم روی طول برگ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر طول برگ معنی‌دار نشد. کادمیم طول برگ را کاهش می‌دهد بیشترین طول برگ متعلق به شاهد در زمان دوم (۵/۹ سانتی‌متر) و کمترین طول برگ متعلق به تیمار ۶۰ زمان اول (۳/۹ سانتی‌متر) می‌باشد. کادمیم عرض برگ را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیم بر صفات رویشی

Table 2- Analysis of variance effect cadmium for vegetative traits

میانگین مربعات (MS)								
منابع تغییر	درجه آزادی	وزن تر بخش	وزن تر بخش	وزن خشک بخش	وزن تر برگ	وزن خشک برگ	سطح برگ (سانتی‌متر مربع)	تعداد برگ
Sources change	Degrees of Freedom	زیرزمینی Root fresh weight (g)	زیرزمینی Root fresh weight (g)	زیرزمینی Root dry weight (g)	Leaf fresh weight (g)	Leaf dry weight (g)	Leaf area (cm ²)	Leaf number
بلوک	2	0.48 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.0012 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.00031 ^{ns}	38.17 ^{ns}	0.055 ^{ns}
Blok								
کادمیم	2	52.16**	52.16**	0.18**	3.16**	0.071**	7435.4**	4.38*
Cadmium								*
زمان	1	13.71**	13.71**	0.024**	0.19 ^{ns}	0.0014*	2.6 ^{ns}	1.38*
Time								
کادمیم×زمان	2	10.39**	10.39**	0.014*	0.06 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	264.8**	0.055 ^{ns}
Cadmium × Time								
خطا	10	0.44	0.44	0.0019	0.04	0.00028	23.26	0.18
Error								
کل	17							
Total								
CV(ضریب تغییرات)		11.12	11.12	9.52	8.84	8.1	4.7	9.9

*, **, و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵٪، ۱٪ و غیر معنی‌دار

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

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیم روی صفات رویشی و فیزیولوژیکی
Table 3- Analysis of variance effect cadmium on vegetative and physiological traits
میانگین مربعات (MS)

منابع تغییر Sources change	درجه آزادی Degrees of Freedom	طول برگ Leaf length (cm)	عرض برگ Leaf width (cm)	طول ریشه (سانتی‌متر) Root length (cm)	نشت الکترولیت Electrolyte leakage	محتوای رطوبت نسبی Relative humidity
بلوک Blok	2	0.13 ^{ns}	0.0038 ^{ns}	0.58 ^{ns}	1.52 ^{ns}	18.2 ^{ns}
کادمیم Cadmium	2	3.9**	4.13**	31**	255.3**	142.32**
زمان Time	1	0.4 ^{ns}	0.43**	2.5*	43.43 ^{ns}	21.29 ^{ns}
کادمیم×زمان Cadmium Time ×	2	0.21 ^{ns}	0.2*	1.99*	14.7 ^{ns}	1.5 ^{ns}
خطا Error	10	0.21	0.03	0.46	12.62	7.1
کل Total	17					
CV (ضریب تغییرات)		10	6.14	7.5	18.8	3.4

*, **, و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵٪، ۱٪ و غیر معنی‌دار
and ns means significant at 1%, 5% and non-significant respectively **, *

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر کادمیم بر صفات بیوشیمیایی
Table 4- Analysis of variance effect cadmium on biochemical traits
میانگین مربعات (MS)

منابع تغییر Sources change	درجه آزادی Degrees of Freedom	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Chlorophyll total	کارتونوئید Carotenoid	پرولین Proline	ویتامین C Vitamin C	کادمیم بخش هوایی Cadmium shoot	کادمیم بخش زمینی Cadmium root	کادمیم قابل جذب خاک Soil Cd (ave)
بلوک Blok	2	0.02 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.015 ^{ns}	0.06 ^{ns}	1.95 ^{ns}	2.5 ^{ns}	6.36 ^{ns}	6.7 ^{ns}	0.14 ^{ns}
کادمیم Cadmium	2	24.69**	3.98**	48.4**	1.63**	2530.7**	66.82**	6324.3**	۲۴۴۶/۴**	390.45**
زمان Time	1	0.07 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.19 ^{ns}	1.71 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1.61 ^{ns}	1.42 ^{ns}	1.11**
کادمیم×زمان Cadmium ×Time	2	0.2 ^{ns}	0.22 ^{ns}	0.83*	0.29 ^{ns}	12.5**	3.6 ^{ns}	۳۸/۷۸*	۲۶/۴۵**	0.96**
خطا Error	10	0.12	0.1	0.18	0.11	1.5	1.97	7.01	1.72	0.056
کل Total	17									
CV (ضریب تغییرات)		8.98	24.4	8.27	26.7	4.5	7.2	5.4	3.7	2.72

*, **, و ns به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵٪، ۱٪ و غیر معنی‌دار
and ns means significant at 1%, 5% and non-significant respectively **, *

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر کادمیم بر صفات رویشی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی

Table 5- The Average comparison of the effect of cadmium on vegetative, physiological and biochemical traits

غلظت کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم خاک) Soil cadmium (ave) (mg kg ⁻¹)						صفات اندازه گیری شده Measured traits
60	30	0 (شاهد) (Control)	زمان برداشت اول Firth harvest time	زمان برداشت دوم Second harvest time	زمان برداشت اول Firth harvest time	
زمان برداشت دوم Second harvest time	زمان برداشت اول Firth harvest time	زمان برداشت دوم Second harvest time	زمان برداشت اول Firth harvest time	زمان برداشت دوم Second harvest time	زمان برداشت اول Firth harvest time	
3.56d	3.54d	5.33c	4.89c	11.64a	6.87b	وزن تر بخش زیرزمینی (گرم) Fresh weights (g)
0.31a	0.28	0.44a	0.43a	0.74a	0.55a	وزن خشک بخش زیرزمینی (گرم) Dry weights (g)
2.06c	1.90c	2.25	2.23c	3.56a	3.13b	وزن تر برگ (گرم) Leaf fresh weight (g)
0.137cd	0.130d	0.166c	0.156cd	0.353a	0.316b	وزن خشک برگ (گرم) Leaf dry weight (g)
70.26e	80.33d	83.85cd	90.53c	148.56a	134.12b	سطح برگ (سانتی متر مربع) Leaf area (cm ²)
4.0cd	3.3d	4.3bc	4.0cd	5.6a	5.0ab	تعداد برگ Leaf number
4.0c	3.9c	4.3bc	4.2c	5.9a	5.1ab	طول برگ (سانتی متر) Length leaf (cm)
2.4c	2.3c	2.5c	2.4c	4.2a	3.5b	عرض برگ (سانتی متر) Width leaf (cm)
7.0d	6.9d	8.6c	8.4c	12.5a	10.4b	طول ریشه (سانتی متر) Root length (cm)
28.2a	21.5b	20.6b	18.6bc	12.2cd	11.5d	درصد نشت الکترولیت Electrolyte leakage (%)
71.80c	74.30c	75.70c	76.70bc	81.15ab	84.16a	درصد محتوای رطوبت نسبی Relative humidity (%)
\$2.27c	2.70bc	2.80bc	3.03b	6.34	6.05a	کلروفیل a (میلی گرم در گرم) Chlorophyll a (mg/g)
0.5c	0.9bc	0.9bc	1.2b	2.4a	2.0a	کلروفیل b (میلی گرم در گرم) Chlorophyll b (mg/g)
2.82c	3.57bc	3.70b	4.24b	8.77a	8.14a	کلروفیل کل (میلی گرم در گرم) Chlorophyll total
0.84c	1.15bc	0.67c	1.26bc	2.02a	1.75ab	کارتونوئید (میلی گرم در گرم) Cartonoeid (mg/g)
48.8a	47.3a	29.8b	26.8c	5.7e	8.3d	پرولین (میلی گرم در گرم) Proline (mg/g)
15.9c 71.57a	17.0bc 68.08ab	18.6b 65.92b	19.2b 64.92b	24.0a 8.37d	22.2a 14.66c	ویتامین C هیپوکوتیل (میلی گرم در ۱۰۰ گرم) Vitamin C (mg/100 g)
						غلظت کادمیم در بخش هوایی (mg/kg) Cd of aerial part (mg/kg)
52.9a	52.7 a	42.4b	37.5c	11.5 e	15.0d	غلظت کادمیم در بخش زیرزمینی (mg/kg) Cd of underground part (mg/kg)
						غلظت کادمیم خاک بعد از کشت (mg/kg) Soil Cd after cultivation (mg/kg)
15.38b	16.8a	10.28c	10.34c	0.15d	0.16d	

ارقامی که دارای حرف غیرمشترک در یک ردیف هستند، از نظر آماری در سطح احتمال پنج درصد اختلاف معنی دار دارند
Rows with the non-same letters have significance difference at the five percent probability level

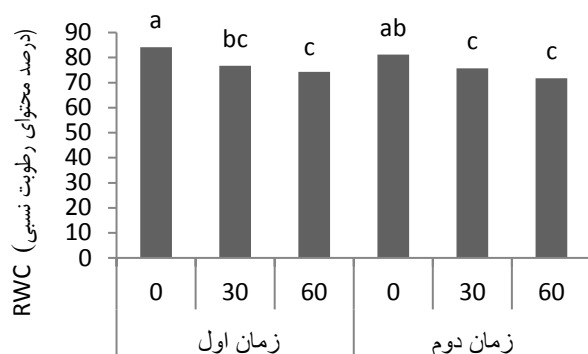
اثر کادمیم بر نشت الکترولیت و محتوای رطوبت نسبی

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نشان می‌دهد که اثر کادمیم بر نشت الکترولیت در سطح احتمال یک درصد و اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر نشت الکترولیت معنی‌دار نشد. شکل ۱ نشان می‌دهد که کادمیم و نشت الکترولیت یک رابطه مثبتی را با هم نشان می‌دهند، بدین صورت که با افزایش غلظت کادمیم نشت الکترولیت افزایش یافته است بیشترین درصد نشت متعلق به تیمار ۶۰ زمان دوم (۲۸/۲) و کمترین نشت الکترولیت متعلق به شاهد در زمان اول (۱۱/۵) می‌باشد. کادمیم با افزایش پراکسید سیون لیپید و تولید گونه های فعال اکسیژن، زوال غشاها را فراهم می‌نماید (۱۷). کادمیم همانند دیگر فلزات شباهت بسیار زیادی با لیگاند های نیتروژن و سولفور پروتئین ها دارد پس با تشکیل پیوند با پروتئین ها موجب تخریب کانال های یونی و نشت یونی می‌گردد (۲۴). اثر کلرید کادمیم بر محتوای رطوبت نسبی در جدول ۳ در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر محتوای رطوبت نسبی معنی‌دار نشد. شکل ۲ نشان می‌دهد که کادمیم بر محتوای رطوبت نسبی (RWC) تأثیر گذاشته است. و باعث کاهش آن شده است بیشترین مقدار به سطح شاهد زمان اول (۸۴/۱۶ درصد) و کمترین میزان محتوای رطوبت نسبی به سطح ۶۰ زمان دوم (۷۱/۸ درصد) تعلق یافت. کاهش تورژسانس سلولی موجب به هم خوردن توازن آبی در گیاهان می‌شود. کاهش جذب آب در تیمار کادمیم به علت محدودیت در رشد ریشه ها می‌باشد. در تیمار کادمیم (RWC)، پتانسیل آب و پتانسیل فشار برگ کاهش می‌یابد. کاهش پتانسیل فشار برگ می‌تواند در نتیجه به هم خوردن تنظیم اسمزی باشد و این یک مکانیزم برای حفظ توازن آب در مواقع کمبود آب می‌باشد (۳۷).

اثر کادمیم بر کلروفیل و کارتنوئید

کادمیم کلروفیل a و b و کل و میزان کارتنوئیدها را به طور معنی‌داری کاهش داده است. و مقدار کلروفیل b کاهش بیشتری نسبت به کلروفیل a داشته است که مطابق با یافته‌های چن^۱ و همکاران (۲۰۱۰) در دو گیاه پاپیو^۲ و خردل می‌باشد (۶). نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد کادمیم اثر معنی‌داری بر میزان کلروفیل a در سطح احتمال یک درصد داشته است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر میزان کلروفیل a معنی‌دار نشد. در جدول ۵ بیشترین میزان کلروفیل a مربوط به شاهد زمان دوم (۶/۳ میلی گرم در گرم) و کمترین میزان کلروفیل a مربوط به تیمار ۶۰ زمان دوم (۲/۲۷ میلی گرم در گرم) می‌باشد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود کادمیم

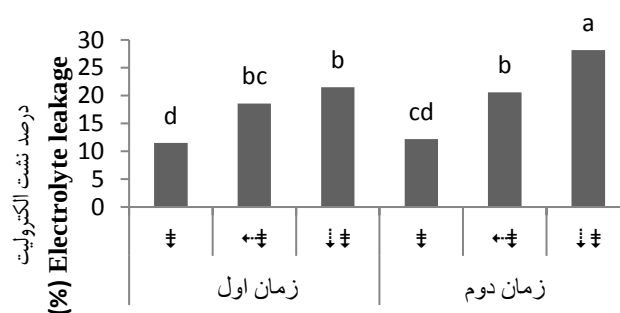
اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان کلروفیل b داشته است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر کلروفیل b معنی‌دار نشد. بیشترین میزان کلروفیل b متعلق به شاهد در زمان دوم (۲/۴ میلی گرم در گرم) و کمترین میزان کلروفیل b (۰/۵ میلی گرم در گرم) در تیمار ۶۰ در زمان دوم می‌باشد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود کادمیم اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر میزان کلروفیل کل داشته است. اثر زمان بر کلروفیل کل معنی‌دار نشد. اثر متقابل کادمیم و زمان بر کلروفیل کل در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار شد. شکل ۳ نشان می‌دهد که بیشترین میزان کلروفیل کل مربوط به شاهد زمان اول (۸/۷ میلی گرم در گرم) و کمترین میزان کلروفیل کل مربوط به تیمار ۶۰ زمان دوم (۲/۸۲ میلی گرم در گرم) می‌باشد. کادمیم تشکیل کلروفیل را از طریق کاهش جذب آهن و منیزیم کم می‌کند (۱۲ و ۱۸). ممکن است کادمیم جایگزین منیزیم در مولکول کلروفیل شود (۱۰). کاهش ذخیره کلروفیل در برگ‌ها به علت مهار مراحل مختلف بیوسنتز کلروفیل است (۱۴). مهار بیوسنتز کلروفیل احتمالاً به واسطه مهار سنتز δ-آمینولولینیک اسید و مهار تشکیل پروتوکلروفیلید ردکتاز می‌باشد (۳۷). کادمیم با کاهش فعالیت آنزیم پروتوکلروفیلید ردکتاز از طریق تأثیر بر گروه‌های سولفیدریل باعث کمتر شدن تولید اسید δ-آمینولولینیک (ALA) می‌شود اسید δ-آمینولولینیک یک پیش ماده برای حلقه تتراپیرول موجود در ساختمان کلروفیل است (۲۶). نتایج تجزیه واریانس در جدول ۴ نشان می‌دهد کادمیم اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بر کارتنوئیدها داشته است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر کارتنوئیدها معنی‌دار نشد. شکل ۴ نشان می‌دهد که کادمیم میزان کارتنوئیدها را کم می‌کند به طوری که بیشترین میزان کارتنوئیدها مربوط به شاهد زمان دوم (۲/۰۲ میلی گرم در گرم) و کمترین میزان کارتنوئیدها (۰/۸۴ میلی گرم در گرم) می‌باشد. مقدار کارتنوئیدها تحت تنش کادمیم کاهش می‌یابد. کاهش آنها به دلیل فرونشانی غیرفتوشیمیایی کلروفیل‌های برانگیخته است که توسط کارتنوئیدها انجام و در نتیجه بر هم ریختن ساختارشان می‌گردد. کارتنوئیدها در سمیت زدایی کلروفیل برانگیخته سه‌تایی نقش دارند. کارتنوئیدها در چند سطح باعث کاهش اثرات سمی رادیکال‌های آزاد می‌شوند که از جمله واکنش با کلروفیل برانگیخته برای ممانعت از تشکیل رادیکال‌های فعال اکسیژن است. کارتنوئیدها به عنوان یک سیستم حفاظتی در برابر تنش اکسیداتیو القا شده از بین می‌روند (۳۱).



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg

شکل ۲- اثر کادمیم بر محتوای رطوبت نسبی

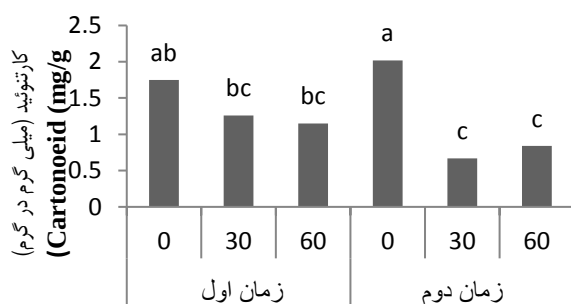
Figure 2- Effect of cd on Relative humidity (%)



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg

شکل ۱- اثر کادمیم بر درصد نشت الکترولیت

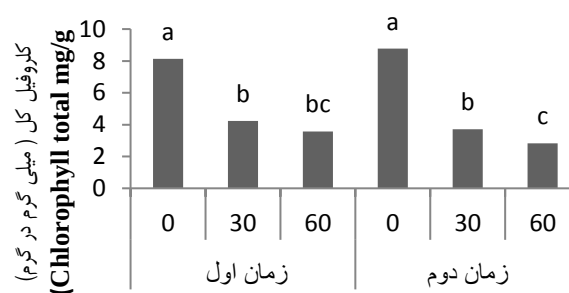
Figure 1- Effect of cd on electrolyte leakage (%)



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg

شکل ۴- اثر کادمیم بر کارتنوئید

Figure 4- Effect of cd on cartenoid



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg

شکل ۳- اثر کادمیم بر کلروفیل کل

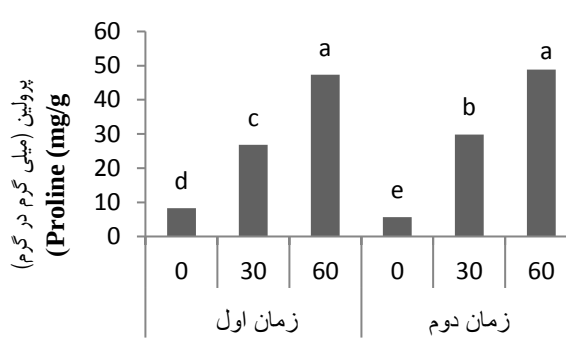
Figure 3- Effect of cd on chlorophyll total



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg)

شکل ۶- اثر کادمیم بر ویتامین ث هیپوکوتیل

Figure 6- Effect of cd on vitamin C



سطوح کادمیم (میلی گرم در کیلوگرم)
(Cd levels (mg/kg)

شکل ۵- اثر کادمیم بر پرولین

Figure 5- Effect of cd on proline (mg/g)

آسکوربات کاهش می‌یابد. دلیل دیگر برای کاهش آسکوربیک، کاهش فعالیت آنزیم‌های درگیر در اکسید و احیا آسکوربات می‌باشد (۸ و ۹). کاهش در مقدار اسید آسکوربیک ممکن است به علت سنتز کم آن، مصرف سریع آن یا کاهش نسبت اکسید و احیا آن باشد (۵).

تجمع کادمیم در بخش هوایی و زمینی

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که کادمیم اثر معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد در بخش هوایی و بخش زمینی داشته است. اثر زمان در غلظت کادمیم بخش هوایی و بخش زمینی معنی‌دار نشد. اثر متقابل کادمیم و زمان در بخش هوایی در سطح احتمال ۵ درصد و در بخش زمینی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. جدول ۵ نشان می‌دهد که در تیمار ۶۰ کادمیم بیشترین تجمع کادمیم در بخش هوایی (۷۱/۵۷ میلی گرم در کیلوگرم) و در بخش زمینی (۵۲/۹ میلی گرم در کیلوگرم) در زمان دوم برداشت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

کاربرد غلظت‌های متفاوت کادمیم ویژگی‌های رویشی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش غلظت کادمیم در خاک میزان تجمع کادمیم در گیاه افزایش می‌یابد. افزایش غلظت کادمیم باعث افزایش نشت الکترولیت و غلظت پرولین و کاهش محتوای رطوبت نسبی، کلروفیل، ویتامین ث تربچه شد. به علاوه باعث کاهش عملکرد از جمله وزن تر و خشک، طول ریشه، سطح برگ، طول و عرض برگ و تعداد برگ‌های تربچه شد. همچنین اثرات تخریبی بر ویژگی‌های رویشی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تربچه یک هفته پس از بلوغ تجاری بیشتر از زمان اول (بلوغ تجاری) بود. بنابراین در مدیریت استفاده از کودهای فسفره حاوی کادمیم برای

اثر کادمیم بر میزان پرولین، ویتامین ث هیپوکوتیل

در جدول ۴ مشاهده می‌شود اثر کادمیم روی پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. اثر زمان بر میزان پرولین معنی‌دار نشد. اثر متقابل کادمیم و زمان بر میزان پرولین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است. میزان پرولین تحت تأثیر کادمیم افزایش نشان داده است (شکل ۵). بیشترین میزان پرولین مربوط تیمار ۶۰ زمان دوم (۴۸/۸ میلی گرم در گرم) و کمترین میزان پرولین مربوط به شاهد زمان دوم (۵/۷ میلی گرم در گرم) می‌باشد. افزایش مقدار پرولین بر اثر تنش کادمیم احتمالاً به عنوان مسیری برای حفظ انرژی است که از طریق بازدارندگی رشد ریشه توسط فعالیت آنزیم پراکسیداز موجود در دیواره‌های سلولی صورت می‌گیرد (۷). پرولین در تعدیل تنش‌های محیطی، از جمله تنش فلزات سنگین نقش مهمی را ایفا می‌کند پرولین احتمالاً در سلول‌های تحت تنش نقش آنتی اکسیدانی دارد (۴۰). همچنین معلوم شده است که پرولین تأثیر کندکنندگی یون‌ها روی آنزیم‌ها را کاهش می‌دهد و باعث افزایش و پایداری آنزیم‌ها در دماهای بالا می‌شود (۳۸). در واقع پرولین به عنوان یک محافظ شیمیایی باعث پایداری فرم طبیعی پروتئین‌ها شده و از بهم خوردن شکل طبیعی ترکیبات آنزیمی ممانعت می‌نماید (۳۳). جدول ۴ نشان می‌دهد که کادمیم اثر معنی‌داری بر ویتامین ث هیپوکوتیل در سطح احتمال یک درصد داشته است. اثر زمان و اثر متقابل کادمیم و زمان بر میزان ویتامین ث معنی‌دار نشد. کادمیم میزان ویتامین ث را کاهش می‌دهد. شکل ۶ نشان می‌دهد که بیشترین ویتامین ث مربوط به شاهد زمان دوم (۲۴ میلی گرم در صد گرم) می‌باشد و کمترین میزان ویتامین ث مربوط به تیمار ۶۰ زمان دوم (۱۵/۹ میلی گرم در صد گرم) می‌باشد. در تنش کادمیم گلوکاتیون وارد مسیر سنتز فیتوکلاتین‌ها می‌شود بنابراین سوبسترا برای

منابع

- 1- Abou Auda M., and Elshakhali E. 2010. Cadmium and zinc toxicity effects on growth and mineral nutrients of carrot (*Daucus carota*). Pakistan Journal of Botany, 42(1): 341-351.
- 2- Bates L.S., Waldren, R. P., and Teare I. D. 1973. Rapid determination of proline for water stress studies, Plant Soil, 39: 205-207.
- 3- Barcelo J., Poschenrieder C., Andreu I., and Gunse B. 1986. Cadmium- induced decrease of water stress resistance in bush bean plants (*L. cv. contender*). I. Effects of Cd on water potential, relative water content, and cell wall elasticity. Journal Plant Physiology, 125:17-25.
- 4- Behtash F., Tabatabaee S.J., Malakooti M.J., Sororoaldin M.H., and Oustan Sh. 2009. Effect cadmium and Silicon on growth and some physiological properties of red beet. Journal of Sustainable Agricultural Science, 20.2 (1): 53-67.
- 5- Borraccino G., Mastropasqua L., DeLeonardis S., and Dipierro S. 1994. The role of ascorbic acid system in delaying the senescence of oat (*Avena sativa* L.) leaf segments. Journal of Plant Physiology, 144: 161-166.
- 6- Chen X., Wang j., Shi Y., Zhao M.Q., and Chi Y. 2010. Effects of cadmium on growth and photosynthetic activities in pakchoi and mustard. Physiology, 52: 41-46.
- 7- Chen S.L., and Kao C.H. 1995. Cd induced changes in proline level and peroxidase activity in roots of rice seedlings. Plant Growth Regulation, 17:67-71.
- 8- Cho U. H., and Park J.O. 2000. Mercury-induced oxidative stress in tomato seedlings. Plant Science, 156:1-9.
- 9- DiCagno R., Guidini L., DeGara L., and Soldatini G.F. 2001. Combined cadmium and ozone treatment affect photosynthesis and ascorbate-dependent defense in sunflower. New Phytologist, 151, 627-636.
- 10- Farouk S., Mosa A.A., Taha A.A., Ibrahim H.M., and El-Gahmery A.M. 2011. Protective Effect of Humic acid and Chitosan on Radish (*Raphanus sativus* L. Var. sativus) plant subjected to Cadmium stress. Journal of stress physiology and Biochemistry, 7(2): 99-116.
- 11- Gouia H., Ghorbal M.H., and Meyer C. 2001. Effect of cadmium on activity of nitrat reductase and on other enzymes of the nitrate assimilation pathway in bean. Plant Physiology, 38:629-638.
- 12- Haghiri F. 1973. Cadmium uptake by plant. Journal of Environmental Quality, 2:93-95.
- 13- Haghighi M., Kafi M., Sadat Taqavi P., Kashi A.K., and Savabeghi Gh. 2008. The variation of lettuce enzyme photosynthesis activity under the influence of lettuce toxicity. Journal of Horticulture (Science and Technology of Agriculture), 22: 2-26.
- 14- Hegedus A., Erdi S., and Horvath G. 2001. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress. Plant Science, 160:1085-1093.
- 15- Hernandez Y., Lobo M.G., and Gonzalen M. 2006. Determination of vitamin c in tropical fruits: A comparative evaluation of methods. Food Chemistry, 96: 654-664.
- 16- Hodaji M., and Jalalian A. 2004. Distribution of nickel, manganese and cadmium in dung and agricultural products in the Mobarakeh Steel Company. Science and Technology of Agriculture and Natural Resources, 3: 66-55.
- 17- Karim G., and Nojavan M. 2007. Effect of cadmium on growth parameters, proline content, sugars and soluble protein in lentils (*Lens miller*), Research and Development in Agriculture and Horticulture, 76: 53-47.
- 18- Khan D.H., and Frankland B. 1983. Effect of cadmium and lead on radish plants with particular reference to movement of metals through soil profile and plant. Plant and Soil, 70:335-345.
- 19- Lin L.D., HU K., Majing J., Qiu W., Wang P., and Zhang Sh. 2011. Effects of cadmium on the growth and physiological characteristics of sorghum plants. African Journal of Biotechnology, 10(70) 15771-15776.
- 20- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of DTPA soil test for zinc, Iron, manganese, and copper. Soil Science Society American Journal, 42: 421-428.
- 21- Lichtenthaler H.K. 1987. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of photosynthetic bio-membranes. In: Methods in Enzymol. (eds. S.P. Colowick and N.O. Kaplan) Academic Press. New York, 48: 350-382.
- 22- Mazhoudi A., Chaoui M.H., Ghorbal E., and Ferjani E. 1997. Response of antioxidant enzymes to excess copper in tomato (*Lycopersicon esculentum*, Mill.). Plant Science, 127, 129-137.
- 23- Mok M. 1994. Cytokinins and plant development- An overview. PP. 155-166. In: Mok, D. and M. Mok (Eds.), Cytokinins: Chemistry, Activity, and Function, CRC Press, Boca Raton, FL.
- 24- Mishra S., Tripathi R. D., Srivastava S., Dwivedi S., and Kumar T. 2009. Thiol metabolism play significant role during cadmium detoxi, cation by *Ceratophyllum demersum* L. Bioresource Technology, 100: 2155-2161.
- 25- Nazemi S., and Khosravi A. 2011. A Survey on the Status of Heavy Metals in Soil, Water, and Vegetable Land. Journal of Knowledge and Health, 5(4): 31-28.
- 26- Ouzounidou G. 1995. Cu-ions mediated changes in growth chlorophyll and other ion contents in Cu-tolerant *Koeleria splendens*. Biology Plantarum, 37:71-79.

- 27- Oliveira J., Oliva M., and Cambraia J. 1994. Effect cadmium on chlorophyll contents and on peroxidase activity in soybean. Departamento de Biologia Geral, Universidade Federal de Vicosa, Vicosa, MG. 36570-000, Brazil.
- 28- Peyvast Gh. 2009. Vegetables. Scholarly Publishing. Fifth Edition. 577 p.
- 29- Pourakbar L., and Ashrafi R. 2011. Effect of cadmium on hydrogen peroxide production and activity of some antioxidant enzymes in corn (*Zea mays* L.). Tarbiat Moallem University of Science, 9(3): 484-473.
- 30- Ritchie S. W., and Nguyen H.T. 1990. Leaf water content and gas exchange parameters of two wheat genotypes differing in drought resistance. Crop Science, 30: 105-111.
- 31- Sanitadi Toppi L., and Gabbrielli R. 1999. Response to cadmium in higher plants- review. Environmental and Experimental Botany, 41:105-130.
- 32- Salaskar D., Shrivasta M., and Kale S.P. 2011. Bioremediation Potential of spinach (*Spinacia olelacea* L.) for decontamination of cadmium in soil. Current Science, 101:1-5.
- 33- Solomon A., and Beer S. 1994. Effect of NaCl on the carboxylating activity of rubisco and absence of proline related compatible solutes. Plant Physiology, 108: 1387- 1394.
- 34- Sharma R.K., Agrawal M., and Marshal A. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in surburban area of Varanasi, India. Ecotoxicology and Environmental Safety, 66: 258-266.
- 35- Taji H., and Golchin A. 2010. Investigation of different levels of cadmium and sulfur on yield and concentration of cadmium and some of the low-level elements in maize leaf and corn root (*Zea mays* L.) in greenhouse conditions, Science and Technology of Greenhouse Cultivars, 4: 32-23.
- 36- Vitoria A.p., Dacunha M., and Azevedo R.A. 2005. Ultra-structural changes of radish leaf exposed to cadmium. Enviromental and Experimental Botany, 58: 47-52.
- 37- Vassilev A., and Yordanov I. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of cadmium treated Plants. Plant Physiology, 23(3-4), 114-133.
- 38- Wallace DM. 1987. Large and Small Phenol Extraction Methods in Enzymology, Academic Press, New York.
- 39- Zhao Y., Aspinall D., and Paleg L.G. 1992. Protection of membrane integrity in *Medicago saliva* L. by glycinebetaine against the effects of freezing. Journal of Plant Physiology, 140: 541-543.
- 40- Zhang H.H., Tang M., and Zheng C. 2010. Effect of inoculation with AM fungi on lead uptake, translocation and stress alleviation of *Zea mays* L. seedlings planting in soil with increasing lead concentrations. European Journal of Soil Biology, 46: 306-311.



Effect of Cadmium on Vegetative Traits, Physiological and Biochemical Indexes of Radish (*Raphanus sativus* L.)

K. Dalvand Gomari¹- S.A. Eftekhari^{2*}

Received: 07-01-2014

Accepted: 05-01-2015

Introduction: Among wide variety of soil pollutants including heavy metals, acidic precipitation and other toxicants, the importance of heavy metals due to their pollution capacity has received growing attention in recent years. Heavy metals are important environmental pollutants and their toxicity is a problem of increasing significance for ecological, evolutionary, nutritional, and environmental reasons. Of all non-essential heavy metals, cadmium (Cd) is perhaps the metal that has attracted the most attention in soil science and plant nutrition due to its potential toxicity to humans, and also its relative mobility in the soil-plant system. The uptake of ions takes place in competition with that of elements such as Zn, P, Cl⁻, Ca, and Cu. Soil, environmental, and management factors impact the amount of Cd accumulated in plants (Hart et al., 1998). Much of the Cd taken up by plants is retained in the roots, but a portion is translocated to the aerial portions of the plant and into the seed. The amount of Cd accumulated and translocated in plants varies with species and with cultivars within species. Cd toxicity causes inhibition and abnormalities of general growth in many plant species. After long-term exposure to Cd, roots are mucilaginous, browning, and decomposing; reduction of shoots and root elongation, rolling of leaves, and chlorosis can occur. Cd was found to inhibit lateral root formation while the main root became brown, rigid, and twisted. The changes in the leaf included alterations in chloroplast ultrastructure, low contents of chlorophylls, which caused chlorosis, and restricted activity of photosynthesis. Radish (*Raphanus sativus*) is a root vegetable grown and consumed all over the world and is considered as a part of the human diet, even though it is not common among some populations. Usually, people eat radishes raw as a crunchy vegetable, mainly in salad, while it also appears in many European dishes. Some people, at least in the Middle East, prefer to drink its juice in pursuit of certain health benefits. Radishes have different skin colors (red, purple, black, yellow, and white through pink), while its flesh is typically white. In addition, the edible root of radish varies in its flavor, size, and length throughout the world.

Materials and Methods: In this study, we investigated the influence of Cd application rates on vegetative parameters, and physiological and biological indexes of radish. The experimental design was a factorial with randomized block with two treatments and three replications carried out at the Research Farm of College of Agriculture, Shahid Chamran University. Treatments included three rates of Cd application of 0 (control), 30 and 60 mg kg⁻¹, and two harvesting dates of commercial maturity (CM) and a week after CM, hereafter referred to as 1st and 2nd harvesting dates. Measurements included vegetative parameters such as wet and dry weights, leaf area, length and width of leaves, leaf numbers and root length. Physiological indexes of electrolyte leakage and relative humidity, and biochemical indexes of chlorophyll a, b and total, Carotenoid, Proline and vitamin C were also determined.

Results and Discussion: The results indicated that the Cd application reduced all of the vegetative parameters. Application of 60 mg kg⁻¹ of Cd increased the electrolyte leakage by 28.2% and Proline concentration by 48.8 mg g⁻¹. Cd application increased the relative humidity. All biochemical indexes decreased as the Cd application rates increased. The maximum concentration of Cd in plant was observed at 60 mg kg⁻¹ Cd contamination. It seems that decrease of physiological indices due to increased Cd concentration reduced the growth properties.

Conclusion: Application of different Cd concentrations affected the vegetative, physiological and biochemical properties. By increasing Cd concentration of soil, the Cd accumulation in the plant increased. Increasing the Cd concentration increased the electrolyte leakage and proline concentration and reduced the content of relative humidity, chlorophyll, vitamin C in radish. In addition, it decreased yield including fresh and dry weights, root length, leaf area, leaf length and width, and number of radish leaves. Further, the effects of degradation on vegetative, physiological and biochemical characteristics of radish were one week after commercial maturity more than the first time (commercial maturity). Therefore, the phosphorus-containing Cd for the cultivation of

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz
(*- Corresponding Author Email: eftekhari_9t@yahoo.com)

vegetables, especially tubers, such as radishes, as well as harvest management, should be carefully applied.

Keywords: Cd, Physiological indexes, Proline



بررسی جذب زیستی کادمیم (II) از محیط آبی به وسیله زیست توده اصلاح شده *سرآتوفیلیوم* (*Ceratophyllum demersum* L.) دمرسوم

حسین شکری پور^۱ - منا گلابی^{۲*} - هادی معاضد^۳ - نعمت اله جعفرزاده حقیقی فرد^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۲۴

چکیده

در این تحقیق، اثر جاذب اصلاح شده *سرآتوفیلیوم* دمرسوم بر حذف فلز سنگین کادمیم بررسی گردید. با استفاده از آزمایش‌های جذب ناپیوسته اثر اسیدیته (pH)، زمان تماس، مقدار جاذب و غلظت اولیه کادمیم بر میزان حذف کادمیم، هم‌چنین مدل‌های سینتیک و هم‌دمای جذب بررسی شدند. با افزایش pH از سه تا هشت، راندمان حذف ابتدا از ۹۳٪ تا ۹۷٪ افزایش، سپس به ۸۵٪ کاهش یافت. ظرفیت جذب نیز از ۷/۰۴ تا ۷/۳۵ افزایش سپس تا ۶/۴۴ میلی گرم بر گرم کاهش و pH بهینه هفت به دست آمد. با افزایش زمان تماس از ۵ تا ۲۴۰ دقیقه، راندمان حذف از ۶۷٪ تا ۹۸٪، تا زمان ۱۸۰ دقیقه افزایش و سپس اندکی کاهش یافت. ظرفیت جذب نیز از ۶/۲۵ تا ۹/۱۳ میلی گرم بر گرم افزایش و سپس اندکی کاهش یافت و زمان تعادل ۶۰ دقیقه به دست آمد. با افزایش مقدار جاذب از ۰/۰۲ تا ۴ گرم بر لیتر، راندمان حذف ۳۷٪ تا ۹۹٪ افزایش یافت، ظرفیت جذب از ۱۶۹/۵ به ۲/۳۵ میلی گرم بر گرم کاهش یافت و مقدار جاذب یک گرم بر لیتر به عنوان مقدار بهینه به دست آمد. با افزایش مقدار غلظت اولیه کادمیم از ۱۰ تا ۲۰۰ میلی گرم بر لیتر، راندمان حذف از ۹۶٪ به ۳۱٪ کاهش، ظرفیت جذب از ۹/۱۸ به ۵۹/۷ افزایش و غلظت ده میلی گرم بر لیتر به عنوان غلظت اولیه بهینه انتخاب گردید. مدل سینتیک شبه درجه دوم با ضریب تعیین ۰/۹۹ و مدل لانگمویر نیز با ضریب تعیین ۰/۹۹، از برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار بود. نتایج تحقیق قابلیت بالای *سرآتوفیلیوم* دمرسوم را، به عنوان جاذب زیستی برای حذف کادمیم، تأیید نمود.

واژه‌های کلیدی: جاذب، راندمان حذف، مدل سینتیک، مدل لانگمویر

مقدمه

دارند. منابع این فلزات شامل فاضلاب‌های صنعتی و خانگی، اتمسفر، رواناب و لیتوسفر می‌باشد (۲۳). فلزات سنگین به دلیل خاصیت غیرقابل تجزیه بودن، پایداری و تجمع پذیری در مقادیر کم نیز سمی و به عنوان یکی از نگرانی‌های عمده زیست محیطی به شمار می‌آیند (۱۰ و ۱۱). فلزات سنگین تمایل به تجمع در اندام‌ها و بافت‌های موجودات زنده را دارند که سبب بروز انواع بیماری‌ها و اختلالات برای انسان و دیگر موجودات زنده می‌شوند (۳۱). طیف وسیعی از صنایع از جمله استخراج معادن، پردازش فلزات، آبکاری، الکترونیک و ... باعث رهاسازی این فلزات به محیط زیست شده و می‌تواند سلامت انسان را به خطر اندازد. بنابراین عمل تصفیه آب‌های آلوده به این فلزات قبل از تخلیه‌ی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۱۱ و ۱۶).

کادمیم و سرب به دلیل استفاده گسترده، در اکثر آلاینده‌های حاوی فلزات سنگین وجود دارند. آن‌ها به دلیل اثرات سمی‌شان توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. کادمیم به طور گسترده در باتری‌ها و رنگ‌دانه‌ها استفاده می‌شود و به عنوان یک ماده سرطان‌زا و عامل بیماری ایتای - ایتای^۶ شناخته شده است (۳۶). بنابراین حذف فلزات

در سال‌های اخیر نگرانی در مورد آثار دراز مدت فلزات سنگین به عنوان آلاینده‌های زیست محیطی افزایش یافته است. آلودگی محیط زیست به فلزات سنگین از مسایل مهم زیست محیطی می‌باشد که متأسفانه به دلیل ورود بی‌رویه و کنترل نشده انواع فاضلاب و پسماندهای صنعتی، میزان ورود آن‌ها به هوا، آب و خاک به شدت رو به افزایش است (۹). کادمیم، مس، سرب، جیوه، نیکل و روی، جزء خطرناک‌ترین آلاینده‌ها به شمار می‌روند و در فهرست آلاینده‌های اولویت‌دار^۴ سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا^۵ (USEPA) قرار

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته، استادیار و استاد بازنشسته دانشکده مهندسی

علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.golabi@scu.ac.ir)

۴- استاد دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات درمانی جندی شاپور اهواز

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.66197

4- Priority Pollutants

5- United State Environmental Protection Agency

6- Itai-itai disease

سنگین یا کنترل غلظت آن‌ها در محلول‌های آبی، به علت ایجاد اختلالات شدید موضوع مهمی در بهداشت جامعه محسوب می‌شود (۶).

اخیراً، روش‌ها و فناوری‌های بیولوژیکی مانند جذب زیستی و تجمع زیستی^۱ برای کمک به محققین جهت رویارویی با مشکل حذف فلزات سنگین از جریان فاضلاب به کار گرفته شده‌اند. در فناوری تجمع زیستی از زیست‌توده^۲ زنده برای حذف فلزات استفاده می‌شود. اما در جذب زیستی از زیست‌توده مرده یا غیرفعال برای این منظور استفاده می‌گردد. از این میان جذب زیستی به دلیل اقتصادی‌تر بودن، همچنین حذف در مدت زمان کمتر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، زیست‌توده مرده نه تنها نیازی به مواد مغذی نداشته و نسبت به پارامترهای محیطی حساس نبوده، بلکه قابلیت بازیابی و استفاده مجدد را نیز دارد (۳۳).

تیموری و همکاران (۱۳) مطالعه‌ای را با عنوان بررسی جذب زیستی کروم سمی از محلول آبی توسط گیاه *سر/توفیلیوم دمرسوم* اصلاح‌شده با نمک سدیم کلرید انجام دادند. در این بررسی اثرات پارامترهای مختلف شامل pH، مقدار زیست‌توده، زمان تماس و غلظت اولیه در جذب زیستی کروم (VI) مورد بررسی قرار گرفت. بهترین شرایط برای جذب کروم (VI) در این بررسی در pH برابر با ۲، مقدار جاذب ۱۰ گرم بر لیتر، و زمان تماس ۶۰ دقیقه تعیین گردید. تحت این شرایط، حداکثر ظرفیت جذب *سر/توفیلیوم* اصلاح شده برای کروم ۱۰/۲۰ میلی‌گرم بر گرم بود.

احمدی اسبچین و همکاران (۳) در مطالعه‌ای با عنوان بررسی فرآیند جذب زیستی هم‌زمان دو فلز روی و نیکل به‌وسیله جلبک قهوه‌ای *فوکوس سر/توس*^۳، با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی فروسرخ نشان دادند که گروه‌های کربوکسیل سطحی آلژینات، نقش کلیدی را در جذب یون نیکل و روی توسط دیواره جلبک بر عهده دارند. به‌کارگیری معادله لانگمویر^۴ برای محاسبه میزان جذب یون‌ها به‌وسیله جلبک اثبات کرد که بیشترین میزان جذب نیکل و روی به ترتیب ۰/۷۱ و ۰/۹۵ میلی‌مول بر گرم بوده و زمان ۳۴۰ دقیقه به‌عنوان زمان تعادل در مطالعه سینتیک جذب یون‌ها به‌دست آمد. جوانبخت و همکاران (۱۲) مطالعه‌ای را با عنوان بررسی نقش pH در حذف سرب از محلول‌های آبی توسط قارچ *موکور/بندیکوس* انجام دادند. در این پژوهش از قارچ *موکور/بندیکوس*^۵ مرده و فرآوری شده با هیدروکسید سدیم استفاده گردید که در مقادیر مختلفی از pH

محلول فلزی مورد ارزیابی قرار گرفت. pHهای پایین ظرفیت جذب کمی را برای جذب سرب از خود نشان دادند ولی در pHهای بالاتر از ۳، جذب زیستی افزایش یافت و در pH برابر ۵/۵ به مقدار حداکثر جذب خود رسید و این pH به‌عنوان اسیدیته بهینه انتخاب گردید. برای توصیف هرچه بهتر فرآیند جذب، از مدل سینتیک شبه درجه دو و مدل هم‌دمای لانگمویر استفاده گردید.

منتظررحمتی و همکاران (۲۱) جذب زیستی کادمیم، سرب و نیکل را توسط جلبک‌های قهوه‌ای *سارگاسوم گلاسسنز*^۶، *پادینا آسترالیس*^۷، *نیزمودینیا زاناردینی*^۸ و *کیستوسریا/یندیکا*^۹ که با فرمالدهید، گلوکار آلدهید، پلی اتیلن ایمین، کلرید کلسیم، اسید هیدروکلریک اصلاح شده بودند، مورد بررسی قرار دادند. در میان مدل‌های جذب هم‌دما دو پارامتری، مدل فروندلیچ^{۱۰}، و از میان مدل‌های سه پارامتری جذب، مدل توث^{۱۱}، خان^{۱۲} و رادک-پراسنیتز^{۱۳} به ترتیب برای کادمیم، نیکل و سرب مناسب شناخته شدند.

یوسفی و همکاران (۳۵) مطالعه‌ای را با عنوان بررسی جذب زیستی کادمیم و مس از محلول آبی توسط جلبک دریایی انجام دادند. در این بررسی اثرات پارامترهای مختلف شامل pH، مقدار زیست‌توده، زمان تماس و غلظت اولیه در جذب زیستی یون‌های فلزی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار pH بهینه برای کادمیم و مس به‌ترتیب ۷/۴ و ۶/۴ تعیین شد. در شرایط بهینه، جذب یون فلزی با غلظت اولیه بیش از ۲۵۰ ppm افزایش یافت. نتایج تجربی نیز نشان‌دهنده تأثیر غلظت جلبک بر جذب فلزات بود. هم‌دمای لانگمویر نیز نسبت به فروندلیچ از تطابق بهتری با نتایج آزمایش جذب برخوردار بود.

Kilic و همکاران (۱۵) مطالعه‌ای با عنوان حذف و بازیافت مس (II) از محلول آبی با پودر برگ *ماروبیوم گلوبوسوم*^{۱۴} اصلاح شده با NaOH انجام دادند. در این بررسی اثرات پارامترهای مختلف شامل pH، مقدار زیست‌توده، زمان تماس و غلظت اولیه در جذب مس (II) مورد بررسی قرار گرفت. آن‌ها نشان دادند که در pH بهینه جذب ۵/۵، ظرفیت جذب ۱۶/۲۳ میلی‌گرم بر گرم است و افزایش غلظت فلزی و دما موجب افزایش ظرفیت جذب می‌شود و فرآیند در ۶۰ دقیقه به تعادل می‌رسید. نتایج به‌دست آمده از مطالعات سینتیک و

6- *Sargassum glaucescens*7- *Padina australis*8- *Nizimuddinina zanardini*9- *Cystoseria indica*

10- Freundlich

11- Toth

12- Khan

13- Radke-Prausnitz

14- *Marrubium globosum*

1- Bioaccumulation

2- Biomass

3- *Fucus serratus*

4- Langmuir

5- *Mucor indicus*

فلزات سنگین و مکانیزم آن‌ها توسط گیاه مرده ماکروفیتس^۵ انجام دادند. در این مطالعه از سه گونه این گیاه در حذف هم‌زمان فلزات کادمیم، نیکل، روی و سرب استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که حذف سرب و کادمیم بیشتر از دیگر فلزها بوده است. همچنین از دو هم‌دمای لانگمویر و فروندلیچ که در این بررسی مورد استفاده قرار گرفت، هم‌دمای لانگمویر تنها برای کادمیم و نیکل و هم‌دمای فروندلیچ برای تمام فلزها مطابقت داشت. همچنین فرآیند جذب از معادله سینتیک شبه اول بیشتر از دیگر معادلات پیروی می‌نمود. علاوه بر این تفاوت چندانی در حذف هم‌زمان و تکی فلزات با استفاده از این گیاه دیده نشد.

هدف اصلی این پژوهش، تعیین قابلیت جذب و نگهداری فلز سنگین کادمیم توسط زیست توده اصلاح شده *سرآتوفیلیوم دمرسوم* بود. که در راستای آن تأثیر pH، زمان تماس، مقدار جاذب، غلظت اولیه‌ی ماده‌ی جذب‌شونده (کادمیم) بر میزان جذب، تعیین راندمان حذف و ظرفیت جذب در هر مرحله، بررسی مدل‌های سینتیک^۶ جذب زیستی و بررسی مدل‌های هم‌دمای جذب زیستی نیز انجام شده است.

مواد و روش‌ها

با توجه به هدف تحقیق حاضر که ذکر شد، یکی از مواد مورد نیاز *سرآتوفیلیوم دمرسوم* یا چنگال آبی بود که گیاهی است زیرآبی و معمولاً در محیط‌های آبی با جریان آرام حاوی مقادیر متوسط یا بالای مواد مغذی دیده می‌شود (۱۳). یکی از محیط‌های مناسب برای رشد گیاه *سرآتوفیلیوم دمرسوم* کانال‌های آبرسانی با عمق کم و جریان آرام می‌باشد. به این منظور جستجو بر روی کانال‌های آبیاری درون دانشگاه شهید چمران اهواز صورت گرفت و مقادیر زیادی از این گیاه در بسیاری از نقاط این کانال‌ها مشاهده گردید. جمع‌آوری گیاه از ابتدای کانال ورودی آب رودخانه کارون به دانشگاه انجام شد. پس از جمع‌آوری، گیاه و شست‌وشو آن با آب شهری و آب مقطر و خشک کردن آن در هوای آزاد و دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، زیست‌توده خشک شده را با استفاده از آسیاب کاملاً خرد کرده تا به‌صورت پودر درآید و از الک شماره ۵۰ استاندارد عبور داده شد (۳۳). در این پژوهش برای اصلاح زیست توده از محلول‌های قلیایی (محلول ۰/۵ مولار NaOH) استفاده گردید (۳۳). این روش در پژوهش‌های انجام شده مشابه، اثر بخشی خوبی داشته و توان جذب جاذب را به میزان زیادی افزایش داده است. تهیه محلول ذخیره کادمیم بر مبنای روش‌های ارائه شده در مرجع استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب صورت پذیرفت (۳۳).

هم‌دمای جذب نیز مدل‌های سینتیک شبه درجه دوم و هم‌دمای لانگمویر را مناسب‌تر نشان داد.

ساری و همکاران (۲۸) مطالعه‌ای را با عنوان جذب زیستی کادمیم (II) و کروم (III) از محلول آبی توسط خزّه *هایلوکمیوم اسپلندس*^۱ انجام دادند و شرایط مطلوب جذب زیستی را به‌صورت تابعی از pH، مقدار زیست‌توده، زمان تماس و دما تعیین کردند. مدل‌های مختلفی برای تشریح هم‌دمای جذب زیستی یون‌های فلزی توسط این خزّه به‌کار برده شد که مدل لانگمویر بهترین مدل تشخیص داده شد. ظرفیت جذب زیستی حداکثر (q_{max}) برای کادمیم ۳۲/۵ و برای کروم ۴۲/۱ میلی‌گرم بر گرم محاسبه شدند. مقادیر انرژی آزاد که از مدل دوبینین-رادشکوویچ^۲ برآورد شدند، بیان کردند که فرآیندهای جذب زیستی هر دو یون فلزی مطابق مدل شبه درجه دوم می‌باشد.

ساری و توزن (۲۹) مطالعه‌ای را با عنوان جذب زیستی کروم کل از محلول‌های آبی با استفاده از جلبک قرمز *سرآمیوم ویرگاتوم*^۳ انجام دادند و عوامل مؤثر بر فرآیند جذب زیستی نظیر pH، مقدار زیست‌توده، زمان تماس و دما را مورد بررسی قرار دادند. مدل‌های لانگمویر، فروندلیچ و دوبینین-رادشکوویچ برای تشریح هم‌دمای جذب زیستی به‌کار گرفته شد. مدل لانگمویر با نتایج آزمایش بیش از دیگر مدل‌ها مطابقت داشت. ظرفیت جذب برای کل کروم ۲۶/۵ میلی‌گرم بر گرم در pH ۱/۵ و مقدار زیست‌توده ۱۰ گرم بر لیتر، زمان تعادل ۹۰ دقیقه و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد. متوسط انرژی آزاد ۹/۷ کیلوژول بر مول با مدل دوبینین-رادشکوویچ به‌دست آمد و مدل سینتیک شبه درجه دوم تطابق بیشتری با نتایج آزمایش‌ها داشت. کشینکان و همکاران (۱۴) مطالعه‌ای را با عنوان مقایسه قابلیت جذب فلزات سنگین سرب، روی و مس دو گیاه *مایروفیلوم اسپیکاتوم*^۴ (پرطاووسی سنبله‌ای) و *سرآتوفیلیوم دمرسوم* (چنگال آبی) انجام دادند. حداکثر ظرفیت‌های جذب (q_{max}) برای هر دو گونه‌های گیاهی و هر فلز به‌دست آمد. حداکثر ظرفیت‌های جذب (q_{max}) به‌دست آمده با مایروفیلوم برابر ۱۰/۳۷ برای سرب، و ۱۵/۵۹ برای مس و همچنین ۴۶/۴۹ میلی‌گرم بر گرم برای روی و با گونه *سرآتوفیلیوم دمرسوم* ۶/۱۷ برای سرب، ۱۳/۹۸ برای مس و ۴۴/۸ میلی‌گرم بر گرم برای روی بود. یافته‌ها حاکی از آن بود که ظرفیت جذب *اسپیکاتوم* برای هر فلز مورد آزمایش بهتر از *سرآتوفیلیوم دمرسوم* است.

Miretzky و همکاران (۲۰) مطالعه‌ای با عنوان حذف هم‌زمان

- 1- *Hylocomium splendens*
- 2- Dubinin- Radushkevich
- 3- *Ceramium virgatum*
- 4- *Myriophyllum spicatum*

5- Macrophytes
6- Kinetic Models

جدول ۱- معادلات غیرتعادلی یا سینتیک مورد استفاده در تحقیق حاضر (۳۲)

Table 1- Kinetic equations in current study (32)

نام معادله	فرمول
Equation's name	Formula
شبه درجه اول Pseudo first order	$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad q_t = \frac{C_0 - C_t}{m} \cdot V$
شبه درجه دوم Pseudo second order	$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{1 + K_2 q_e t}$

جدول ۲- معادلات جذب هم دما مورد استفاده در تحقیق حاضر (۳۲، ۲ و ۵)

Table 2- Isotherm Models in current study (32, 2, 5)

نام معادله	فرمول	نام معادله	فرمول
Equation's name	Formula	Equation's name	Formula
لانگمویر (Langmuir)	$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e}$	تمکین (Temkin)	$q_e = q_m \ln(K_T C_e)$
فروندلیچ (Freundlic)	$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$	دوبینین - رادشکوویچ (Dubinin - Radushkevich)	$q_e = q_m \exp(-D E^2)$

جذب (mg/g)، $1/n$ شدت جذب، K_T ثابت تجربی تمکین، E در این معادله پتانسیل پلانی و D انرژی فعال سازی می باشند.

نتایج و بحث

تعیین مشخصات سطحی سراتوفیلیوم دمرسوم

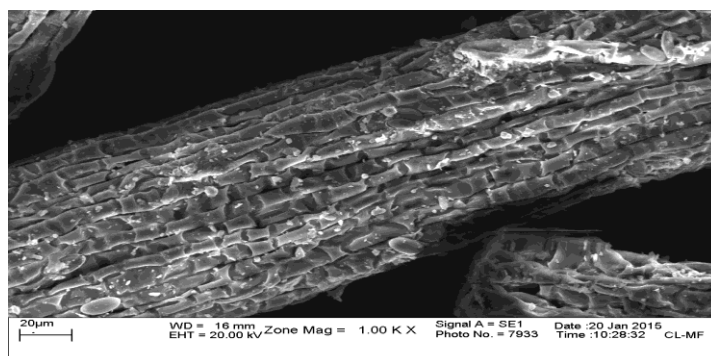
میکروسکوپ الکترونی رومیشی (SEM) اطلاعاتی از جمله توپوگرافی نمونه شامل خصوصیات سطح؛ مورفولوژی شامل شکل، اندازه و نحوه قرارگیری ذرات در سطح جسم نمونه را در اختیار می گذارد. از زیست توده در سه مرحله مختلف یعنی به صورت خام (قبل از اصلاح)، پس از اصلاح و در نهایت پس از فرآیند جذب، در بزرگ نمایی های مختلف توسط دستگاه SEM عکس برداری شد. در ابتدا نمونه ها با استفاده از دستگاه پوشش دهی^۱ با روکش طلا پوشیده شده و سپس عکس برداری صورت گرفت. شکل های ۱ تا ۳، عکس های نمونه سراتوفیلیوم دمرسوم را با بزرگ نمایی مختلف در هر سه مرحله نشان می دهد.

همان طور که در تصاویر قابل مشاهده است، گیاه سراتوفیلیوم قبل از اصلاح (شکل ۱)، دارای ساختار سطحی صاف و یکنواخت و خلل و فرج هایی با آرایشی نسبتاً منظم است. آرایش حفره ها و خلل و فرج های روی سطح به صورت ردیف های منظم عمودی و افقی بوده و چیدمانی آجرمانند دارد.

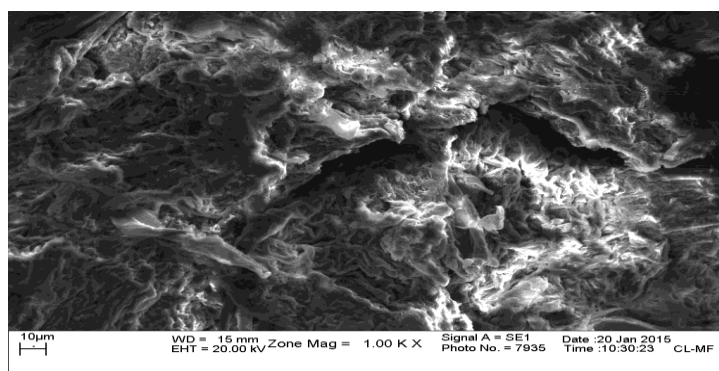
یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی معادلات غیرتعادلی یا سینتیک و معادله های هم دمای جذب یا ایزوترم بوده که در ادامه این روابط بررسی می شوند. معادلات غیرتعادلی معادله هایی هستند که قبل از ایجاد تعادل به کار می روند و پارامتر زمان در آن ها نقش عمده ای ایفا می کند. در این حالت تغییرات ماده جذب شده (q_t) با زمان نشان داده می شود (۲۲). پرکاربردترین انواع سینتیک های جذب معادله شبه درجه اول و شبه درجه دوم می باشد که در جدول ۱ ارائه شده اند.

در معادلات جدول فوق k_1 ثابت سرعت واکنش درجه اول ($1/\text{min}$) و q_e و q_t به ترتیب ظرفیت جذب در حالت تعادل و ظرفیت جذب در زمان t (mg/g)، C_0 غلظت اولیه و C_t غلظت محلول در زمان t (mg/L)، m وزن جاذب (g) و V حجم محلول (L)، K_2 ، ثابت سرعت درجه دوم جذب (g/mg min) و h از ثابت های سینتیک درجه دوم می باشند. معادله جذب هم دما یا ایزوترم در حقیقت نوعی توضیح ریاضی جهت تعیین درجه جذب تا رسیدن به نقاط تعادل و چگونگی وابستگی ماده مورد جذب و جاذب در یک دمای ثابت می باشد. بر اساس این تعریف معادلات تجربی و نظری مختلفی برای تشریح فرآیند جذب ارائه گردیده است که در پژوهش حاضر معادلات لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوبینین - رادشکوویچ مورد بررسی قرار گرفتند. جدول ۲ معادلات مذکور را نشان می دهد و در ادامه آن پارامترها معرفی می گردند.

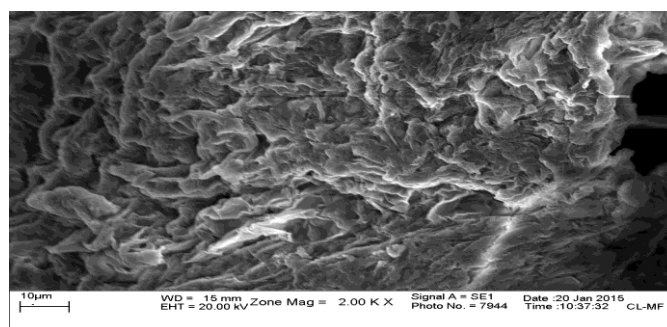
در معادله های جدول ۲، q_e جرم ماده جذب شده به ازای واحد جرم جاذب و q_m میزان یون لازم برای تشکیل لایه منفرد روی جاذب (mg/g)، K_L ثابت تجربی معادله لانگمویر و C_e غلظت تعادلی ماده جذب شونده در محلول بعد از برقراری تعادل (mg/L)، K_f ظرفیت



شکل ۱- تصویر سرتوفیلیوم دمرسوم قبل از اصلاح توسط دستگاه SEM، با بزرگ نمایی ۱۰۰۰ برابر
Figure 1- The image of *Ceratophyllum demersum* before modified by SEM, 1000 times magnification



شکل ۲- تصویر سرتوفیلیوم دمرسوم اصلاح شده با محلول 0.5 M NaOH توسط دستگاه SEM، با بزرگ نمایی ۱۰۰۰ برابر
Figure 2- The image of modified *Ceratophyllum demersum* by SEM, 1000 times magnification



شکل ۳- تصویر سرتوفیلیوم دمرسوم اصلاح شده پس از جذب کادمیم توسط دستگاه SEM، با بزرگ نمایی ۲۰۰۰ برابر
Figure 3- The image of modified *Ceratophyllum demersum* after absorption Cadmium by SEM, 2000 times magnification

جدید، سطح مخصوص ذرات روی سطح نیز افزایش یافته است. به این معنا که حفره‌های جدید فضای بیشتری را برای جذب یون‌های فلزی فراهم کرده تا در رقابتی کمتر و آسان‌تر بتوانند بر روی سطح جاذب بچسبند. با توجه به توضیحات گفته شده می‌توان گفت که اصلاح جلبک سرتوفیلیوم دمرسوم با محلول NaOH، سبب تغییر قابل توجهی بر مورفولوژی سطحی آن گردیده و در مجموع موجب افزایش میزان جذب گیاه شده است.

پس از اصلاح، همان‌گونه که در شکل ۲ قابل مشاهده است، ساختار مورفولوژی سطحی سرتوفیلیوم دمرسوم کاملاً تغییر کرده است. آرایش ذرات روی سطح به صورت کاملاً نامنظم و درهم‌تنیده درآمده و ساختار جدید از حالت دو بعدی سطحی خارج شده و با پیدایش اختلاف ارتفاع‌های فراوان بر روی سطح و شکستگی‌های جدید، سبب تشکیل حفره‌ها و خلل و فرج‌های بیشتری بر روی سطح شده است. به این ترتیب با پیدایش این حفره‌ها و خلل و فرج‌های

جدول ۳- اثر pH محلول بر جذب فلز کادمیم (غلظت اولیه کادمیم ۷/۵۶ میلی گرم بر لیتر)

Table 3- The effect of pH on absorption of Cadmium (initial concentration of Cadmium= 7.56 mg/lit)			
pH	غلظت باقیمانده	راندمان حذف	ظرفیت جذب
	The remaining concentration (mg/L)	The removal efficiency (%)	Adsorption capacity (mg/g)
3	0.52	93.17	7.04
4	0.38	95.01	7.18
5	0.32	95.73	7.24
6	0.31	95.95	7.25
7	0.21	97.28	7.35
8	1.12	85.22	6.44

جذب در این pH به ترتیب برابر ۹۷/۲۸ و ۷/۳۵ میلی گرم بر گرم به دست آمد. این تغییرات در راندمان حذف می تواند به این دلیل باشد که چون یون کادمیم دوظرفیتی می باشد، برای جذب نیاز به تعویض با یک یون دو ظرفیتی یا جانشین شدن با دو یون تک ظرفیتی است که روی دو سایت مجاور هستند و اگر این دو سایت، از هم فاصله داشته باشند امکان این جانشینی وجود ندارد. به عبارت بهتر در pH های پایین، برخی از سایت های پیوندی، در دسترس یون های فلزی نیستند. از طرفی در pH های پایین، یون های H_3O^+ موجود در محیط، رقیبی برای کاتیون های موجود در محلول، برای اشغال سایت های پیوندی به حساب می آیند. بنابراین با افزایش pH، جذب نیز افزایش می یابد، که می توان گفت در این محدوده (نزدیک به خنثی) اکثر فلزات به صورت کاتیون های محلول و آزاد برای جذب در دسترس قرار دارند (۲۶). مطالعه ای دیگر توسط پاکانانی و همکاران (۲۴) بر روی تأثیر pH بر روی جذب فلزات سنگین، روند افزایش جذب فلز با افزایش pH را نشان داده است. نتیجه مطالعه، این روند افزایشی را نه تنها به علت جذب رقابتی یون های H^+ در pH های کم معرفی کرده، بلکه آن را حاصل خاصیت اسیدی ضعیف مکان های فعال بر روی سطح جذب می داند، که با افزایش pH عمل پروتون زدایی^۱ انجام داده که سبب بهبود جذب فلزات می شود.

از طرفی در بیشتر مطالعات انجام شده بر روی جذب کاتیون های فلزات سنگین با جاذب های مختلف نشان داده است که راندمان حذف از pH ۶ تا ۲/۵ کاهش می یابد (۲۰). به عبارت دیگر در پژوهش حاضر، افزایش راندمان حذف با افزایش pH از سه تا هفت را می توان ناشی از دو عامل دانست: (۱) در pH های کم، مقادیر یون H^+ موجود در محلول که برای جذب سطحی با یون مثبت کادمیم رقابت می کند به اندازه کافی وجود دارند، (۲) برای هر یون فلزی قابل هیدرولیز، یک دامنه pH بحرانی، جایی که راندمان جذب فلز از مقداری کم به یک مقدار حداکثر می رسد، وجود دارد. به این مقدار آستانه جذب سطحی گفته می شود. هم چنین کاهش در جذب یون های کادمیم در pH های بالاتر از هفت احتمالاً به دلیل شکل گیری مجموعه های هیدروکسیلی

شکل ۳ نشان دهنده ی ذرات سر/توفیلیوم پس از عمل جذب کادمیم است، همان گونه که پیداست ساختار روی سطح جاذب تغییر چندانی نسبت به شکل ۲ نداشته است. تنها تفاوت قابل توجه تغییر رنگ بیشتر قسمت های روی سطح جاذب است که از رنگ تیره به رنگ سفید و روشن تبدیل شده است که می تواند نشان دهنده ی پوشیده شدن سطح جاذب با ذرات کادمیم باشد. همان طور که قابل مشاهده است تمامی قسمت های روی سطح جاذب در مقایسه با شکل ۲، تغییر رنگ داده است که نشان دهنده ی جذب بسیار مطلوب جاذب می باشد. بنابراین با توجه به تصاویر فوق می توان پذیرفت که محلول NaOH به خوبی ساختار مورفولوژی سطحی سر/توفیلیوم را تغییر داده و با ایجاد خلل و فرج های جدید و افزایش سطح مخصوص، موجب افزایش ظرفیت جذب سر/توفیلیوم دمرسوم شده است.

تعیین اثر pH محلول بر جذب زیستی کادمیم

pH محیط در فرایند جذب تأثیر زیادی دارد. بخشی از این تأثیر مربوط به جذب یون های هیدروژن است که به عنوان رقیب در جذب سطحی کاتیون ها دیده می شود. تحقیقات انجام شده توسط شاه محمدی حیدری (۳۰) نشان می دهد که pH بهینه برای جذب کادمیم بین ۴ تا ۸ متغیر است. هم چنین با توجه به پژوهش های انجام شده توسط تیموری و همکاران (۳۳)، داس و همکاران (۸) و یان و ویراراگوان (۳۴) در این زمینه، محدوده pH مورد بررسی بین سه تا هشت انتخاب و آزمایش های جذب انجام شده است.

جدول ۳ تغییرات غلظت باقی مانده، ظرفیت جذب و راندمان حذف فلز کادمیم در pH های مختلف در زمان تماس ۶۰ دقیقه و میزان جاذب یک گرم بر لیتر، برای غلظت ده میلی گرم بر لیتر محلول کادمیم را نشان می دهد.

بر اساس جدول ۳، با افزایش pH، راندمان حذف کادمیم به میزان بسیار کمی (حدود سه درصد) افزایش یافته و در pH هفت به بیشترین مقدار خود رسیده است. اما در pH هشت راندمان حذف به یکباره با کاهش ۱۲ درصدی مواجه شد. بنابراین pH هفت یا حالت خنثی به عنوان pH بهینه در نظر گرفته شد. راندمان حذف و ظرفیت

قابل حل است (۳۰).

همچنین در pH های پایین، سطح جاذب زیستی دارای بار مثبت بوده بنابراین به دلیل دفع الکترواستاتیکی جذب زیستی، کاتیون های کادمیم بر سطح جاذب کم است. علاوه بر این در چنین pH اسیدی، رقابت زیادی میان کاتیون های H^+ و $Cd(II)$ برای مکان های جذب وجود دارد. با افزایش pH بار سطحی جاذب زیستی نیز به طرف منفی شدن پیش می رود. از طرف دیگر کاهش راندمان حذف در مقادیر بالای هفت می تواند به دلیل ترکیبات آنیونی $Cd(II)$ باشد که جذب زیستی آن را کاهش می دهد (۳۲).

در مطالعه دیگر، راموس و همکاران (۲۷) گزارش دادند که کادمیم در pH بالاتر از هشت به صورت $Cd(OH)_2$ و در pH های کمتر از هشت به صورت $Cd(OH)^+$ در محلول می باشد و بالاترین میزان جذب در محدوده pH پنج تا هشت صورت می گیرد. به عبارتی در pH های پایین تر از هشت یون های $Cd(OH)^+$ که به صورت ناپایدار می باشند تمایل بیشتری برای جذب از خود نشان می دهند. با توجه به نتایج به دست آمده در آزمایش، می توان پذیرفت که تغییرات pH در بازه سه تا شش موجب افزایش بسیار ملایمی در راندمان حذف شده است، به گونه ای که می توان این چنین نتیجه گرفت که تغییرات pH در محدوده اسیدی موجب افزایش جزیی در راندمان حذف شده است و هرچقدر که pH به حالت خنثی نزدیک تر می شود، راندمان حذف به میزان بسیار اندکی افزایش یافته تا در pH هفت به حداکثر مقدار خود برسد. این افزایش هم چنین برای ظرفیت جذب نیز صادق بوده و حداکثر ظرفیت جذب کادمیم در pH هفت مشاهده شد. اما به محض قلیایی شدن محلول مشاهده شد که از راندمان حذف به میزان ۱۲ درصد کاسته شد. نتایج حاصل از این قسمت از پژوهش با یافته های به دست آمده توسط شاه محمدی (۳۰)، تیموری (۳۲) و میرترکی و همکاران (۲۰) مطابقت دارد.

تعیین اثر زمان تماس بر جذب زیستی کادمیم

جدول ۴ تغییرات غلظت باقی مانده، ظرفیت جذب و راندمان حذف

جدول ۴- اثر زمان تماس بر جذب زیستی فلز کادمیم (غلظت اولیه کادمیم ۹/۲۵ میلی گرم بر لیتر)

Table 4- The effect of contact time on biosorption of Cadmium (initial concentration of Cadmium= 9.25 mg/lit)

زمان تماس	غلظت باقیمانده	راندمان حذف	ظرفیت جذب
Contact time (min)	The remaining concentration (mg/L)	The removal efficiency (%)	Adsorption capacity (mg/g)
5	2.99	67.63	6.26
10	2.40	74.06	6.85
20	1.14	87.64	8.11
40	0.50	94.59	8.75
60	0.35	96.16	8.90
90	0.20	97.81	9.05
120	0.16	98.31	9.09
180	0.12	98.71	9.13
240	0.14	98.46	9.11

فلز کادمیم در زمان های تماس مختلف و pH برابر هفت و مقدار جاذب یک گرم بر لیتر را برای غلظت ورودی ده میلی گرم بر لیتر را نشان می دهد.

بر اساس جدول ۴ تغییرات راندمان حذف و ظرفیت جذب را می توان به این گونه تفسیر نمود. با افزایش زمان تماس، راندمان حذف کادمیم به یکباره و با سرعت زیادی افزایش یافته است. به گونه ای که در زمان پنج دقیقه، راندمان حذف برابر ۶۷/۶۳٪ بود. این افزایش سریع تا زمان ۴۰ دقیقه ادامه یافت. در این زمان راندمان حذف به ۹۴/۵۹ رسید. پس از زمان ۴۰ دقیقه از سرعت افزایش حذف کاسته شده و این روند با سرعت کمتری تا زمان ۱۸۰ دقیقه ادامه یافت. در این زمان بیشترین راندمان حذف یعنی ۹۸/۷۱٪ اتفاق افتاد و پس از آن در زمان ۲۴۰ دقیقه راندمان حذف با اندکی کاهش مواجه شد که آزمایش در همین زمان متوقف گردید. برای به دست آوردن زمان تعادل، یعنی نقطه ای که میزان تغییرات جذب در آن زمان شیب بسیار ملایمی می یابد، بین سه زمان ۴۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه، که از سرعت تغییرات راندمان حذف به شدت کاسته می شود، با توجه به نتایج زمان تماس ۶۰ دقیقه را به عنوان زمان تعادل در نظر گرفته شد.

از طرفی بین زمان ۶۰ و ۹۰ دقیقه اختلاف ۳۰ دقیقه ای از نظر زمانی وجود دارد، و با توجه به این که زمان تماس بیشتر به معنی انرژی مصرف شده بیشتر می باشد و تحمیل هزینه ی بیشتر به سیستم تصفیه می باشد، لذا بین دو زمان تماس ۶۰ و ۹۰، زمان ۶۰ دقیقه که از نظر اقتصادی منطقی تر به نظر می رسد، تعیین شد. راندمان حذف و ظرفیت جذب در این زمان به ترتیب برابر ۹۶/۱۶ درصد و ۸/۸۹ میلی گرم بر گرم به دست آمد. نتایج به دست آمده از پژوهش با مطالعه صورت گرفته توسط تیموری (۳۳)، شاه محمدی (۳۰) و منظور و همکاران (۱۸) مطابقت دارد. اکثر پژوهشگرانی که بر روی جاذب های زیستی گیاهی مطالعه کرده اند، به میزان بالای جذب در ۱۰ دقیقه ابتدایی فرایند به علت اشغال سریع مکان های سطحی جاذب اشاره کرده اند.

جدول ۵- اثر مقدار جاذب بر جذب فلز کادمیم

Table 5- The effect of amount of adsorbent on biosorption of Cadmium

مقدار جاذب The dose of biosorbent (g/L)	غلظت اولیه Initial concentration (mg/L)	غلظت باقیمانده The remaining concentration (mg/L)	راندمان حذف The removal efficiency (%)	ظرفیت جذب Adsorption capacity (mg/g)
0.02	9.01	5.62	37.62	169.50
0.05	9.01	5.31	41.06	74.00
0.1	9.50	2.1	77.89	74.00
0.2	9.50	1.95	79.49	37.76
0.4	9.50	1.50	84.29	20.02
1	9.50	0.32	96.67	9.18
2	9.50	0.20	97.85	4.65
4	9.50	0.06	99.34	2.36

مقادیر بیشتر از جاذب باشد. همچنین میزان بالای ظرفیت جذب در مقادیر اولیه و کم از جاذب را می‌توان به افزایش مساحت روی سطح جاذب و فراهم بودن مکان‌های جذب بیشتر نسبت داد. نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج به‌دست آمده از مطالعات تیموری (۳۲)، شاه‌محمدی (۳۰)، منظور و همکاران (۱۸) و آرگون و همکاران (۴) مطابقت دارد.

تعیین اثر غلظت اولیه فلز بر جذب فلز کادمیم

جدول ۶ تغییرات غلظت باقی‌مانده، ظرفیت جذب و راندمان حذف فلز کادمیم در غلظت‌های اولیه مختلف فلز در pH برابر هفت و زمان تماس ۶۰ دقیقه و مقدار جاذب برابر یک گرم بر لیتر را نشان می‌دهد. در این مرحله به ازای همه‌ی غلظت‌های محلول کادمیم، یک نمونه شاهد تهیه شده و برای دقت بیشتر در مطالعه، محاسبات بعدی با استفاده از نتایج نمونه‌های شاهد انجام گرفت.

با افزایش غلظت اولیه کادمیم، راندمان حذف با یک روند ملایم کاهش یافت، به‌طوری‌که راندمان حذف از ۹۶/۶۷٪ در غلظت ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، به ۳۱/۷۵٪ در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم بر لیتر رسید. در مقابل با افزایش میزان غلظت اولیه کادمیم، مقدار ظرفیت جذب افزایش یافت که بیشترین مقدار آن در غلظت ۲۰۰ گرم بر لیتر کادمیم برابر ۵۹/۷ میلی‌گرم بر گرم است (جدول ۶).

این روند به این دلیل است که در غلظت‌های بیشتر از محلول آبی کادمیم، تعداد مول‌های فلز کادمیم که برای جذب بر روی سطح موجود می‌باشند بالا بوده و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که جذب عملی به‌شدت به غلظت اولیه فلز وابسته است، همچنین مشخصه‌های جذبی نیز نشان می‌دهند که اشباع سطح جاذب نیز به غلظت اولیه فلز در محلول وابسته است. در واقع می‌توان گفت که غلظت اولیه محلول، یک نیروی محرک مهم برای غلبه بر همه‌ی نیروهای مقاوم بر تبادل یون‌های فلزی بین فاز محلول (محیط آبی) و جامد (سطح جاذب) می‌باشد (۱۸).

درصد بالای حذف فلزات سنگین در آغاز فرایند به‌علت سطح وسیع جاذب، برای جذب یون‌های فلزی می‌باشد. همچنین، این مکانیزم دو مرحله‌ای جذب، یعنی مرحله سریع و قابل توجه نخست و سپس مرحله کند و ناچیز جذب، در مقالات و مطالعات متعددی که بر روی جاذب‌های زیستی گیاهی صورت گرفته شده، مشاهده و گزارش شده است (۱۸).

تعیین اثر مقدار جاذب بر جذب فلز کادمیم

جدول ۵ تغییرات غلظت باقی مانده، ظرفیت جذب و راندمان حذف فلز کادمیم را، در مقادیر مختلف جاذب در pH بهینه (هفت) و زمان تماس تعادل (۶۰ دقیقه) برای غلظت ورودی ده میلی‌گرم بر لیتر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان جاذب در هر مرحله نسبت به مرحله قبل تقریباً دو برابر شده است.

براساس داده‌های جدول ۵ با افزایش مقدار جاذب راندمان حذف کادمیم در مرحله ابتدایی تغییر کمی نموده و افزایش ۳٪ داشته است ولی در مرحله بعد و به ازای میزان جاذب ۰/۱ گرم بر لیتر، راندمان حذف به یکباره به میزان ۳۷٪ افزایش یافته است. از این مرحله به بعد صعود مقادیر و میزان تغییرات راندمان حذف کم شده و به ازای مقادیر بعدی جاذب، راندمان حذف به ترتیب به میزان ۱/۶٪ و ۴/۸٪ افزایش یافته است. در مرحله‌ی بعد و به ازای میزان جاذب یک گرم بر لیتر، مجدداً راندمان حذف با افزایش ۱۲/۳۸٪ مواجه شده است و به عدد ۹۶/۶۷٪ رسیده است. از این پس و به‌ازای مقادیر دو و چهارگرم بر لیتر میزان تغییرات ناچیز بوده و در نهایت بیشترین درصد جذب در مقدار چهار گرم بر لیتر و برابر ۹۹/۳۴٪ محاسبه گردید.

با بررسی مطالعات صورت گرفته بر روی جاذب‌های زیستی مختلف و نحوه تغییرات میزان جذب، این رفتار می‌تواند ناشی از فراهم بودن مکان‌های جذب^۱ بیشتر برای غلظت‌های پایین جاذب و روی هم قرار گرفتن و تجمع مکان‌های جذب در کنار هم برای

1- Adsorption Site

جدول ۶- اثر غلظت اولیه فلز بر جذب فلز کادمیم

Table 6- The effect of initial metal concentration on biosorption of Cadmium

غلظت اولیه کادمیم Cadmium initial concentration (mg/L)	غلظت اولیه (شاهد) Initial concentration (mg/L)	غلظت باقیمانده The remaining concentration (mg/L)	راندمان حذف The removal efficiency (%)	ظرفیت جذب Adsorption capacity (mg/g)
10	9.50	0.32	96.67	9.18
20	18.58	1.59	91.45	16.99
40	38.42	6.06	84.21	32.36
60	58.33	13.84	76.27	44.49
80	77.76	28.94	62.78	48.82
100	92.90	43.08	53.63	49.820
200	188.00	128.30	31.75	59.70

جدول ۷- شرایط بهینه تعیین شده برای حذف فلز کادمیم توسط سراتوفیلیوم اصلاح شده

 Table 7- Optimum condition for removal Cadmium by modified *Ceratophyllum demersum*

متغیر Parameter	مقدار بهینه Optimal concentration (mg/L)
pH	7
زمان تماس Contact time (min)	60
مقدار جاذب The dose of biosorbent (g/L)	1
غلظت کادمیم Cadmium concentration (mg/L)	10

لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوینین-رادشکوویچ برای فلز کادمیم نشان داده شده است. در این مرحله بر اساس نتایج بهینه به دست آمده از مراحل قبل، میزان مطابقت داده های آزمایشگاهی با همدمای لانگمویر، فروندلیچ، تمکین و دوینین رادشکوویچ فلز کادمیم بررسی شده است.

مدل همدمای لانگمویر در مواد غیرمتخلخل به ندرت دیده می شود و برای ترکیباتی که دارای حفره های بسیار ریزی هستند (کمتر از ۲ nm)، مناسب است. همدمای لانگمویر در واقع جذب سطوح کاملاً همگن با فعل و انفعالات ناچیز بین مولکول های جذب شده را بیان می کند (۲). در واقع مدل لانگمویر نشان دهنده ی جذب تک لایه ای جاذب می باشد که در آن مولکول های جذب شده هیچ گونه واکنش و فعل و انفعالی با یکدیگر ندارند (۳۳).

همان گونه که در جدول ۸ قابل مشاهده است، R^2 یا ضریب تعیین برابر ۰/۹۹ می باشد که نشان می دهد جذب کادمیم بر روی سراتوفیلیوم اصلاح شده به خوبی و با دقت بالایی از مدل همدمای لانگمویر تبعیت می کند. هم چنین پارامترهای $q_{max} = ۶۱/۳۴$ و $K_L = ۰/۱۹$ و $R_L = ۰/۲۷ - ۰/۳۵۸$ به دست آمد.

این روند افزایش در درصد حذف و کاهش در ظرفیت جذب وابسته به غلظت اولیه محلول در مطالعات جذب دیگر مانند تیموری (۳۲)، میرتزکی و سیرلی (۱۹)، منظور و همکاران (۱۸) و آرگون و همکاران (۴) مشاهده شده است. باتوجه به نتایج به دست آمده غلظت ۱۰ میلی گرم بر لیتر، به عنوان غلظت مناسب برای کادمیم در نظر گرفته شد، زیرا در این غلظت راندمان جذب ۹۶/۶۷٪ می باشد و ظرفیت جذب کادمیم نیز برابر ۹/۱۸۴۲ میلی گرم بر گرم است که مقدار قابل قبولی می باشد. در جدول ۷ مقادیر بهینه ی به دست آمده از متغیرهای بررسی شده در طول آزمایش نشان داده شده است.

همدمای جذب

داده های حاصل از همدمای جذب زیستی، درک هرچه بهتر خصوصیات و ویژگی های سطحی جاذب، ظرفیت آن برای جذب فلزات سنگین و همچنین مکانیزم جذب زیستی را ممکن می سازد (۳۳). در این پژوهش، برای همدمای فلز کادمیم از pH برابر با هفت، زمان تماس ۶۰ دقیقه، مقدار جاذب یک گرم و غلظت های اولیه ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی گرم در لیتر استفاده شده است. در جدول ۸ نتایج و داده های به دست آمده از چهار همدمای

جدول ۸- پارامترها و معادلات مربوط به همدمای جذب فلز کادمیم

Table 8- The parameter and equations of isotherm adsorption models of Cadmium

Table 6: The parameter and equations of isotherm adsorption models of Cadmium													
	لانگمویر (Langmuir)		فروندلیچ (Freundlic)		تمکین (Temkin)		دوبینین - رادشکوویچ (Dubinin – Radushkevich)						
پارامتر (Parameter)	q_{max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2	n	K_f (mg/g)	R^2	q_m (mg/g)	k_t (L/mg)	R^2	q_m (mg/g)	D mol^2/kj^{-2}	E Kj/mol	R^2
مقدار (Amount)	61.34	0.19	0.99	3.08	15.31	0.95	8.93	6.93	0.98	41	10^{-7}	2.23	0.73
معادله (Equation)	$C_e / q_e = 0.0163(C_e) + 0.0866$		$Lnq_e = 0.3249(LnC_e) + 2.7285$			$q_e = 8.9268(LnC_e) + 17.287$			$Lnq_e = -1E - 07(\varepsilon^2) + 3.7138$				

کادمیم) می‌باشد. در این مطالعه همدمای لانگمویر نسبت به دیگر همدمای از ضریب تعیین بالاتری برخوردار بود و به همین دلیل تطابق بیشتری با داده‌های آزمایش داشت ($R^2=0.99$)، هم‌چنین حداکثر میزان جذب کادمیم که توسط این مدل به دست آمد برابر 61.34 میلی‌گرم بر گرم بود که نسبت به دیگر مدل‌ها به عدد به دست آمده از آزمایش‌ها نزدیک‌تر بود. این تطابق بهتر نشان‌دهنده‌ی آن است که جذب زیستی تک لایه است. مطالعات پیشین نشان می‌دهند که تقریباً در همه‌ی موارد مربوط به همدمای دو پارامتری جذب زیستی، مدل لانگمویر برازش بهتری داشته است (۲۶). نتایج حاصل از بررسی همدمای با نتایج مطالعات ما و تبیین (۱۷)، کشینکان و همکاران (۱۳ و ۱۴)، پاگانلی و همکاران (۲۴)، منظور و همکاران (۱۸)، ربانی و همکاران (۲۶) و تیموری (۳۲) که بررسی جذب زیستی با استفاده از جاذب‌های گیاهی انجام شده است، مطابقت دارد.

سینتیک‌های واکنش

برای درک دینامیک واکنش‌های جذب می‌توان اطلاعات حاصله از سینتیک جذب را مورد بررسی قرار داد. در واقع سینتیک جذب، سرعت حذف ماده حل شده است که زمان ماند آن را در هم‌کنش گاه جامد- محلول کنترل می‌کند.

سینتیک درجه اول یکی از شناخته‌شده‌ترین مدل‌های سینتیک جهت توصیف سرعت جذب بر اساس ظرفیت جذب است. در واقع این معادله بر این فرض استوار است که فرایند جذب فلز دارای ماهیت درجه اول است چرا که تنها بستگی به تعداد یون‌های فلزی حاضر در زمان خاص در محلول دارد. اگر غلظت اولیه ماده مورد جذب کم باشد، سینتیک معادله در بیشتر حالات از نوع درجه دوم است. در این معادله فرض می‌شود که فرایند جذب فلز بستگی به تعداد یون‌های فلزی حاضر در محلول و نیز مکان‌های جذب آزاد روی سطح جاذب دارد (۳۲). جدول ۹ مدل‌های سینتیک به دست آمده از تحقیق حاضر را نشان می‌دهد.

از آنجا که $0 < R_L < 1$ نشان‌دهنده‌ی کارآمدی مدل لانگمویر برای توصیف جذب می‌باشد (۱). هم‌چنین ظرفیت جذب حداکثر به دست آمده به روش محاسباتی برابر 61.34 میلی‌گرم بر گرم بوده و در مقایسه با ظرفیت جذب حداکثر تجربی (به دست آمده از آزمایش‌ها) که برابر 59.7 میلی‌گرم بر گرم می‌باشد، اختلاف ۲٪ را نشان می‌دهد که بیانگر دقت مدل و مطلوب بودن آن می‌باشد. معادله همدمای فروندلیچ نشان‌دهنده‌ی میزان همگنی سطح جاذب و بزرگی ضریب K_f ، بیانگر جذب زیستی آسان‌تر یون‌های فلزی از محیط آبی می‌باشد. هم‌چنین پارامتر n که نشان‌دهنده‌ی جذب مطلوب یون‌های فلزی بر اساس این مدل است، می‌بایست مقداری بین ۱۰-۱ داشته باشد (۳۳). همان‌طور که جدول (۸) نشان می‌دهد، ضریب تعیین قابل قبولی برای این مدل به دست آمده است. پارامترهای به دست آمده از این مدل عبارت‌اند از: $R^2 = 0.95$ ، $n = 3.08$ ، $K_f = 15.31$ ، که همگی بیان‌گر جذبی ایده‌آل بر اساس این مدل می‌باشند. در مدل تمکین اثرات جذب غیر مستقیم و فعل و انفعالات جذب در نظر گرفته می‌شود. در همدمای تمکین فرض می‌شود که کاهش در گرمای جذب خطی و جذب توسط یک توزیع یکنواخت از انرژی اتصال مشخص می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از این مدل، ضریب تعیین 0.98 به دست آمده است که عدد قابل قبولی بوده و می‌توان گفت که نتایج آزمایش پس از مدل لانگمویر، از مدل جذب تمکین تبعیت بیشتری می‌کنند. پارامترهای به دست آمده از این مدل عبارت‌اند از: $q_m = 41$ ، $q_m = 8.93$ ، $R^2 = 0.98$ و $K_T = 0.98$.

معادله‌ی همدمای دوبینین-رادشکوویچ معمولاً برای نشان دادن مکانیزم جذب با توزیع انرژی گوسی بر روی یک سطح هموزن به کار گرفته می‌شود. دادا و همکاران (۷) از این مدل برای بررسی خصوصیات تخللی جاذب و بررسی میزان همگنی انرژی‌های سطحی مربوط به جذب استفاده کردند. مدل همدمای دوبینین-رادشکوویچ برازش خوبی با داده‌های حاصل از پژوهش نداشته و با توجه به ضریب تعیین 0.73 این مدل از تطابق کمتری نسبت به دیگر مدل‌ها برای توصیف شرایط جذب برخوردار است. پارامترهای به دست آمده از این مدل عبارت‌اند از: $q_m = 41$ ، $D = 1 \times 10^{-7} mol^2/Jol^2$ ، $q_m = 41$ ، $R^2 = 0.73$ ، که در آن q_m ظرفیت جذب حداکثر محاسباتی، D ثابت مربوط به انرژی آزاد متوسط جذب به ازای هر مول از ماده جذب شده

Table 9- The parameter and equations of kinetic adsorption models of Cadmium

تجربی	شبه درجه اول				شبه درجه دوم		
Experimental	Pseudo first order				Pseudo second order		
پارامتر Parameter	$q_e(\text{mg/g})$	K_{1p} (1/min)	q_e (mg/g)	R^2	K_{2p} (mg/g.min)	q_e (mg/g)	R^2
کادمیم Cadmium	8.8955	0.0954	5.88	0.97	0.043	9.23	0.99
معادله ریاضی Equation	-	$Ln(q_e - q_t) = -0.0954t + 1.7725$			$t / q_t = 0.1083t + 0.2682$		

نتیجہ گیری

با توجه به اهمیت حذف آلاینده‌ها از آب و فاضلاب نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اصلاح جاذب با محلول NaOH موجب تغییر ساختار سطحی *سراتوفیلیوم* دمرسوم گردید. تصاویر حاصل از دستگاه SEM نشان داد که اصلاح جاذب موجب افزایش ظرفیت جذب گیاه برای جذب یون‌های کادمیم می‌شود. تغییر pH از سه تا هفت موجب افزایش جزیی راندمان حذف گردید و بیشترین راندمان در pH خنثی یا هفت به‌دست آمد. با افزایش زمان تماس، بازده حذف افزایش یافته و با توجه به ملاحظات اقتصادی و مصرف بهینه انرژی زمان ۶۰ دقیقه به‌عنوان زمان تعادل تعیین گردید. مدل‌سازی سینتیک نشان می‌دهد که مدل شبه درجه دوم به دلیل بالاترین ضریب تعیین، هم‌چنین نزدیکی مقدار q_e محاسبه و به‌دست آمده، بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی دارد. هم‌چنین مطالعات هم‌دمای جذب زیستی نشان داد که حذف کادمیم از معادله هم‌دمای لانگمویر بیش از دیگر مدل‌ها پیروی می‌کند.

با توجه به جدول ۹ مدل شبه درجه دوم به دلیل ضریب تعیین ۰/۹۹ تطابق بسیار خوبی داشته و می‌توان گفت که سینیتیک جذب کادمیم از این مدل بیشتر از مدل شبه درجه اول پیروی می‌کند، به این معنی که فرایند جذب فلز علاوه بر تعداد یون‌های فلزی در محلول به مکان‌های جذب آزاد بر روی سطح جاذب نیز بستگی دارد. از طرفی نزدیک‌ترین مقدار q_e محاسبه شده به q_e به‌دست آمده از نتایج آزمایش‌ها، مختص به مدل سینیتیک شبه درجه دوم بوده و این مدل بهترین تطابق را با داده‌های آزمایشگاهی دارد. در بسیاری از مطالعات، سینیتیک جذب از معادله شبه درجه دوم پیروی می‌کند و نتایج این پژوهش با مطالعات صورت گرفته توسط ما و توبین (۱۷)، کشینکان و همکاران (۱۳ و ۱۴)، پاگانلی و همکاران (۲۴)، منظور و همکاران (۱۸)، ربانی و همکاران (۲۶) و تیموری (۳۲) که بر روی جذب زیستی با استفاده از جاذب‌های گیاهی انجام شده است، مطابقت دارد.

منابع

- 1- Afkhami A., Saber-Tehrani M., and Bagheri H. 2010. Simultaneous removal of heavy-metal ions in wastewater samples using nano-alumina modified with 2, 4-dinitrophenylhydrazine. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1):836-844.
- 2- Ahmadi M. 2014. Determination of Efficiency and effective parameters of Natural Clinoptilolite Zeolite in Cadmium and Chromium Removal from Aqueous Solutions and Determination of Adsorption Isotherms. Ms. C thesis. Faculty of Public Health. Ahvaz Jondishapour University of Medical Sciences. (In Persian with English abstract)
- 3- Ahmady Asbchin S., Pourbabae A. A., and Andereh A. 2013. Evaluation simultaneous Biosorption process of Zn and Ni by *Fucus serratus* brown algae. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 32(1), 85-92. (In Persian)
- 4- Argun M.E., Dursun S., Ozdemir C., and Karatas M. 2007. Heavy metal adsorption by modified oak sawdust: Thermodynamics and kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 141(1):77-85.
- 5- Behnamfard A., and Salarirad M.M. 2009. Equilibrium and kinetic studies on free cyanide adsorption from aqueous solution by activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 170:127–33.
- 6- Chang W.C., Hsu G.S., Chiang S.M., and Su M.C. 2006. Heavy metal removal from aqueous solution by wasted biomass from a combined AS-biofilm process. *Bioresource Technology*, 97(13): 1503-1508.
- 7- Dada A.O., Olalekan A.P., Olatunya A.M., and Dada O. 2012. Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn^{2+} unto phosphoric acid modified rice husk. *Journal*

- of Applied Chemistry, 3(1): 38-45.
- 8- Das N., Charumathi D., and Vimala R. 2007. Effect of pretreatment on Cd²⁺ biosorption by mycelial biomass of *Pleurotus Florida*. *African Journal of Biotechnology*, 6:2555-2558.
- 9- Deyanati Tilki R., and Shariat M. 2003. Study on removal of cadmium from water by bacterial biomass in biological silicious filter. *Journal Mazandaran University Medical Science*, 13 (40):17-26. (In Persian)
- 10- Gupta V.K., and Ali I. 2004. Removal of lead and chromium from wastewater using bagasse fly ash-a sugar industry waste, *Journal Colloid Interface Science*, 271(2): 321-328.
- 11- Gupta V.K., and Nayak A. 2012. Cadmium removal and recovery from aqueous solution by novel adsorbent separated from orange peel and Fe₂O₃ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 180: 81-90.
- 12- Javan Bakht V., Zilouei H., and Karimi K. 2012. Effect of pH on Lead removal from aqueous solution by Fungus *Mucor Indicus*. *Journal of Water and Wastewater*, 23(1): 76-83. (In Persian with English abstract)
- 13- Keskinan O., Goksu M. Z. L., Basibuyuk M., and Forster C. F. 2004. Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant (*Ceratophyllum demersum*). *Bioresource Technology*, 92(2): 197-200.
- 14- Keskinan O., Goksu M. Z. L., Yuceer A., Basibuyuk M., and Forster C.F. 2003. Heavy metal adsorption characteristics of a submerged aquatic plant (*Myriophyllum spicatum*). *Process Biochemistry*, 39(2): 179-183.
- 15- Kililç M., Yazilcil H., and Solak M. 2009. A comprehensive study on removal and recovery of copper (II) from aqueous solutions by NaOH-pretreated *Marrubium globosum* ssp. *globosum* leaves powder: potential for utilizing the copper (II) condensed desorption solutions in agricultural applications. *Bioresource Technology*, 100(7): 2130-2137.
- 16- Liu D.H.F., Liptack B.G., and Bouis P. A. 1997. *Environmental Engineer's Handbook*, 2nd edn, Lewis, Boca Raton, FL, USA.
- 17- Ma W., and Tobin J. M. 2004. Determination and modelling of effects of pH on peat biosorption of chromium, copper and cadmium. *Biochemical Engineering Journal*, 18(1):33-40.
- 18- Manzoor Q., Nadeem R., Iqbal M., Saeed R., and Ansari T. M. 2013. Organic acids pretreatment effect on *Rosa bourbonia* phyto-biomass for removal of Pb (II) and Cu (II) from aqueous media. *Bioresource Technology* 132: 446-452.
- 19- Miretzky P., and Cirelli A. F. 2010. Cr (VI) and Cr (III) removal from aqueous solution by raw and modified lignocellulosic materials: a review. *Journal of Hazardous Materials*, 180(1): 1-19.
- 20- Miretzky P., Saralegui A., and Cirelli A. F. 2006. Simultaneous heavy metal removal mechanism by dead *macrophytes*. *Chemosphere*, 62(2): 247-254.
- 21- Montazer Rahmati M.M., Rabbani P., Abdolali A., and Keshtkar A. R. 2011. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of cadmium, lead, and nickel ions from aqueous solutions by intact and chemically modified brown algae. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1): 401-407.
- 22- Motamedi F. 2012. Remove cadmium from aqueous solutions by nanoclay and kaolinite clay, Ms. C thesis. Faculty of water science engineering. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract)
- 23- Mulligan C.N., Yong R.N., and Gibbs B. F. 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60(1): 193-207.
- 24- Pagnanelli F., Esposito A., Toro L., and Veglio F. 2003. Metal speciation and pH effect on Pb, Cu, Zn and Cd biosorption onto *Sphaerotilus natans*: Langmuir-type empirical model. *Water Research*, 37(3): 627-633.
- 25- Parnian A., Chorom M., Jaafarzadeh N., and Dinarvand M. 2010. Cadmium biological treatment of drain water by aquatic plants. 3 th National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian)
- 26- Rabani P., Abdol Ali A., Montazar rahmati M. M., Keshtkar A.R., and Dabagh R. 2009. Biosorption of Cd (II) and Ni (II) ions from aqueous solution by raw and pre-treated *Cystoseira Indica* Algae. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 43(1): 37-45. (In Persian with English abstract)
- 27- Ramos R.L., Jacome L.B., Barron J.M., Rubio L.F., and Coronado R.G. 2002. Adsorption of zinc (II) from an aqueous solution onto activated carbon. *Journal of Hazardous Materials*, 90(1): 27-38.
- 28- Sari A., Mendil D., Tuzen M., and Soylak M. 2008. Biosorption of Cd (II) and Cr (III) from aqueous solution by moss (*Hylocomium splendens*) biomass: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 144(1): 1-9. (In Persian)
- 29- Sari A., and Tuzen M. 2008. Biosorption of total chromium from aqueous solution by red algae (*Ceramium virgatum*): equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2): 349-355.
- 30- Shamohammadi Heydari Z. 2013. Compare rice husk and activated carbon for the removal of Cadmium with low concentrations of aqueous, *Journal of Water Resources Engineering*, 6(1): 1-10. (In Persian with English abstract)
- 31- Stylianou M.A., Hadjiconstantinou M.P., Inglezakis V.J., Moustakas K.G., and Loizidou M.D. 2007. Use of natural clinoptilolite for the removal of lead, copper and zinc in fixed bed column. *Journal of Hazardous Materials*, 143(1):575-81.
- 32- Teymouri P. 2011. Biosorption Studies on NaCl-Modified *Ceratophyllum demersum*: Removal of Chromium and Cadmium from Aqueous Solution. Ms. C thesis. Faculty of Public Health. Ahvaz Jondishapour University of

Medical Sciences. (In Persian with English abstract)

- 33- Teymouri P., Ahmadi M., Babaie A., Ahmadi K., and Jaafarzadeh N. 2013. Biosorption Studies on NaCl-Modified *Ceratophyllum demersum*: Removal of Toxic Chromium from Aqueous Solution, Chemical Engineering Communications, 200(10): 1394-1413.
- 34- Yan G., and Viraraghavan T. 2000. Effect of pretreatment on the bioadsorption of heavy metals on *Mucor rouxii*. Water SA, 26: 119-124.
- 35- Yousefi Z., Samakosh S.A., and Ebrahimi P. 2007. Biosorption of cadmium and copper from aqueous solutions by Caspian Sea marine macroalgae. Toxicology Letters, 172, S220.
- 36- Zhang Z., Li M., Chen W., Zhu S., Liu N., and Zhu L. 2010. Immobilization of lead and cadmium from aqueous solution and contaminated sediment using nano-hydroxyapatite. Environmental Pollution 158(2): 514-519.



Evaluation Biosorption of Cadmium (II) from Aqueous Solution by Modified *Ceratophyllum demersum* L.

H. Shokripour¹- M. Golabi^{2*}- H. Moazed³- N. Jaafarzadeh Haghighi Fard⁴

Received: 30-07-2017

Accepted: 14-05-2018

Introduction: In recent years, concern over the long-term effects of heavy metals has been increased as environmental pollutants. Environmental pollution of heavy metals is one of the major environmental issues. Unfortunately, due to the uncontrolled entry of various types of industrial waste, their input is increasing into air, water and soil sharply. Heavy metals are irresolvable and tend to accumulate in the organs and tissues of living organisms that cause a variety of diseases and disorders for humans and other living organisms. Recently, biological methods and technologies such as biosorbent and bio-accumulation have been used to help researchers to confront the problem of removing heavy metals from sewage. In bio-accumulation technology is used living biota to remove metals. However, in the second method, or biological absorption is used of dead or inactive biologically is this purpose. The main objective of this research is to determine the capability of the storage of cadmium as heavy metal by modified *Ceratophyllum demersum* biomass. In addition, the effect of pH on adsorption rate, contact time on adsorption rate, adsorbent adsorption, initial concentration of adsorbant (cadmium) were evaluated on adsorption. Also, kinetic and isotherm models of absorption were determined.

Materials and Methods: In the present study, the effect of modification of *Ceratophyllum demersum* on the removal of Cadmium from aqueous solution was investigated. *Ceratophyllum demersum* or blue fork is a submerged plant that is commonly found in aqueous humorous streams containing moderate to high levels of nutrients. One of the suitable environments for growth of *Ceratophyllum demersum* is low depth and laminar flow of water channels. In this regard, a search was conducted on irrigation channels inside Shahid Chamran University of Ahvaz and large quantities of this plant were observed in many parts of these channels. The plant was collected from the entrance channel of the Karoon River to the university. After collecting the plant and washing it with urban water and distilled water and drying it in free air was dried at 70 ° C. After that the dry matter was milled and it passed through the standard No. 50 sieve. In this study, alkaline solutions (0.5M NaOH solution) were used to modify biomass. This method has been shown to be effective in similar studies, and has greatly increased the absorption capacity of adsorbents. Preparation of cadmium storage solution was performed based on the methods presented in the standard reference for water and wastewater testing.

Results and Discussion: The morphology characteristics of biosorbent surface by Scanning Electron Microscope (SEM) were studied and desirable effects of modification on characteristics of biosorbent surface were proved. The result of study showed that by increasing pH from 3 to 8, the removal efficiency increased from 93% to 97% at pH 7, and then decreased to 85% at pH 8. In addition, adsorption capacity, in similar way, increased from 7.04 to 7.35 and then decreased to 6.44 mg/g. Therefore, pH 7 was determined as optimum pH. Increasing contact time, from 5 to 240 minute, caused changes in removal efficiency from 67% to 98% after 180 minute, and then decreased slightly. Adsorption capacity, in similar way, increased from 6.25 to 9.13 mg/g and then decreased slightly and contact time of 60 minute was determined as equilibrium time. Increasing dose of biosorbent from 0.02 to 4 g/L, causing increase of removal efficiency from 37% to 99% and decrease of adsorption capacity from 169.5 to 2.35 mg/g and finally dose of 10 mg/L was determined as proper dose of biosorbent. Increasing of initial concentration of Cadmium solution from 10 to 200 mg/L led to decrease in removal efficiency from 96% to 31%, and increase in adsorption capacity from 9.18 to 59.7 mg/g, and concentration of 10 mg/L was determined as optimum initial concentration of Cadmium. Finally, kinetic and isotherm adsorption models were studied. In kinetic models, pseudo-second order kinetic model, with correlation coefficient of 0.99 described biosorption better than pseudo-first order. In isotherm models, the Langmuir isotherm with correlation coefficient of 0.99 described biosorption process such better than other models. Based on results obtained in this study, the high capability of modified *Ceratophyllum demersum*, as a favorable

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor of Faculty of Water Science Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Respectively

(*- Corresponding Author Email: m.golabi@scu.ac.ir)

4- Professor of Faculty of Health, Ahvaz Jundishapur University of Medical Sciences

biosorbent for cadmium removal from aqueous solution was proved.

Conclusions: The images from the SEM device showed that adsorption modification increased the absorption capacity to absorb cadmium ions. The highest efficiency was achieved in pH equal to seven. According to the economic considerations and optimum consumption of the energy 60 minutes was determined as the time of equilibrium. Kinetic modeling shows that Pseudo second order has the best matching with experimental data.

Keywords: Adsorbent, Langmuir model, Removal efficiency Kinetic model



تأثیر کاربرد برخی اسیدهای آلی بر ویژگی‌های رشدی و غلظت عناصر غذایی ذرت علوفه‌ای

اکبر حسینی^{۱*} - مریم اعتمادیان^۲ - مهدی نورزاده حداد^۳ - مهرداد حنیفه‌ئی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲

چکیده

کاربرد اسیدهای آلی و معدنی در کشاورزی در سال‌های اخیر رو به افزایش است اما به نظر می‌رسد تأثیر آنها بر رشد و عملکرد گیاهان در این زمینه به پژوهش بیشتری نیاز دارد. هدف از این پژوهش مطالعه تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر رشد گیاه ذرت علوفه‌ای در یک خاک آهکی بود. این آزمایش در گلخانه علوفه‌ای در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی در ۹ تیمار و ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای ۱ و ۲ کاربرد اسید سیتریک به ترتیب با غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌مولار، تیمار ۳ و ۴: کاربرد اسید استیک به ترتیب با غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌مولار، تیمار ۵ و ۶: کاربرد اسید اگزالیک به ترتیب با غلظت ۵ و ۱۰ میلی‌مولار، تیمار ۷: کاربرد مخلوط سه اسید آلی هر کدام با غلظت ۳/۳۳ میلی‌مولار، تیمار ۸: کاربرد اسید سولفوریک با غلظت ۵ میلی‌مولار، تیمار ۹: بدون کاربرد اسید (شاهد) انجام شد. اسیدها با آب آبیاری در سه مرحله در طول فصل رشد اضافه شدند. طبق نتایج تیمار اسید سیتریک در هر دو سطح غلظتی نسبت به تیمار شاهد منجر به افزایش در وزن تر و خشک بخش هوایی شد. بیشترین غلظت نیتروژن در بخش هوایی در اسیدهای سیتریک، اگزالیک و اسید سولفوریک دیده شد. بیشترین غلظت پتاسیم (ریشه) و منگنز (بخش هوایی و ریشه) در تیمار اسید سولفوریک، بیشترین غلظت آهن (بخش هوایی) در تیمار اسید سیتریک و بیشترین غلظت روی (بخش هوایی و ریشه) در تیمار مخلوط اسیدهای آلی دیده شد.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی و معدنی، اسید سیتریک، خاک آهکی، ذرت

مقدمه

اسیدهای آلی و معدنی در خاک‌های آهکی افزون بر کاهش تدریجی مقدار pH محلول خاک، ممکن است مزایای دیگری نیز داشته باشد. اسیدهای آلی قادر به کلیت کردن عناصر فلزی هستند و از این طریق نیز قادر به افزایش قابلیت جذب آنها می‌باشند (۱۵). همچنین این اسیدها به عنوان یک منبع ساده کربن می‌توانند باعث افزایش جمعیت ریزجانداران خاک شوند (۲۸). در بین اسیدهای معدنی نیز اسید سولفوریک محتوی عنصر ضروری گوگرد است که به عنوان یک منبع زودجذب گوگرد مطرح می‌باشد. اسید سولفوریک همچنین به عنوان یک اصلاح کننده در خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این اسیدها در مقایسه با سایر نهاده‌های رایج مورد استفاده در کشاورزی مانند انواع کودها، قیمت بالایی ندارند و به عنوان یک نهاده که به طور بالقوه می‌توانند در افزایش عملکرد گیاهان مؤثر باشند مطرح می‌باشند.

در رابطه با تأثیر کاربرد اسیدهای آلی بر رشد و عملکرد گیاهان برخی پژوهش‌ها انجام شده است. معافپوریان (۲۳) گزارش داد کاربرد اسید سولفوریک باعث افزایش وزن خشک گیاه می‌گردد. طاهری‌پور و همکاران (۴۰) در تحقیقی به بررسی اثر اسید سیتریک بر برخی از پارامترهای رشدی سه رقم ذرت در یک خاک آلوده به مس و روی پرداختند و گزارش نمودند که کاربرد خاکی اسید سیتریک باعث

گیاهان به عنوان حلقه اول زنجیره اکولوژی، نقش حیاتی و حساسی در زندگی دیگر موجودات دارند. انسان نیز به دلیل نیازهای حیاتی خود، وابستگی بسیار زیادی به گیاهان داشته، از این رو به منظور تغذیه و رفع نیاز جمعیت رو به رشد جهان، افزایش کیفیت و عملکرد تولیدات زراعی از اهداف اولیه به شمار می‌آیند. در بین گیاهان زراعی، ذرت علوفه‌ای نقش بسیار مؤثری در تامین غذای دام ایفا می‌کند. استفاده از انواع مختلف ترکیبات آلی و معدنی در مزارع برای افزایش رشد و همچنین بهبود کیفیت ذرت امری رایج می‌باشد. در خاک‌های آهکی ایران، کاربرد ترکیباتی که در طولانی مدت منجر به کاهش pH خاک شوند، در اولویت قرار دارند. کاهش pH در خاک های آهکی باعث افزایش غلظت عناصر غذایی ضروری مانند فسفر، آهن، روی، مس و منگنز در محلول خاک می‌شود. استفاده از

۱ و ۲- استادیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Akbar.hassani@znu.ac.ir)

۳- دانش‌آموخته دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانش‌آموخته دکتری اصلاح نباتات، دانشگاه تربیت مدرس

مواد و روش‌ها

طرح آماری و تیمارها

برای بررسی تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر رشد و عملکرد ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴، یک طرح آزمایشی آماری در قالب طرح کاملاً تصادفی در شرایط گلخانه و در گلدان با تیمارهای زیر انجام شد: تیمار ۱: اسید سیتریک با غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر (C₅)، تیمار ۲: اسید سیتریک با غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر (C₁₀)، تیمار ۳: اسید استیک با غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر (A₅)، تیمار ۴: اسید استیک با غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر (A₁₀)، تیمار ۵: اسید اگزالیک با غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر (O₅)، تیمار ۶: اسید اگزالیک با غلظت ۱۰ میلی‌مول بر لیتر (O₁₀)، تیمار ۷: کاربرد مخلوط اسیدهای آلی سیتریک، استیک و اگزالیک هر کدام با غلظت ۳/۳۳ میلی‌مول بر لیتر (Mix)، تیمار ۸: اسید سولفوریک با غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر (S)، تیمار ۹: شاهد بدون کاربرد اسید (Control). هر تیمار در سه تکرار مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت جامعه آماری شامل ۲۷ گلدان بود. علت انتخاب این غلظت‌ها، اقتصادی بودن آنها از نظر اجرا در مزرعه، قابلیت مقایسه آنها با یکدیگر و عدم تأثیر ناگهانی آنها بر مقدار pH خاک بود که در پیش آزمایشات به‌دست آمد. محلول‌های مورد نیاز بر اساس تیمارهای تعیین شده ساخته شدند. اسید سیتریک، استیک و اگزالیک در دو سطح غلظتی ۵ و ۱۰ میلی‌مول بر لیتر و اسید سولفوریک با غلظت ۵ میلی‌مول بر لیتر تهیه شدند. حجم ساخت محلول‌ها به‌اندازه‌ای بود که رطوبت خاک گلدان‌ها را به ۸۰ درصد رطوبت ظرفیت مزرعه برساند. کلیه محلول‌ها از مواد شیمیایی با درصد خلوص بالا و تهیه شده از شرکت مرک^۱ آلمان ساخته شدند.

تهیه گلدان‌ها و کاشت گیاهان

این آزمایش در گلخانه و در گلدان انجام شد. گلدان‌های پلی اتیلنی برای کاشت گیاهان استفاده شد. خاک مورد استفاده از مزرعه تحقیقاتی متعلق به دانشگاه زنجان تهیه شد. یک نمونه از خاک برای تعیین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز و تعیین سطح حاصلخیزی به آزمایشگاه خاکشناسی دانشگاه زنجان فرستاده شد (جدول ۱) و در آن برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی به روش‌های استاندارد اندازه‌گیری شدند (۲۴، ۱۱ و ۴۱). گلدان‌ها با ۸ کیلوگرم خاک پر شدند و یک بار آبیاری شدند تا نشست لازم در آن صورت گیرد. در هر گلدان، تعداد ۱۰ بذر ذرت کاشته شد. پس از کاشت بذور در خاک، تیمارهای مورد نظر همراه با آب آبیاری اعمال شدند. آبیاری گلدان‌ها با آب شهری با مقدار EC برابر با ۴۰۰ $\mu\text{S}/\text{cm}$ انجام شد. در این مورد به هر گلدان ۴۰۰ میلی‌لیتر محلول محتوی اسیدهای مورد

کاهش معنی‌دار شاخص کلروفیل برگ ولی افزایش معنی‌دار تعداد برگ در گیاهان تحت تأثیر تیمار گردید. پاچیکو و همکاران (۲۷) در بررسی تأثیر اسید سیتریک بر فعالیت پروتئولیتیک گیاه ذرت عنوان کردند، افزایش اسید سیتریک به‌طور معنی‌داری باعث افزایش چند برابری فعالیت آنزیم پروتئاز در گیاه ذرت و افزایش عملکرد دانه این گیاه گردید. لاباردا و همکاران (۲۰) نیز به بررسی تأثیر اسید سیتریک بر جذب مواد معدنی و کیفیت گوجه‌فرنگی پرداختند. نتایج، افزایش معنی‌دار غلظت عناصر روی، سدیم، کلسیم و نیتروژن را در برگ گیاه و منگنز، سدیم، منیزیم و فسفر را در میوه نشان داد. آنان بیان کردند به‌طور کلی افزایش اسید سیتریک، افزایش کیفیت گوجه‌فرنگی را به همراه دارد. خادمی و همکاران (۱۷) گزارش نمودند که اسیدهای آلی مانند اسید سیتریک و اسید اگزالیک در شرایط کمبود عناصر نسبت به بقیه اسیدها به‌مقدار نسبتاً زیادی از ریشه گیاهان آزاد شده و در افزایش حل‌پذیری عناصر غذایی در ریزوسفر مشارکت دارند. به‌نظر می‌رسد اسیدهای آلی با دو مکانیسم باعث افزایش حلالیت این عناصر می‌شوند. این اسیدها به علت داشتن گروه‌های کربوکسیلیک قادرند با این کاتیون‌های فلزی تشکیل کمپلکس محلول بدهند. همچنین اسیدهای آلی با کاهش مقدار pH خاک باعث افزایش حل‌پذیری ترکیبات نامحلول محتوی این عناصر می‌شوند.

کاربرد اسیدهای معدنی نیز در کشاورزی اگرچه نسبت به اسیدهای آلی رایج‌تر است اما به‌نظر می‌رسد به پژوهش بیشتری نیاز دارد. تأثیرات مثبت کاربرد اسیدهای معدنی بر رشد و عملکرد گیاهان توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است (۱، ۵، ۱۳ و ۳۶). محمودآبادی و همکاران (۲۱) گزارش نمودند که مصرف اسید سولفوریک در خاک‌های آهکی و سدیمی منجر به افزایش پتاسیم، کلسیم و منیزیم محلول در خاک می‌شود. همچنین، صدیق و همکاران (۳۶) گزارش نمودند که کاربرد اسید سولفوریک منجر به افزایش محصول و همچنین اصلاح سریع‌تر خاک‌های شور و سدیمی می‌شود.

با توجه به مطالعات انجام شده، به‌نظر می‌رسد تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی هنوز به بررسی بیشتری نیاز دارد. بین این اسیدها تاکنون مقایسه‌ای صورت نگرفته و تأثیر آنها بر مقدار جذب عناصر غذایی توسط گیاهان مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین تأثیر آنها بر رشد و عملکرد بسیاری از گیاهان زراعی مانند ذرت علوفه‌ای بررسی نشده است. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر کاربرد اسیدهای استیک، سیتریک، اگزالیک، سولفوریک بر رشد ذرت علوفه‌ای و غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی و ریشه آن در خاک‌های آهکی بود.

برداشت و آنالیز گیاهان

اندام‌های هوایی نمونه‌های گیاهی پس از گذشت ۵۰ روز از محل طلوقه جدا شده و ریشه‌ها نیز به دقت از خاک جدا شدند. برخی ویژگی‌های مرتبط با رشد مانند ارتفاع ساقه، وزن تر بخش هوایی و ریشه، وزن خشک بخش هوایی و ریشه، و درصد رطوبت بافت گیاهی اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری درصد رطوبت، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آون با دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا کاملاً خشک شوند. سپس وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری و درصد رطوبت بافت گیاهی محاسبه شد (۲۹). برای اندازه‌گیری آنالیز عنصری، نمونه‌های خشک شده در آون با آسیاب پودر شدند. برای اندازه‌گیری غلظت عناصر نیتروژن، پتاسیم و فسفر در نمونه‌های مربوط به هر تیمار، هضم نمونه‌ها در لوله‌های مخصوص با روش اسید سولفوریک، اسید سالیسیلیک، آب اکسیژنه و سلنیم انجام شد (۱۶). غلظت نیتروژن در عصاره هضم شده به روش کج‌لدال، پتاسیم با دستگاه فلیمتومتر و فسفر نیز به روش رنگ‌سنجی اندازه‌گیری شد (۱۶).

نظر اضافه شد. بعد از جوانه زدن بذور، سه گیاهچه نسبتاً قوی در خاک باقی‌مانده و بقیه گیاهچه‌ها حذف شدند. پس از گذشت چند روز، از بین سه گیاهچه باقیمانده یک گیاهچه جوان که نسبت به بقیه رشد بهتری داشت باقی ماند و دو گیاهچه دیگر نیز حذف شدند. ادامه آزمایش بر تک گیاه باقی‌مانده انجام شد. در مرحله چهاربرگی و هشت‌برگی یک بار دیگر نیز تیمارهای مورد نظر اعمال شدند. آبیاری برای همه گلدان‌ها به‌طور یکسان بود و به‌نحوی انجام شد که رطوبت خاک در سطح حداقل ۸۰ درصد ظرفیت مزرعه قرار داشته باشد. مقدار رطوبت ظرفیت زراعی ابتدا در آزمایشگاه با دستگاه صفحات فشاری تعیین شده و سپس در گلخانه این موضوع با وزن کردن گلدان‌ها قبل و بعد از آبیاری محقق شد. با توجه به تأثیر احتمالی کاربرد اسیدها بر افزایش قابلیت جذب فسفر، پتاسیم، آهن، روی، مس و منگنز، کوددهی فقط بر اساس نیاز نیتروژنی و به‌صورت ۰/۵۵ گرم اوره به گلدانها (معادل ۲۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار) همراه با آب آبیاری و در سه مرحله و در هنگام اعمال تیمارهای اسید همراه با آب آبیاری انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد استفاده در این پژوهش
Table 1- Some physical and chemical properties of soil samples used in this research

ویژگی خاک Soil property	مقدار Value	روش اندازه‌گیری (۴۱، ۱۱ و ۴۱) Method of analysis
هدایت الکتریکی EC	0.86 dS m ⁻¹	عصاره گل اشباع Saturated paste extract
اسیدیته pH	7.49	گل اشباع Saturated paste
کربنات کلسیم معادل ECC	172.5 g kg ⁻¹	تیتراسیون Titration
بافت texture	Loam لوم	هیدرومتر Hydrometer
کربن آلی Organic carbon	4.3 g kg ⁻¹	والکلی بلک Walkley-Black
فسفر قابل جذب Available P	10.2 mg kg ⁻¹	اولسن Olsen
پتاسیم قابل جذب Available K	187 mg kg ⁻¹	استات آمونیوم Ammonium acetate
نیتروژن کل Total N	280 mg kg ⁻¹	کج‌لدال Kjeldahl
آهن قابل جذب Available K	4.78 mg kg ⁻¹	DTPA
روی قابل جذب Available Zn	0.83 mg kg ⁻¹	DTPA
منگنز قابل جذب Available Mn	12.45 mg kg ⁻¹	DTPA
مس قابل جذب Available Cu	1.27 mg kg ⁻¹	DTPA
بور قابل جذب Available B	1.33 mg kg ⁻¹	آب داغ Hot water

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز، نمونه‌های پودر شده به روش خشک سوزانی هضم شدند و غلظت عناصر آهن، روی، مس و منگنز در عصاره هضم شده با دستگاه جذب اتمی شعله‌ای اندازه‌گیری گردید (۲۹). فاکتور انتقال^۱، میزان انتقال عناصر را از بخش ریشه‌ای به بخش هوایی گیاه مشخص نموده (۱۸) و با تقسیم کردن غلظت عنصر در بخش هوایی گیاه بر غلظت عنصر در بخش ریشه‌ای گیاه به‌دست آمد. تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد و جهت مقایسه میانگین‌ها آزمون LSD در سطح پنج درصد مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج آنالیز واریانس تیمارهای مختلف اسیدهای آلی و معدنی که به منظور بررسی اثر آنها بر عملکرد کمی و کیفی ذرت علوفه‌ای اعمال گردیدند در جدول ۲ آورده شده است. نتایج گویای تأثیر معنی دار تیمارها بر فاکتورهای کمی رشد (وزن تر، وزن خشک و ارتفاع بوته) بود. درصد رطوبت در گروه‌های مختلف تیماری بدون اختلاف معنی دار بودند و دیگر فاکتورهای کمی رشد (وزن تر، وزن خشک و ارتفاع بوته) در سطح یک درصد با هم اختلاف معنی‌داری داشتند.

نتایج مربوط به عناصر غذایی پر مصرف در اندام هوایی و زیرزمینی گیاه و همین‌طور فاکتور انتقال عنصر در جدول ۲ نشان دادند که غلظت پتاسیم ریشه، ساقه و فاکتور انتقال آن در گروه‌های مختلف تیماری در سطح پنج درصد با هم اختلاف معنی‌داری داشتند ولی این وضعیت برای دو عنصر پر مصرف فسفر و نیتروژن در سطح یک درصد برقرار بود که نشان‌دهنده تأثیر قطعی تر و معنی‌دار تیمارها بر غلظت عناصر فسفر و نیتروژن نسبت به پتاسیم بود.

در همین جدول، بر اساس نتایج مرتبط با کیفیت گیاه ذرت علوفه‌ای و غلظت عناصر کم‌مصرف در اندام هوایی و زیرزمینی و فاکتور انتقال آنها، به‌جز مس و فاکتور انتقال آن، بین غلظت دیگر عناصر (روی، آهن، منگنز) در ساقه، ریشه و فاکتور انتقال آنها در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌دار وجود داشت. از این بخش از نتایج می‌توان چنین استنباط کرد که تیمارهای مختلف اسیدهای آلی و معدنی نتوانستند بر غلظت مس در گیاه و فاکتور انتقال آن تأثیر معنی‌داری بگذارند.

جدول ۳ میزان تأثیر هر تیمار بر صفات کمی رشد (وزن تر، وزن خشک، درصد رطوبت و ارتفاع بوته) را نشان می‌دهد. فاکتورهای وزن تر و خشک گیاه بیشترین تأثیر را از تیمار اسید سیتریک گرفتند. به طوری که این تیمار باعث افزایش وزن تر و خشک گیاه گردید و با

دیگر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت.

تأثیر مثبت اسید سیتریک در افزایش عملکرد ذرت را می‌توان احتمالاً به نقش آن در کاهش pH خاک و کلات نمودن عناصر غذایی و افزایش قابلیت جذب آنها نسبت داد. اعتمادیان و همکاران (۹) گزارش نمودند که کاربرد اسیدهای آلی و معدنی مشابه با این پژوهش در خاک آهکی موجب کاهش pH خاک‌ها و افزایش غلظت عناصر در محلول خاک می‌شود. اسید سیتریک همچنین به‌عنوان یک ماده غذایی برای میکروارگانیسم‌های خاک مطرح می‌باشد که افزودن آن منجر به افزایش جمعیت آنها شده و در نهایت این میکروارگانیسم‌ها به رشد گیاهان کمک می‌کنند. با این وجود اوسوریو و میکس (۲۶) اثر کاربرد اسید سیتریک و اگزالیک اسید هرکدام را در دو سطح غلظتی ۰/۱ و ۱۰۰ میلی‌مولار بر عملکرد گیاه بادمجان در دو نمونه خاک آهکی بررسی نموده و گزارش نمودند که کاربرد این اسیدها تأثیر معنی‌داری بر عملکرد بادمجان نداشت که با نتایج این پژوهش در تناقض می‌باشد.

تیمار اسید سیتریک ۱۰ و ۵ میلی‌مولار و اسید استیک ۱۰ میلی‌مولار مؤثرترین تیمار بر ارتفاع بوته بودند و دیگر تیمارها در درجات بعد قرار گرفتند.

نتایج مرتبط با عنصر نیتروژن نیز نشان دهنده تأثیر مثبت اسید استیک، اسید اگزالیک و اسید سولفوریک بر افزایش غلظت نیتروژن اندام هوایی و تأثیر مثبت اسید سیتریک بر غلظت نیتروژن ریشه بود (جدول ۴). غلظت نیتروژن اندام هوایی حدوداً دو برابر اندام زیرزمینی گیاه بود و از آنجا که افزایش غلظت نیتروژن در خاک سبب بالا رفتن نسبت وزن خشک اندام هوایی به ریشه می‌گردد (۲۵)، لذا نتیجه به دست آمده منطقی به‌نظر می‌رسد. اسیدهای به‌کار رفته احتمالاً در خاک موجب افزایش غلظت نیتروژن محلول در خاک می‌شوند و این عمل ممکن است با رهاسازی یون آمونیوم و یا نیترات جذب سطحی شده از سطح کانی‌های خاک رخ دهد (۹). در پژوهشی اعتمادیان و همکاران (۹) گزارش نمودند که کاربرد اسیدهای مشابه با این پژوهش در یک خاک آهکی موجب افزایش غلظت یون نیترات و آمونیوم در محلول خاک می‌شود. در مورد فاکتور انتقال نیتروژن نیز تیمارهای اسید استیک (هر دو غلظت)، اسید اگزالیک (هر دو غلظت)، اسید سولفوریک و تیمار تلفیقی اسیدهای آلی مؤثرترین بودند. به‌نظر می‌رسد حضور آنیون همراه این اسیدها به انتقال سریع‌تر نیتروژن جذب شده در گیاهان به سمت بخش هوایی کمک می‌کند. همچنین کاهش مقدار pH شیره سلولی ناشی از جذب یون پروتون نیز به انتقال نیتروژن در گیاهان کمک می‌کند (۳۹). پژوهشی و همکاران (۳۱) نیز در بررسی عملکرد و غلظت عناصر در انگور، تیمار اسید استیک را مورد بهره‌گیری قرار دادند. بخشی از نتایج آنان نشان داد، این تیمار در افزایش غلظت نیتروژن تأثیر معنی‌دار داشته است.

جدول ۲- تجزیه واریانس تأثیر اسیدهای آلی و معدنی بر برخی ویژگی‌های کمی و کیفی ذرت

Table 2- The analysis of variance (ANOVA) table of organic and inorganic acids effects on some quantitative and qualitative characteristics of corn

منابع تغییرات S.O.V	تیمار Treatment	بلوک Block	خطا Error	ضریب تغییرات CV
درجه آزادی (df)	8	2	16	
وزن تر (Fresh weight)	2.11 **	0.034 ns	0.11	14.3
وزن خشک (Dry weight)	2.82 **	0.017 ns	0.13	14.8
درصد رطوبت (Water content)	1437 ns	2.46 ns	2.43	1.72
ارتفاع بوته (Plant height)	138.8 **	37.56 ns	21.6	14.2
نیترژن ریشه (N root)	0.057 **	0.002 ns	0.003	2.57
نیترژن ساقه (N shoot)	0.421 **	0.001 ns	0.004	2.42
فاکتور انتقال نیترژن (N TF)	0.047 **	0.001 ns	0.002	2.76
پتاسیم ریشه (K root)	0.18 *	0.003 ns	0.004	13.1
پتاسیم ساقه (K shoot)	0.36 *	0.037 ns	0.017	9.21
فاکتور انتقال پتاسیم (K TF)	0.42 *	0.18 ns	0.18	18.8
فسفر ریشه (P root)	0.073 **	0.0002 ns	0.0003	6.93
فسفر ساقه (P shoot)	0.013 **	0.004 ns	0.0003	6.11
فاکتور انتقال فسفر (P TF)	0.15 **	0.008 ns	0.008	10.25
آهن ریشه (Fe root)	366294 **	467.3 ns	14378	9.72
آهن ساقه (Fe shoot)	77516 **	85.45 ns	1031	18.3
فاکتور انتقال آهن (Fe TF)	0.005 **	0.0002 ns	0.001	19.5
منگنز ریشه (Mn root)	836.6 **	3.18 ns	6.82	2.17
منگنز ساقه (Mn shoot)	222.5 **	21.9 ns	21.3	3.16
فاکتور انتقال منگنز (Mn TF)	0.003 **	0.001 ns	0.001	3.21
روی ریشه (Zn root)	9926 **	3342 ns	1229	21.9
روی ساقه (Zn shoot)	4317**	2121 ns	987	18.3
فاکتور انتقال روی (Zn TF)	0.642 **	0.057 ns	0.074	18.9
مس ریشه (Cu root)	2.69 ns	1.46 ns	4.29	5.37
مس ساقه (Cu shoot)	2.86 ns	8.48 ns	1.87	6.61
فاکتور انتقال مس (Cu TF)	0.005 ns	0.002 ns	0.003	9.26

اسید اگزالیک ۱۰ میلی‌مولار داشت. با توجه به اینکه تنظیم فشار اسمزی، تنظیم pH سلول، ساخت پروتئین‌ها و شرکت در فعال کردن بسیاری از آنزیم‌ها، از جمله نقش‌های پتاسیم در گیاه می‌باشد (۲)، لذا بهره‌گیری از اسید اگزالیک و ترکیب اسیدهای آلی در بهبود عملکرد گیاه، باعث افزایش کیفی محصول می‌گردد.

نتایج نشان داده شده در جدول ۵ حاکی از تأثیر مثبت اسید سیتریک ۵ میلی‌مولار، اسید استیک، مخلوط اسیدها و اسید سولفوریک بر غلظت فسفر بخش هوایی و تأثیر مثبت اسید استیک و تیمار مخلوط اسیدها بر غلظت فسفر ریشه داشت. اسیدهای آلی و معدنی احتمالاً با کاهش مقدار pH خاک باعث افزایش انحلال فسفر

با در نظر گرفتن نقش این عنصر در ساخت اسیدهای آمینه، پروتئین، کلروفیل، نوکلئیک اسیدها و کوآنزیم‌ها، توجه به این بخش از نتایج جهت افزایش کمی و کیفی عملکرد ذرت علوفه‌ای اجتناب ناپذیر است.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری غلظت عنصر پتاسیم در بخش هوایی و ریشه ذرت در جدول ۴ نشان داد که تیمار اسیدهای آلی و سولفوریک تقریباً بر غلظت پتاسیم اندام هوایی تأثیر معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد نداشتند. غلظت پتاسیم موجود در ریشه گیاه نیز بیشترین تأثیر را از اسید سیتریک ۱۰ میلی‌مولار و اسید سولفوریک گرفته بود. فاکتور انتقال پتاسیم بیشترین تأثیرپذیری مثبت را از تیمار

در خاک شده و به جذب بهتر آن کمک کرده‌اند. با توجه به اینکه این بخش از نتایج به‌طور مؤثری می‌تواند جهت تأمین فسفر گیاهان عنصر فسفر فاقد منبع مشخصی در خاک می‌باشد (۱۰) و بر خلاف مؤثر واقع شود. عناصر پرمصرف دیگر دارای حداقل تحرک در خاک است (۳۷)، لذا

جدول ۳- تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر فاکتورهای کمی رشد ذرت

Table 3- Effect of organic and inorganic acids on quantitative growth factors of corn. ($p < 0.05$)

تیمار Treatment	وزن تر بخش هوایی (گرم در گلدان) Fresh weight (g per pot)	وزن خشک بخش هوایی (گرم در گلدان) Dry weight (g per pot)	درصد رطوبت Water percentage	ارتفاع بوته (سانتی‌متر) Plant height (cm)
C ₅	7.79 a	0.90 a	88.3 a	31.17 abc
C ₁₀	8.69 a	1.04 a	88.0 a	34.83 a
A ₅	6.87 c	0.79 bc	88.2 a	27.17 bc
A ₁₀	7.21 b	0.88 ab	87.8 a	32.67 ac
O ₅	7.68 b	0.82 b	89.3 a	31.00 abc
O ₁₀	7.03 c	0.84 b	88.1 a	29.33 bc
Mix	7.33 b	0.85 b	88.4 a	28.84 bc
S	7.64 b	0.81 b	89.1 a	29.33 bc
Control	7.34 b	0.86 b	88.3 a	28.67 bc

داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند

Numbers followed by the same letter are not significantly different

جدول ۴- تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر فاکتور انتقال نیتروژن و پتاسیم و غلظت آنها در ریشه و بخش هوایی ذرت

Table 4- Effect of organic and inorganic acids on translocation factor of nitrogen and potassium and their concentrations in root and shoot of corn

تیمار Treatment	نیتروژن بخش هوایی (Shoot N g (100g ⁻¹)	نیتروژن ریشه (Root N g (100g ⁻¹)	فاکتور انتقال نیتروژن (N TF)	پتاسیم بخش هوایی (Shoot K (g 100g ⁻¹)	پتاسیم ریشه (Root K (g 100g ⁻¹)	فاکتور انتقال پتاسیم (K TF)
C ₅	4.56 b	2.42 a	1.86 bc	1.35 a	0.55 ab	2.49 bdc
C ₁₀	4.49 b	2.39 ab	1.88 bc	1.37 a	0.59 a	2.34 dc
A ₅	4.79 a	2.29 c	2.09 a	1.07 b	0.50 abc	2.14 d
A ₁₀	4.74 a	2.30 c	2.06 a	1.33 a	0.45 bc	2.97 abc
O ₅	4.72 a	2.33 bc	2.02 a	1.36 a	0.48 abc	2.88 abcd
O ₁₀	4.75 a	2.26 c	2.09 a	1.36 a	0.42 c	3.34 a
Mix	4.78 a	2.33 bc	2.05 a	1.33 a	0.45 bc	2.99 abc
S	4.82 a	2.30 c	2.09 a	1.28 a	0.60 a	2.13 d
Control	4.17 c	2.31 bc	1.80 d	1.26 a	0.45 bc	2.80 abcd

داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند

Means with different letters within the same column are significantly different (LSD, $p \leq 0.05$)

جدول ۵- تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر فاکتور انتقال فسفر غلظت آن در ریشه و بخش هوایی ذرت

Table 5- Effect of organic and inorganic acids on translocation factor of phosphorous and its concentration in root and shoot of corn. ($p \leq 0.05$)

تیمار Treatment	فسفر بخش هوایی (Shoot P (g 100g ⁻¹)	فسفر ریشه (Root P (g 100g ⁻¹)	فاکتور انتقال فسفر (TF P)
C ₅	0.26 a	0.34 b	0.76 de
C ₁₀	0.21 de	0.33 b	0.65 e
A ₅	0.24 abc	0.32 b	0.76 de
A ₁₀	0.26 a	0.41 a	0.64 e
O ₅	0.22 cde	0.24 c	0.92 cd
O ₁₀	0.23 bcd	0.26 c	0.88 cd
Mix	0.26 a	0.38 a	0.69 e
S	0.25 ab	0.25 c	1.03 bc
Control	0.20 e	0.16 d	1.23 a

داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند

Means with different letters within the same column are significantly different (LSD, $p \leq 0.05$)

نکته قابل توجه این است که فاکتور انتقال فسفر در همه تیمارها، از گیاهان شاهد کمتر بود و تنها اسید سولفوریک تا حدودی توانست مقدار فاکتور انتقال این عنصر را افزایش دهد.

نتایج مربوط به عنصر آهن (جدول ۶) نشان داد که تیمارهای اسید سیتریک (هر دو غلظت) در افزایش غلظت آهن اندام هوایی و تیمارهای اسید سیتریک ۱۰ میلی‌مولار و تیمار تلفیقی اسیدهای آلی برای افزایش غلظت آهن ریشه مؤثرترین تیمارها بوده‌اند. دلیل نتایج فوق می‌تواند این باشد که اسیدهای آلی به‌طور مؤثری تحرک و حلالیت کاتیون‌های فلزی زیادی از جمله آهن را افزایش می‌دهند (۱۲ و ۱۵)، به‌طوری‌که اگر در ترکیب ترشحات ریشه گیاه عناصر غذایی کاهش پیدا کنند، اسیدهایی مثل سیتریک، مالیک و اگزالیک افزایش پیدا می‌کنند (۳۳). پژوهشگران به نقش اساسی اسیدهای آلی در انحلال آهن و سایر فلزات کم‌مصرف برای رشد گیاه اشاره کرده‌اند (۳۴، ۳۵ و ۴۲)، به‌طوری‌که بسیاری از گیاهان با افزایش ترشحات ریشه‌ای به کمبود آهن واکنش نشان می‌دهند و اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم ترشح می‌کنند (۴۳). در واقع در تحقیق حاضر، اسیدهای آلی مثل سیتریک توانسته‌اند با آهن کمپلکس تشکیل دهند و سبب افزایش دسترسی این عنصر برای گیاه شوند. می‌توان اینچنین استنباط نمود که سیتریک و استیک اسید قدرت کلات‌کنندگی بیشتری نسبت به اگزالیک اسید دارند (۱۴)، لذا توانایی بالاتری برای جذب و تشکیل کمپلکس با آهن در آنها وجود دارد.

نتایج مربوط به عنصر منگنز نیز در جدول ۶ آورده شده است. تیمارهای اسید استیک (هر دو غلظت) و اسید سولفوریک بیش از دیگر تیمارها و به‌طور معنی‌داری در افزایش غلظت منگنز اندام هوایی

گیاه نقش داشتند. اسید سولفوریک همچنین باعث افزایش معنی‌دار غلظت منگنز ریشه نسبت به سایر تیمارها گردید. این عنصر در فعال بودن آنزیم‌های مختلف در گیاهان نقش دارد (۳۸) و توزیع آن بین فاز جامد و محلول خاک یکی از عوامل مؤثر در قابلیت دسترسی آن برای گیاه است (۱۹) که این مهم می‌تواند توسط اسیدهای آلی به انجام برسد (۳۳). اختلاف معنی‌دار گیاهان تحت تیمار اسید استیک ۵ میلی‌مولار با گیاهان تحت تیمارهای دیگر از لحاظ فاکتور انتقال منگنز، می‌تواند اثباتی برای گفته فوق باشد. در گیاهان دارای کمبود منگنز، غلظت کلروفیل و برخی از مواد تشکیل‌دهنده غشاء کلروپلاست نظیر فسفولیپیدها و گلیکولیپیدها کاهش می‌یابد و علامت آن زردی بین رگبرگ‌ها است که تا حدی با زردی آهن اشتباه می‌شود، این کمبود باعث کاهش کمی و کیفی عملکرد می‌گردد (۸). از طرفی کاهش کمی و کیفی غلظت کلروفیل و گلیکولیپیدها در ذرت علوفه‌ای یک نکته منفی و غیرقابل‌اجتناب است زیرا موجب کاهش فتوسنتز و کاهش تولید محصول می‌شوند، لذا توجه به نتایج این بخش و بهره‌گیری در پروسه تولید ذرت علوفه‌ای ضروری می‌باشد.

روی یکی از عناصر کم‌مصرف ضروری و مورد نیاز برای رشد و تولید محصولات زراعی است (۴). نتایج در جدول ۷ نشان‌دهنده تأثیر تیمارهای مختلف بر غلظت عناصر غذایی روی و مس اندام هوایی و ریشه و همین‌طور فاکتور انتقال آن است. از این بخش از نتایج به دست آمد که غلظت عنصر روی در ساقه و ریشه گیاه به‌طور معنی‌داری در تیمار تلفیقی اسیدهای آلی بالاترین بود. همچنین، غلظت عنصر روی در ساقه و ریشه در تمامی گیاهان تحت تیمارها از گیاهان شاهد بیشتر بود.

جدول ۶- تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر فاکتور انتقال آهن و منگنز و غلظت آنها در ریشه و بخش هوایی ذرت
Table 6- Effect of organic and inorganic acids on translocation factor of Fe and Mn and their concentrations in root and shoot of corn

تیمار Treatment	آهن بخش هوایی Shoot Fe (mg kg ⁻¹)	آهن ریشه Root Fe (mg kg ⁻¹)	فاکتور انتقال آهن TF Fe	منگنز بخش هوایی Shoot Mn (mg kg ⁻¹)	منگنز ریشه Root Mn (mg kg ⁻¹)	فاکتور انتقال منگنز MnTF
C5	289.0 a	1429 c	0.20 ab	145.0 cd	172.0 c	0.84 ef
C10	281.7 a	1856 a	0.15 bc	144.7 d	174.0 c	0.83 f
A5	156.0 b	1481 bc	0.10 dc	163.7 a	147.3 e	1.11 a
A10	181.3 b	847 e	0.21 a	162.0 a	152.0 d	1.06 ab
O5	136.7 b	1062 d	0.13 dc	145.3 cd	141.3 f	1.02 bc
O10	167.2 b	1409 c	0.12 dc	143.7 d	143.0 ef	1.00 c
Mix	181.4 b	1918 a	0.09 d	157.3 ab	175.3 bc	0.90 ed
S	173.1 b	1414 c	0.12 dc	163.3 a	181.3 a	0.90 de
Control	160.0 b	864 de	0.18 ab	153.0 bc	142.3 f	1.07 ab

داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند

Means with different letters within the same column are significantly different (LSD, $p \leq 0.05$)

جدول ۷- تأثیر کاربرد اسیدهای آلی و معدنی بر فاکتور انتقال روی و مس و غلظت آن در ریشه و شاخسار ذرت
Table 7- Effect of organic and inorganic acids on translocation factor of Zn and Cu and their concentrations in root and shoot of corn

تیمار Treatment	روی ساقه Shoot Zn (mg kg ⁻¹)	روی ریشه Root Zn (mg kg ⁻¹)	فاکتور انتقال روی TF Zn	مس ساقه Shoot Cu (mg kg ⁻¹)	مس ریشه Root Cu (mg kg ⁻¹)	فاکتور انتقال مس CuTF
C5	214.0 ab	105.7 d	2.01 a	21.1 a	35.4 a	0.59 a
C10	213.3 ab	120.3 d	1.73 ab	20.1 a	34.8 a	0.55 a
A5	174.7 bc	117.3 d	1.58 ab	21.4 a	36.4 a	0.58 a
A10	163.3 bc	214.0 b	0.77 e	20.3 a	34.4 a	0.59 a
O5	146.0 cd	202.3 bc	0.81 ed	20.8 a	35.2 a	0.58 a
O10	163.3 bcd	128.7 d	1.27 bcd	21.6 a	37.0 a	0.58 a
Mix	242.0 a	278.3 a	0.87 cde	22.9 a	36.1 a	0.63 a
S	139.7 cd	139.0 d	1.02 cde	22.3 a	35.1 a	0.63 a
Control	121.0 d	95.0 d	1.31bc	21.2 a	34.8 a	0.61 a

داده‌های با حروف مشابه در داخل هر ستون اختلاف آماری در سطح احتمال ۵ درصد نشان ندادند

Means with different letters within the same column are significantly different (LSD, $p \leq 0.05$)

انتقال یکدیگر از ریشه به اندام هوایی گیاه گزارش نموده‌اند (۷، ۸، ۳۲ و ۴۲). این بخش از نتایج مشابه نتایج تحقیق زلفی‌باوریانی و مفتون (۴۵) می‌باشد. آنان نیز در تحقیقی به بررسی تأثیر روی و مس و شکل‌های شیمیایی آنها بر رشد و ترکیب شیمیایی برنج در یک خاک آهکی پرداختند. نتایج آنان حاکی از ارتباط منفی بین این دو عنصر در گیاه بود. به‌طوری‌که با افزایش رشد گیاه و غلظت و جذب کل روی، غلظت مس کاهش پیدا کرد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی کاربرد اسیدهای آلی و معدنی در ذرت نشان داد که در بین تیمارهای مختلف، تیمار گیاهان با اسید سیتریک بیشترین تأثیر را بر رشد و عملکرد ذرت داشت. سایر تیمارها نسبت به تیمار شاهد تأثیر معنی‌داری بر عملکرد نداشتند. به‌طور کلی اسیدهای آلی و اسید سولفوریک باعث افزایش غلظت نیتروژن و فسفر در ریشه و بخش هوایی نسبت به تیمار شاهد شدند. تیمار با اسید سولفوریک همچنین منجر به افزایش غلظت پتاسیم و منگنز در بافت گیاهان نسبت به تیمار شاهد شد. تیمار با مخلوط اسیدهای آلی نیز منجر به افزایش غلظت آهن و روی در ساقه و ریشه نسبت به تیمار شاهد داشت. هیچ‌کدام از تیمارها تأثیر معنی‌داری بر غلظت مس در گیاه نداشتند. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کاربرد اسید سیتریک در مزارع برای افزایش عملکرد کمی ذرت و غلظت عناصر غذایی در آن مفید می‌باشد. استفاده از سایر اسیدها نیز منجر به افزایش غلظت عناصر غذایی در اندام‌های گیاه ذرت می‌شود.

بعد از تیمار تلفیقی می‌توان تیمار اسید سیتریک (هر دو غلظت) را در افزایش غلظت روی ساقه مؤثرترین تیمار دید اگرچه به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با تیمار تلفیقی نداشتند. غلظت روی در محلول خاک و دسترسی آن برای گیاهان به وسیله واکنش‌های جذب در سطح مواد کلوئیدی خاک کنترل می‌شود (۳ و ۶) که بخشی از عملیات جذب و قابلیت دسترسی روی به وسیله مواد جذب کننده مثل اسیدهای آلی به انجام می‌رسد (۲۲)، به‌طوری‌که اسید سیتریک با تشکیل کمپلکس‌های محلول با روی موجب کاهش جذب توسط ذرات خاک و افزایش غلظت روی محلول خاک می‌شود (۳۰) و می‌توان این چنین استنباط کرد که در تحقیق حاضر ترکیب اسیدهای آلی به‌ویژه اسید سیتریک باعث جذب روی توسط گیاه و افزایش غلظت آن در اندام هوایی گیاه گردیده است. نکته قابل توجه این است که در تیمار اسید سیتریک (هر دو غلظت) کمترین غلظت عنصر روی در ریشه گیاه دیده شد ولی به معنای اثر کمتر آن نیست زیرا در این غلظت‌ها عمده جذب به اندام هوایی منتقل شده است.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که در تمامی گیاهان تحت تیمارها، از لحاظ غلظت مس اندام هوایی، ریشه و فاکتور انتقال این عنصر اختلاف معنی‌داری وجود نداشت و به‌عبارتی هیچ‌کدام از تیمارها تأثیر معنی‌داری بر غلظت این عنصر در گیاه نداشتند (جدول ۷). علاوه بر تأثیر عوامل محیطی متعدد در قابلیت استفاده و جذب روی و مس، غلظت هرکدام از این عناصر در خاک می‌تواند بر قابلیت استفاده و جذب دیگری تأثیر بگذارد (۴۴ و ۷). مطالعاتی در ارتباط با تأثیر روی و مس در کاهش جذب یکدیگر وجود دارد که اغلب علت آن را رقابت این دو عنصر در ریزوسفر ریشه و یا جلوگیری آنها در

منابع

- 1- Akhtar M., Yaqub M., Naeem A., Ashraf M., and Hernandez V.E. 2016. Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. Journal of the Science of Food and

- Agriculture, 96:3701-3707.
- 2- Azizabadi E., Golchin A., and Delavar M.A. 2014. Effect of potassium and drought stress on growth indices and mineral content of safflower leaf. Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture, 5: 65-80. (In Persian with English abstract).
- 3- Backes C.A., McLaren R.G., Rate A.W., and Shift R.S. 1995. Kinetic of cadmium and cobalt desorption from iron and manganese oxides. Soil Science Society of America Journal, 59: 778-785.
- 4- Broadley M.R., White P.J., Hammond J.P., Zelko I., and Lux A. 2007. Zinc in plants. New Phytologist, 173:677-702.
- 5- Broschat T. K. 2006. Effects of Phosphorous and Phosphoric Acids on Growth and Phosphorus Concentrations in Container-grown Tropical Ornamental Plants. Technology and Product Reports, 16 (1):105-108.
- 6- Cayton M. T., Royes E. D., and Neve H. V. 1985. Effect of zinc fertilization on the mineral nutrition of rice differing in tolerance to zinc deficiency. Plant Soil, 87: 319– 327.
- 7- Choudhary F. M., and Loneragan J.F. 1970. Effect of nitrogen, copper and zinc fertilizers on the copper and zinc nutrition of wheat plants. Australian Journal of Agricultural Research, 21: 865–879.
- 8- Entezari M., Shariatmadari H., Jalalian A., and Taban M. 2012. Zinc and manganese nutrition of acacia, elm and plane trees in Isfahan landscape through hole mulching. Iranian Journal of Soil and Water Research, 43: 175-182. (In Persian with English abstract)
- 9- Etemadian M., Hassani A., Nourzadeh Haddad M., and Hanifei M. 2017. Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. Journal of Water and Soil Conservation, 24(5):73-91. (In Persian with English abstract)
- 10- Ezawa T., Smith S.E., and Smith F.A. 2002. P metabolism and transport in AM fungi. Plant and Soil, 244:221-230.
- 11- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane J.H., Topp G.C. (Eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Book Series.
- 12- Gerke J., Römer W., and Jungk A. 1994. The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L.; effects on soil solution concentrations of phosphate, iron, and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples of an oxisol and a luvisol. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 157(4):289-94.
- 13- Hashmi Z.U.H., Khan M.J., Akhtar M., Sarwar T., and Khan M.J. 2017. Enhancing phosphorus uptake and yield of wheat with phosphoric acid application in calcareous soil. Journal of the Science of Food and Agriculture, 97:1733-1739.
- 14- Jiang Y.D., He Z.L., and Yang X.E. 2007. Effect of pH, organic acids, and competitive cations on mercury desorption in soils. Chemosphere, 69:1662-1669.
- 15- Jones D.L., and Darrah P.R. 1994. Role of root derived organic-acid in the mobilization of nutrient from the rhizosphere. Plant and Soil, 166:247-257.
- 16- Kalra Y. 1997. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC press, London.
- 17- Khademi Z., Jones D. L., Malakouti M. J., Asadi F., and Ardebili M. 2009. Organic acid mediated nutrient extraction efficiency in three calcareous soils. Australian Journal of Soil Research, 47:213-220.
- 18- Ma L.Q., Komar K.M., Tu C., Zhang W., Cai Y., and Kennelley E.D. 2001. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature, 409(6820):579-579
- 19- Korte N., Skopp J., Fuller W., Niebla E., and Alesii B. 1976. Trace element movement in soils: Influence of soil physical and chemical properties. Soil Science, 122:350-359.
- 20- Labrada F. P., Mendoza A. B., Aguilar L. A. V., and Torres V. R. 2016. Citric acid in the nutrient solution increases the mineral absorption in potted tomato grown in calcareous soil, Pakistan Journal of Botany, 48 (1):67-74.
- 21- Mahmoodabadi M., Yazdanpanah N., Sinobas L.R., Pazira E., and Neshat A. 2013. Reclamation of calcareous saline sodic soil with different amendments (I): Redistribution of soluble cations within the soil profile. Agricultural Water Management, 120:30-38. (In Persian with English abstract)
- 22- Mesquite M.E., and Vierira J.M. 1996. Zinc adsorption by a calcareous soil. Copper interaction. Ceoderma, 69: 137-146.
- 23- Moafpourian G. 1995. The effect of zinc sources and sulfuric acid on growth and zinc uptake of maize plants and the chemical forms in the soil. MS thesis, Shiraz University, Iran. (In Persian)
- 24- Motsara M.R., and Roy R.N. 2008. Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis (Vol. 19). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 25- Najafi N., Parsazadeh M., Tabatabaei S.J., and Oustan S. 2010. Effects of nitrogen form and pH of nutrient solution on the uptake and concentrations of potassium, calcium, magnesium and sodium in root and shoot of spinach plant. Water and Soil Science, 20: 111-131. (In Persian with English abstract)
- 26- Osorio D., and Mix K. 2016. Effects of organic acids application on olsen-extractable P and eggplant (*Solanum melongena*) yield. International Journal of Plant & Soil Science, 10(35):1-12.
- 27- Pacheco M. M. M., Garcia A. F., Gonzalez E. V., and Villegas M. A. C. 2011. Effect of citric acid on the

- proteolytic activity of *Zea mays* L., *Ciência e Agrotecnologia*, 5 (35):908-915. (In Spanish with English abstract)
- 28- Paul E.A. 2007. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Third edition. Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- 29- Paech K., and Tracey M.V. 2013. *Modern Methods of Plant Analysis*. Springer Science & Business Media. Verlag Berlin Heidelberg.
- 30- Piry M., and Sepehr E. 2015. Effect of citric acid on characteristics of zinc sorption in calcareous soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 46: 781-790. (In Persian with English abstract)
- 31- Poozeshi R., Zabihi H.R., Ramazani Moghadam M.R., Rajabzadeh M., and Mokhtari A. 2011. Yield and yield components of grape (*Vitis vinefera* cv. peykani) as affected by foliar application of zinc, humic acid and acetic acid. *Journal of Horticulture Science*, 25: 351-360. (In Persian with English abstract)
- 32- Rashid A., Choudhary F.M., and Sharif M. 1976. Micronutrient availability to cereals from calcareous soils. III. Zinc absorption by rice and its inhibition by important ions in submerged soils. *Plant and Soil*, 45:613- 623.
- 33- Rasouli-Sadaghiani M., Dareghayedi B., Khodaverdiloo H., and Moradi N. 2015. Effect of organic acids on sorption and immobilization of Fe in acidic and calcareous soils. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5:215-228. (In Persian with English abstract)
- 34- Rengel Z., and Romheld V. 2000. Root exudation and Fe uptake and transport in wheat genotypes differing in tolerance to Zn deficiency. *Plant and Soil*, 222:25-34.
- 35- Romheld V., and Awad F. 2000. Significance of root exudates in acquisition of heavy metal from a contaminated calcareous soil by graminaceous species. *Journal of Plant Nutrition*, 23:1857-1866.
- 36- Sadiq M., Hassan G., Mehdi S., Hussain N., and Jamil M. 2007. Amelioration of saline-sodic soils with tillage implements and sulfuric acid application. *Pedosphere*, 17:182-190.
- 37- Sarikhani M.R., Malboubi M.A., and Ebrahimi M. 2014. Phosphate solubilizing bacteria: Isolation of bacteria and phosphate solubilizing genes, mechanism and genetics of phosphate solubilization. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 6:77-110. (In Persian with English abstract)
- 38- Shao J.F., Yamaji N., Shen R.F., and Ma J.F. 2017. The Key to Mn homeostasis in plants: regulation of Mn transporters. *Trends in Plant Science*, 22(3):215-224
- 39- Simpson R.J. 1986. Translocation and metabolism of nitrogen: whole plant aspects. In: Lambers H., Neeteson J.J., Stulen I. (eds) *Fundamental, Ecological and Agricultural Aspects of Nitrogen Metabolism in Higher Plants*. Developments in Plant and Soil Sciences, vol 19. Springer, Dordrecht.
- 40- Taheripur A., Kiani S., and Hosseinpour A. 2015. 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)
- 41- Tomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Series.
- 42- Wallace A., Romney E.M., and Clark R.B. 1980. Corn inbreds differing in efficiency to Zn. *Journal of Plant Nutrition*, 2: 225-229.
- 43- Yang C.H., and Crowley D.E. 2000. Rhizosphere microbial community structure in relation to root location and plant iron nutritional status. *Applied and Environmental Microbiology*, 66:345-351.
- 44- Zhang F.S., Treeby M., Romheld V., and Marschner H. 1991. Mobilization of iron by phytosiderophores as affected by other micronutrients. *Plant and Soil*, 130:173-178.
- 45- Zolfi Bavaryani M., and Maftoon M. 2011. Effect of zinc, copper and their chemical forms on growth and chemical composition of rice in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil Science*, 14: 111-120. (In Persian with English abstract)



Application Effects of Organic Acids on Growth of Forage Corn and Concentration of Nutritional Elements in Shoots and Roots

A. Hassani^{1*}- M. Etemadian²- M. Nourzadeh Haddad³- M. Hanifei⁴

Received: 04-12-2017

Accepted: 23-06-2018

Introduction: In calcareous soils of Iran, using fertilizers that reduce soil pH over long periods are prioritized. Reducing pH in calcareous soils increases the concentration of essential nutrients such as phosphorus, iron, zinc, copper and manganese in the soil solution. The use of organic and inorganic acids in calcareous soils may also have other advantages in addition to gradually decreasing the soil solution pH. The effect of organic and minerals acids on plant growth and uptake of essential nutrients has not been studied. The aim of this study was to evaluate the effect of organic acids like acetic, citric and oxalic acid and mineral acids like sulfuric on the growth of forage corn.

Materials and Methods: The experiment was based on randomized complete block design and carried out in pots in a greenhouse. A calcareous soil with electrical conductivity of 0.86 dS m^{-1} and organic matter of 4.3 g kg^{-1} was collected from research farm of University of Zanjan. Treatments were T1 & T2: citric acid with concentration of 5 and 10 mM (C_5 & C_{10}), T3 & T4: acetic acid at a concentration of 5 and 10 mM (A_5 & A_{10}), T5 & T6: oxalic acid at a concentration of 5 and 10 mM (O_5 & O_{10}), T7: mixture of citric, acetic and oxalic acid each at a concentration of 3.33 mM (mix), T8: sulfuric acid at a concentration of 5 mM (S), and T9: control. Treatments were applied in three stages: immediately after sowing, four-leaf and eight-leaf stages. Irrigation of pots was done with water with EC value of $400 \mu\text{S/cm}$. Considering the possible effect of acids on increasing the availability of phosphorus, potassium, iron, zinc, copper and manganese, fertilization was done only based on nitrogen demand and 0.55 g urea was added to each pot (equivalent to 200 kg ha^{-1}) with irrigation water in three steps. The shoots of plant samples were harvested after 50 days and the roots were carefully removed from the soil. Some growth related characteristics such as stem height, fresh weight, dry weight, and moisture content of vegetable tissue were also measured. Concentration of nitrogen, potassium, phosphorous, iron, zinc, manganese and copper in roots and shoots was measured. Translocation factor (TF) indicating the transfer rate of the elements from root to shoot was obtained by dividing the concentration of the element in the shoot by that in the root.

Results and Discussion: The results showed the significant effects of the treatments on the growth factor (fresh weight, dry weight and plant height). The percentage of moisture content was the same in all treatments. Citric acid treatment (T2) significantly increased fresh weight of shoot (18.3 percent) and dry weight (20.9 percent) of the plant. Organic acids also increased the concentration of nitrogen in shoots and roots. The concentration of nitrogen in the shoots was roughly twice as compared with that in the plant root. As for the potassium treatments, except for A_{10} treatment (T4) (the lowest concentration), other treatments did not show a significant difference with control. The highest concentration of potassium in roots was observed in sulfuric acid treatment (T8). The highest translocation factor of potassium (3.34) was observed in O_{10} treatment (T6). The results indicated a positive effect of 5 mM citric acid, acetic acid, mix treatment and sulfuric acid on shoot phosphorus and the positive effect of acetic acid and mix treatment on the phosphorus root. Citric acid treatments (T1 and T2) were the most effective treatments in increasing the concentration of iron (289 mg kg^{-1}) in shoots. For roots, C_{10} treatment (T2) and Mix treatment (T7) showed the highest iron concentration. The highest TF for iron was observed in A_{10} treatment (T4). Acetic acid treatments (both concentrations), and sulfuric acid were more effective than other treatments and significantly increased the manganese concentration of the shoots. Sulfuric acid also caused a significant increase in the manganese concentration of the root. Acetic acid treatment (T5) showed the highest amount of TF for manganese. The amount of zinc element in shoots and roots was significantly affected by the mix treatment (T7). There was no significant difference between all Cu treatments.

1 and 2- Assistant Professor and M.Sc. Graduate, Department of Soil Science, University of Zanjan

(*- Corresponding Author Email: Akbar.hassani@znu.ac.ir)

3- Ph.D. Graduate, Department of Soil Science, Tarbiat Modares University

4- Ph.D. Graduate, Department of Plant Breeding, Tarbiat Modares University

Conclusions: In general, application of citric acid in both concentrations is useful to increase the biological yield and product quantity in maize farms. These treatments increased fresh and dry weight of shoots and roots. Acetic acid seems to improve translocation of elements in plants. The use of other acids is likely to enhance concentration of nutritional elements in roots and shoots.

Keywords: Calcareous soil, Citric, Corn, Organic and mineral acids

تلقیح باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد، هدایت روزنه‌ای و شاخص کلروفیل ذرت در شرایط کمبود پتاسیم

مهديه ليلاسی مرند^۱ - محمدرضا ساريخانی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

چکیده

پتاسیم از عناصر ضروری گیاهان بوده که نقش مهمی در رشد و نمو گیاهان داشته و آزادسازی زیستی آن از طریق باکتری‌های آزادکننده پتاسیم مورد توجه است. این آزمایش با هدف بررسی تأثیر باکتری‌های مختلف بر تأمین پتاسیم و رشد رویشی گیاه ذرت انجام گرفت. در این تحقیق، ۱۰ جدایه باکتری همراه با تیمارهای کودی (سولفات پتاسیم به میزان ۵۰٪ و ۱۰۰٪ توصیه کودی) و تیمار شاهد (بدون تلقیح باکتری و کود) در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد به جز وزن خشک ریشه، وزن تر کل و قطر ساقه، بقیه پارامترها متأثر از تیمارهای آزمایش بودند. بیش‌ترین مقادیر به‌دست آمده از ارتفاع گیاه و وزن تر و خشک اندام هوایی، به ترتیب برابر با ۱۰۰/۸ سانتی‌متر، ۲۶۵/۶ و ۴۴/۴ گرم، در تیمار کودی ۵۰٪ مشاهده شد. بیش‌ترین وزن تر ریشه (۱۸۷/۲ گرم) در تیمار باکتری *Pseudomonas sp. Az-8*، بیش‌ترین وزن خشک کل (۶۸/۶ گرم) در تیمار باکتری *Enterobacter sp. S16-3* و بالاترین میزان شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ای (به ترتیب ۹/۶ و ۰/۰۹۷) در تیمار تلقیح شده با *Azotobacter chroococcum 14SP2-1* مشاهده شد. آنالیز عناصر در بافت گیاهی نشان داد که بیش‌ترین مقدار پتاسیم اندام هوایی و ریشه را به ترتیب در تیمار ۱۰۰٪ توصیه کودی (۱۰۷۷/۳ میلی‌گرم بر وزن اندام هوایی) و *Pseudomonas sp. Az-8* (۴۲۱/۴ میلی‌گرم بر وزن ریشه) به دست آمد. با در نظر گرفتن مقدار پتاسیم جذب شده و وزن خشک کل، باکتری‌های *Pseudomonas sp. Az-8*، *A. chroococcum 14SP2-1* و *Enterobacter sp. S16-3* مؤثرتر بوده و می‌توان برای سایر آزمایشات پیشنهاد نمود.

واژه‌های کلیدی: *انتروباکتر*، باکتری آزادکننده پتاسیم، پتارور، تلقیح باکتری، کود زیستی

مقدمه

می‌تواند از طریق افزایش رنگیزه‌های فتوسنتزی، میزان کلروفیل، سطح برگ، هدایت روزنه‌ای، فعالیت فتوسنتزی و انتقال مواد حاصل از فتوسنتز، باعث افزایش ماده خشک شود. در مطالعه‌ای دیگر اجیلا و همکاران (۱۲) بیان کردند مصرف مقادیر کافی از کود پتاسیم علاوه بر افزایش تولید ماده خشک و توسعه سطح برگ، تا حد زیادی از طریق کاهش پتانسیل اسمزی باعث نگهداری آب در بافت‌های گیاهی تحت شرایط تنش آبی می‌گردد، به طوری که منجر به پایداری فتوسنتز خالص، تعرق و هدایت روزنه‌ای در شرایط تنش خشکی و شرایط بدون تنش خواهد شد.

عواملی که باعث ایجاد کمبود این عنصر شده، کشت گیاهان پرنیاز، کشاورزی متمرکز و نیز آبیویی، فرسایش و رواناب و جایگزین نشدن پتاسیم برداشت شده توسط گیاهان، می‌باشند (۴۰). میکروارگانیسم‌ها نقش مهمی را در تغییر و تبدیل عناصر غذایی از فرم غیرقابل دسترس به فرم قابل دسترس برای گیاهان ایفا می‌کنند.

پتاسیم به همراه نیتروژن و فسفر یکی از سه عنصر ضروری برای رشد گیاه تلقی می‌شود و یکی از منابع تجدیدنپذیر هست و در بین عناصر غذایی اصلی معمولاً فراوان‌ترین عنصر در خاک به شمار می‌رود. این عنصر نقش‌های حیاتی در متابولیسم گیاه از قبیل فتوسنتز، انتقال موادی نظیر قندها و نشاسته در گیاه، تنظیم منافذ روزنه گیاهان، فعال‌سازی بیش از ۶۰ آنزیم، افزایش کیفیت محصول، افزایش مقاومت گیاه به آفات و بیماری‌ها دارد (۳۵ و ۴۳). در مورد تأثیر مستقیم و مهم پتاسیم بر روی شاخص‌هایی همچون کلروفیل و هدایت روزنه‌ای، مارشبول و همکاران (۲۶) اظهار داشتند که پتاسیم

۱ و ۲- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*) نویسنده مسئول: (Email: rsarikhani@yahoo.com)

در جدایه S14-3 به دست آمد. همچنین جدایه‌های S19-1 و S21-1 بیش‌ترین میانگین وزن خشک و مقدار پتاسیم ریشه را داشتند. خرمالی و همکاران (۲۰) در تحقیقی تأثیر ریزوسفر گیاه سورگوم و باکتری‌های *باسیلوس* را بر آزادسازی پتاسیم از کانی گلوکونیت بررسی کردند. مطالعات نشان داد در بسترهایی که محلول غذایی پتاسیم‌دار و محلول غذایی بدون پتاسیم دریافت کرده‌اند عمل هوادهی در جزء رس صورت گرفته است که این تغییر در تیمار محلول غذایی بدون پتاسیم بیش‌تر بوده است. همچنین آن‌ها مشاهده نمودند که تامین پتاسیم و عدم افزودن آن اختلاف معنی‌داری بر وزن خشک گیاه نداشته است، که نشان‌دهنده برآورده شدن نیاز پتاسیمی گیاه از منبع گلوکونیت بوده است.

به طور کلی می‌توان گفت تلقیح باکتری‌های سیلیکاتی یا آزادکننده پتاسیم می‌تواند فسفر و پتاسیم قابل استفاده در خاک را از طریق تولید اسیدهای آلی و سیدروفور و دیگر مواد محرک رشد گیاه افزایش داده و منجر به جذب بیش‌تر این دو عنصر توسط گیاه شود (۳۲). اثرات مثبت باکتری‌های آزادکننده پتاسیم در گیاهان پنبه و کلزا (۴۱)، خیار و فلفل (۱۵)، سورگوم (۳)، گندم و ذرت (۴۶) و سودان گراس (۵ و ۶) گزارش شده است. با توجه به اهمیت عنصر پتاسیم در تغذیه گیاهان و تأثیر به‌سزای این عنصر در بهبود کیفیت و کمیت محصولات، این آزمایش گلدانی به منظور شناسایی گونه میکروبی موفق و کارآمد از بین گونه‌های میکروبی متعلق به جنس‌های *انتروباکتر*، *سودوموناس* و *ازتوباکتر*، در بهبود رشد گیاه ذرت و تأمین پتاسیم گیاه در یک خاک با کمبود پتاسیم، انجام شد. از طرفی به علت ضرورت استفاده از روش‌های زیستی در تأمین نیازهای غذایی گیاهان و در نهایت نیازهای غذایی جوامع بشری، این تحقیق گامی در جهت معرفی گونه باکتری کارآمد برای انجام آزمایشات بعدی است تا بتوان در صورت موفقیت آزمایش از آن در مراحل بعدی در تولید کود زیستی بهره جست. قابل ذکر است که تا کنون تنها یک برند تجاری کود زیستی پتاسیمی به نام پتابارور در کشور عرضه شده است که خود این مسأله نیاز به تحقیق در این زمینه را بیش‌تر آشکار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

تعداد ۱۰ جدایه باکتریایی در این آزمایش استفاده شدند که شامل *Azotobacter chroococcum*, *Enterobacter* sp. S16-3, *Pseudomonas* sp. 34A-2, 14SP2-1, *Pseudomonas* sp. Az-8, Az-48, S11-2 و 36A-2L تأمین شده از بانک میکروبی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز و جدایه‌های S19-1+S14-3 *Pseudomonas* sp. مورد استفاده در کود زیستی پتابارور (محصول شرکت زیست‌فناور سبز) و

به طوری که به واسطه فعالیت آن‌ها مقدار مواد در دسترس و مغذی در خاک افزایش یافته و سبب افزایش تولید و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی می‌شود (۱۹). به کارگیری باکتری‌های ریزوسفری محرک رشد گیاه مثل باکتری‌های آزادکننده پتاسیم یک راه حل پایدار در جهت تغذیه بهتر گیاه و تولید آن خواهد بود، لذا استفاده از باکتری‌های آزادکننده پتاسیم (۴)، یک روش امیدبخش برای افزایش پتاسیم قابل استفاده در خاک بوده و با کاربرد کودهای زیستی که حاوی آزادکنندگان پتاسیم هستند، نه تنها باروری خاک افزایش پیدا می‌کند بلکه باعث افزایش عملکرد محصولات، مقاومت در برابر بیماری‌ها و کاهش مصرف کودهای شیمیایی می‌شود (۴۲ و ۴۴).

نتایج مثبت استفاده از باکتری‌ها در تأمین نیاز پتاسیم گیاه و بهبود رشد گیاهان در مطالعات زیادی گزارش شده است. به عنوان مثال لین و همکاران (۲۱) گزارش کردند که در اثر تلقیح باکتری حل‌کننده سیلیکات *Bacillus mucilaginosus* به گیاه گوجه‌فرنگی، بیوماس به میزان ۱۲۵٪ و جذب پتاسیم و فسفر بیش از ۱۵۰٪ در مقایسه با شاهد افزایش یافت. پراجاپاتی و همکاران (۳۳) نیز در یک آزمایش گلدانی با تلقیح باکتری آزادکننده پتاسیم *E. hormaechei* و *Aspergillus terreus* به گیاه بامیه در خاکی با مقدار پتاسیم کم و در حضور فلدسپار، افزایش مقدار پتاسیم در گیاه بامیه را گزارش کردند. دردی‌پور و همکاران (۹) تأثیر *آزوسپیریوم لیپوفروم* و *ازتوباکتر کروکوکوم* را بر آزادسازی پتاسیم خاک در کشت سویا بررسی کرده و مطالعات آن‌ها نشان داد که تلقیح باکتری بر پارامترهای رشد گیاه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده و گیاهان تلقیح شده با *ازتوباکتر* نسبت به گیاهان تلقیح شده با *آزوسپیریوم* و تیمار بدون باکتری وزن خشک و غلظت پتاسیم بالاتری دارند. مدنی و همکاران (۲۳) تأثیر ۱۶ جدایه باکتری را بر رشد گوجه‌فرنگی در بستر شن و کانی موسکویت در شرایط استریل بررسی کردند. نتایج نشان از اثر جدایه‌های باکتریایی بر ارتفاع گیاه در پایان دوره، وزن تر و خشک ریشه، وزن خشک کل، غلظت و مقدار پتاسیم اندام هوایی و ریشه گیاه بود. به طوری که بیش‌ترین میانگین به دست آمده برای مقدار پتاسیم جذب‌شده در میان جدایه‌ها مربوط به S10-3 با افزایش ۷۰٪ و S21-1 با افزایش ۴۰٪ نسبت به شاهد بوده و شناسایی مولکولی جدایه‌های برتر نشان داد که متعلق به جنس *سودوموناس* هستند. دیلمی‌راد و همکاران (۸) در پژوهشی ۵ جدایه میکروبی *Pseudomonas* spp. شامل S6-6, S10-3, S14-3 و S19-1 را بر بهبود رشد و افزایش جذب پتاسیم گیاه گوجه‌فرنگی در خاک با پتاسیم پایین ولی با حضور ریزجانداران بومی (شرایط غیراستریل) بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد بیش‌ترین وزن تر و خشک بخش هوایی در تیمار مصرف پتاسیم ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (۵۰٪) به دست آمد و سطح ۱۰۰٪ فاکتور کودی باعث کاهش غلظت فسفر، کلسیم، منیزیم بخش هوایی و ریشه شد. بیش‌ترین غلظت پتاسیم بخش هوایی و مقدار پتاسیم ریشه

گرفتند. کود پتاسیمی مورد استفاده در تیمارهای کودی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سولفات پتاسیم به ترتیب به میزان ۳۸/۵ و ۷۶/۹ میلی گرم به ازای هر کیلوگرم خاک بود (۲۴). لازم به ذکر است بقیه عناصر پرمصرف و کم‌مصرف به طور کامل بر اساس آزمون خاک (۲۴ و ۳۸) در گلدان‌ها تأمین شد (جدول ۲). آزمایش تا انتهای فاز رویشی و به مدت ۲ ماه به طول انجامید. در طی رشد پارامترهای ارتفاع گیاه، قطر ساقه، شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ای مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. ارتفاع گیاه از ابتدای طوقه تا انتهای بلندترین برگ گیاه مد نظر بود. قطر ساقه در بخش تقریباً برابر در همه بوته‌ها و در ارتفاع حدودی ۲ سانتی‌متر از ابتدای طوقه با کولیس اندازه‌گیری شد. شاخص کلروفیل برگ پس از رشد کامل برگ‌ها و در پایان دوره رشد با استفاده از دستگاه کلروفیل سنس (Hansatech مدل C101) اندازه‌گیری شد. برای این منظور چهار برگ سالم و شاداب از هر گلدان انتخاب شد و پهن‌ترین بخش برگ میان انبرک دستگاه قرار گرفت سپس شاخص کلروفیل آن اندازه‌گیری شد. میانگین این قرائت‌ها در نهایت به عنوان شاخص کلروفیل برگ برای آن گلدان در نظر گرفته شد. برای اندازه‌گیری هدایت روزنه‌ای، ابتدا دستگاه (Delta-T Device - UK - Cambridge) با شرایط رطوبتی گلخانه کالیبره شده و سپس قرائت از برگ‌های بالغ و سالم گیاه انجام گرفت. چهار برگ از هر گلدان انتخاب و میانگین مقادیر به عنوان شاخص هدایت روزنه‌ای آن گلدان گزارش شد.

جدایه 1-44 *Bacillus* sp. از بانک میکروبی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان بوده‌اند. سوسپانسیون باکتریایی پس از کشت شبانه باکتری‌ها در ۳۰ میلی‌لیتر محیط کشت NB مایع به ۱۰ گرم حامل باگاس و پرلیت (۱:۱) که دارای رطوبت وزنی اولیه ۱۵٪ بود، افزوده شدند. خاک مورد استفاده در آزمایش از ایستگاه تحقیقاتی خلعت‌پوشان نمونه‌برداری شد. در این خاک پتاسیم قابل استفاده در حد کفایت نیاز گیاه نبود (جدول ۱) اما منابع پتاسیم غیرتبادلی می‌توانست جوابگوی نیاز گیاه باشد. خاک پس از الک شدن، در دمای ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱/۲ اتمسفر استریل شد. بذره‌های ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) مورد استفاده در آزمایش توسط اتانول ۱۰٪ (۳۰ ثانیه) و هیپوکلریت سدیم ۵٪ (۱۰ دقیقه) ضدعفونی شدند (۱). بذور به طور کامل با سوسپانسیون باکتری که به حامل باگاس و پرلیت افزوده شده بود، آغشته شدند و در گلدان‌های ۳ کیلوگرمی در عمق ۳ تا ۴ سانتی‌متری زیر سطح خاک کشت شدند. تعداد ۵ بذر در هر گلدان کشت شد و پس از جوانه زدن به ۲ بوته در هر گلدان تقلیل یافت. در طی رشد گیاه، رطوبت ۰/۸ AFC در گلدان‌ها تأمین شد. آزمایش با در نظر گرفتن ۱۲ تیمار و ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی به اجرا درآمد. در این آزمایش، تیمارهای تلقیح شده با جدایه‌های باکتریایی همراه با تیمارهای کودی (بر اساس آزمون خاک به میزان ۵۰٪ و ۱۰۰٪ توصیه کودی از کود سولفات پتاسیم) و تیمار شاهد منفی (بدون تلقیح باکتری و بدون کود) مورد مقایسه قرار

جدول ۱- نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

Table 1- Results of physical and chemical properties of soil

FC (w/w)	CCE %	بافت خاک Soil texture	%شن Sand	%سیلت Silt	%رس Clay	%OC	پتاسیم غیرتبادلی Non exchangeable potassium (mg/kg)	پتاسیم قابل جذب Available potassium (mg/kg)	فسفر قابل جذب Available phosphorus (mg/kg)	E _{Ce} (dS/m)	pH گل اشباع
12.57	2.58	Sandy Loam	69	13	18	0.16	410.86	198.07	3	1.4	7.56

جدول ۲- مقادیر کودهای مصرفی

Table 2- Recommended amounts of fertilizers

مقدار مورد نیاز در هر کیلوگرم خاک (میلی گرم)	کودهای مصرفی Fertilizers	عناصر Elements
Required amount per kg of soil (mg)		
266.6	Urea	N
116.6	TSP	P
160	EDDHA (6%)	Fe
30	MnSO ₄ .4H ₂ O	Mn
40	ZnSO ₄	Zn
6	H ₃ BO ₃	B
10	CuSO ₄ .5H ₂ O	Cu

با باکتری نشان از مؤثر بودن تلقیح می‌باشد و در تیمارهایی از آزمایش که تأمین عناصر غذایی در حد مطلوب بوده، با افزایش نسبی شاخص‌های رشد رویشی مواجه خواهیم شد. این صفات رشدی به صورت معنی‌دار متأثر از تیمارهای باکتریایی نبودند و به نظر با در نظر داشتن سایر صفات اندازه‌گیری شده در آزمایشات بایستی قضاوت نمود. در آزمایش شیخ‌علی‌پور و همکاران (۳۹) نیز قطر ساقه و طول ساقه متأثر از باکتری‌های *Sودوموناس* مورد استفاده در آزمایش نبود. ولی نتایج متفاوت در آزمایشات مختلف به چشم می‌خورد به عنوان مثال نتیجه آزمایش رخزادی و همکاران (۳۷) نشان داد وجود باکتری‌های *Sودوموناس فلورسنس* در ترکیب مایه‌های تلقیح، نقش مؤثری در افزایش ارتفاع بوته داشته است. ظفر و همکاران (۵۰) هم بیان کردند بر اثر تلقیح عدس با باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد میزان طول ساقه ۴۹٪ نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد.

شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ای

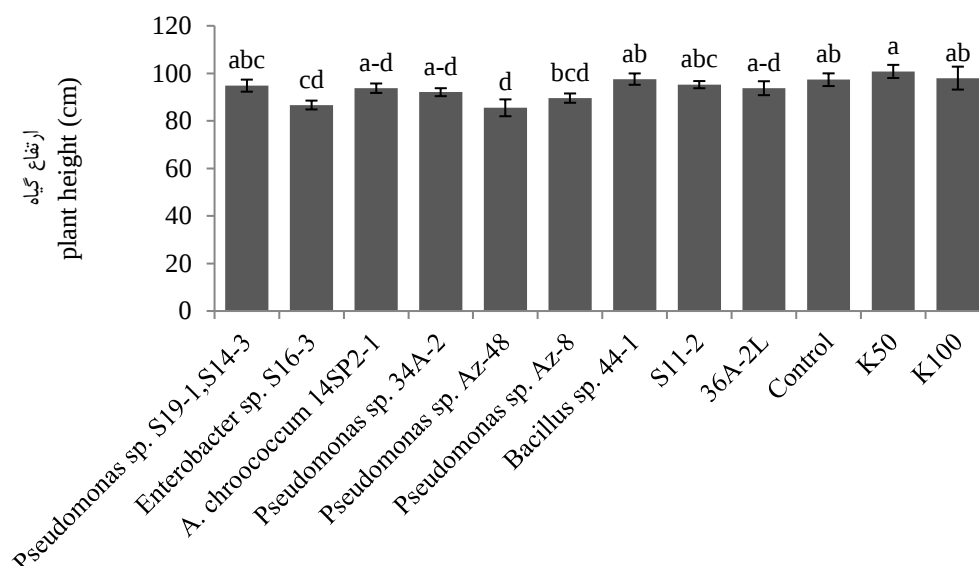
شاخص کلروفیل در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده و از میان جدایه‌ها بالاترین میزان کلروفیل در تیمار باکتری 14SP2-1 *A. chroococcum* بوده که برابر با ۹/۶ می‌باشد و با افزایش ۸۰٪ نسبت به شاهد بدون تلقیح و مصرف کود، دارای اختلاف آماری معنی‌دار با آن است (شکل ۲). هدایت روزنه‌ای در سطح احتمال ۵٪ معنی‌دار بوده و بالاترین هدایت روزنه‌ای نیز در تیمار باکتری 14SP2-1 *A. chroococcum* برابر با ۰/۰۹۷ به دست آمد (شکل ۳).

پس از برداشت گیاه، وزن تر و خشک اندام هوایی، وزن تر و خشک ریشه و همچنین وزن تر و خشک کل با ترازوی حساس توزین شد. برای خشک کردن گیاه، اندام هوایی و ریشه به طور جداگانه در پاکت‌های کاغذی به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس نمونه‌های خشک‌شده به روش ترسوزانی هضم شدند و پس از اندازه‌گیری غلظت پتاسیم به روش فلیم‌فتمتری در ریشه و اندام هوایی، مقدار پتاسیم در بافت گیاهی نیز محاسبه گردید (۴۹).

نتایج

ارتفاع گیاه و قطر ساقه

ارتفاع گیاه در سطح احتمال ۵٪ تحت تأثیر تیمارهای آزمایش قرار گرفت و بالاترین ارتفاع گیاه در تیمار کودی ۵۰٪ به مقدار ۱۰۰/۸ سانتی‌متر به دست آمد، این تیمار هر چند در مقایسه با نمونه شاهد ۳/۵٪ افزایش نشان داد اما در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۱). اگر چه در بین تیمارهای باکتریایی بالاترین ارتفاع در تیمار *Bacillus sp. 44-1* به دست آمد اما با تیمارهای کنترل کودی و تیمار شاهد اختلاف معنی‌دار نداشت و عدم وجود اختلاف معنی‌دار در همه تیمارهای باکتریایی (به جز *Pseudomonas sp. Az-48* و *Enterobacter sp. S16-3*) با تیمارهای ۵۰٪، ۱۰۰٪ و شاهد بدون تلقیح نیز مشاهده شد. پارامتر قطر ساقه تحت تأثیر تیمارهای مورد استفاده قرار نگرفت. ارتفاع گیاه و قطر ساقه شاخص‌هایی از رشد رویشی گیاه هستند که افزایش هر کدام از این شاخص‌ها در اثر تلقیح



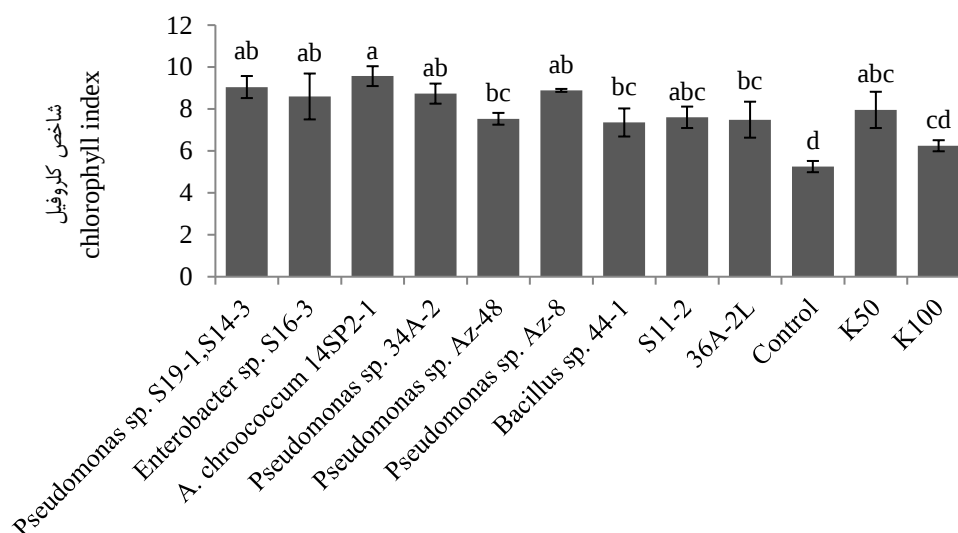
شکل ۱- تأثیر تیمارهای آزمایش بر ارتفاع گیاه
Figure 1- Effect of treatments on plant height

کلروفیل و به دنبال آن افزایش فتوسنتز در گیاه می‌تواند اتفاق بیفتد (۴۸، ۲ و ۴۵). کایینو و همکاران (۱۷) هم بیان کردند سودوموناس‌ها می‌توانند باعث افزایش معنی‌دار کلروفیل در گیاه ذرت شوند. نتیجه آزمایش دیلمی‌راد و همکاران (۸) نیز نشان داد اثر اصلی کود، اثر متقابل باکتری و کود بر شاخص کلروفیل غیرمعنی‌دار بوده در حالی‌که اثر اصلی باکتری در سطح ۵٪ بر آن مؤثر واقع شد.

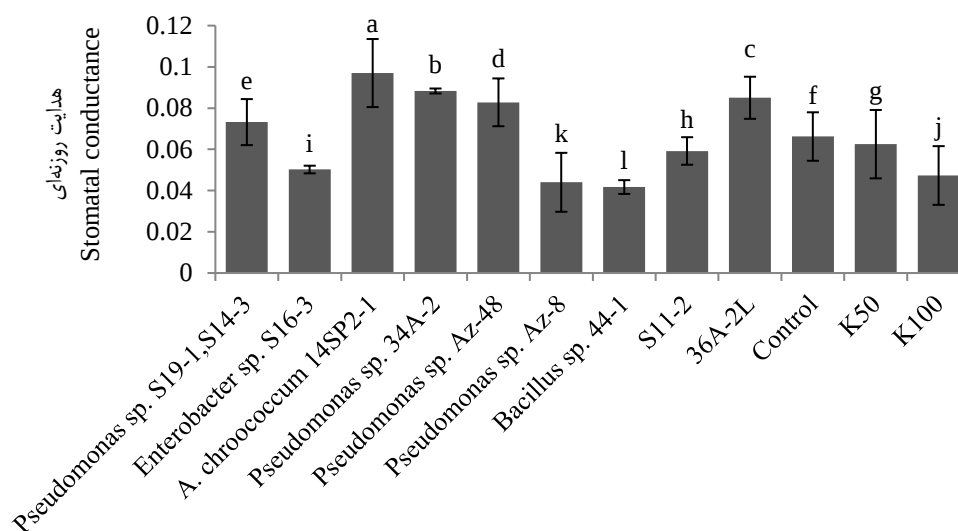
وزن تر و خشک اندام هوایی

تجزیه واریانس نتایج نشان داد وزن تر اندام هوایی در سطح احتمال ۵٪ و وزن خشک اندام هوایی در سطح احتمال ۱٪ متأثر از تیمارهای آزمایش بودند. مقایسه میانگین نتایج نشان داد در هر دو صفت، بالاترین میانگین‌ها در در تیمار کودی ۵۰٪ و تیمار کودی ۱۰۰٪ به دست آمد هر چند با برخی از تیمارهای دیگر در یک کلاس آماری قرار داشتند. در مورد وزن تر و خشک اندام هوایی تیمار کودی ۵۰٪ با مقادیر وزنی برابر با ۲۶۵/۶ و ۴۴/۴ گرم به ترتیب افزایش ۴٪ و ۵٪ نسبت به شاهد نشان داده است اما نسبت به شاهد دارای اختلاف آماری معنی‌دار نبودند (شکل ۴ و ۵). نتیجه حاصل از وزن تر و خشک اندام هوایی نشان می‌دهد، در تیمارهای کودی که احتمالاً پتاسیم در دسترس برای گیاه بیش‌تر بوده، این امر سبب افزایش رشد اندام هوایی شده است. مشابه همین نتیجه در مطالعه استادی جعفری و همکاران (۳۱) مشاهده شد و تأیید کردند با افزایش سطوح کودی بر میزان وزن خشک اندام هوایی به میزان معنی‌داری افزوده شده است.

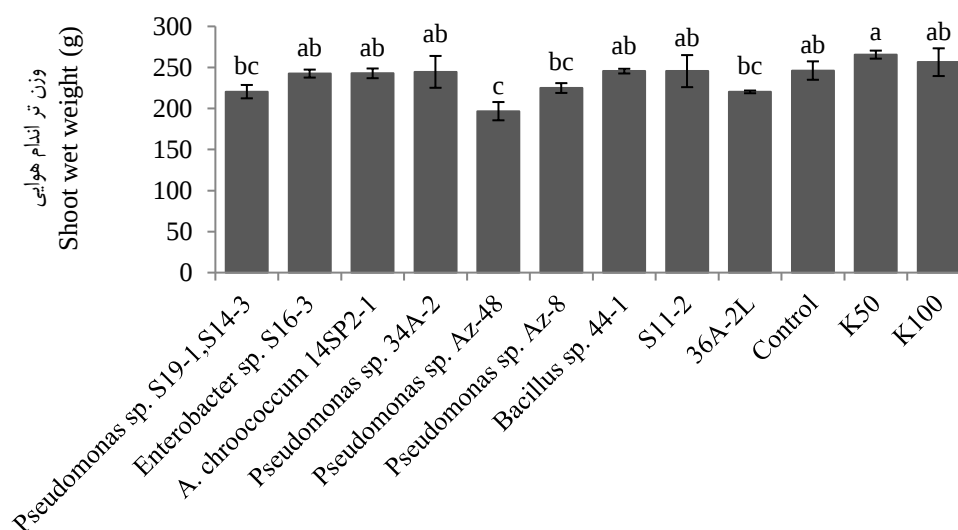
روزنه‌های هوایی نقش اساسی در روابط آبی و فتوسنتز گیاه دارند و عکس‌العمل آن‌ها به شرایط مختلف از عوامل اساسی مؤثر در رشد، نمو و تولید محصولات زراعی و باغی است و ثابت شده که افزایش تنش‌ها می‌تواند هدایت روزنه‌ای را تحت تأثیر قرار دهد (۱۶). صفاتی چون شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ای نشان‌دهنده وضعیت فتوسنتزی گیاه هستند که با وجود شرایط بهتر تغذیه‌ای گیاه می‌توانند مقادیر بالاتری را به خود اختصاص دهند. همان‌طور که مشاهده شد، جدایه 14SP2-1 که باکتری/زئوباکترکروکوکوم می‌باشد، از نظر هر دو پارامتر برتر از بقیه تیمارها بوده هر چند با برخی از جدایه‌ها در یک گروه آماری قرار دارد. به نظر این برتری می‌تواند به توان تثبیت نیتروژن این باکتری مربوط باشد. این جدایه به عنوان باکتری تثبیت‌کننده نیتروژن با تأمین نیتروژن اثر مستقیمی بر شاخص کلروفیل گیاه داشته است و علاوه بر آن می‌توان افزایش هدایت روزنه‌ای را به جذب و انتقال پتاسیم و تغییرات هورمونی که در نتیجه تلقیح این باکتری حاصل شده است، مربوط دانست. همین نتیجه در مطالعه حاجی‌بلند و همکاران (۱۴) نیز دیده شد و گزارش شد که افزایش مقدار کلروفیل و انتقال بیش‌تر پتاسیم به اندام هوایی در گیاهان تلقیح شده با/زئوباکتر را به اثر احتمالی هورمونی مانند سیتوکینین نسبت دادند که ضمن تحریک رشد ریشه، پس از انتقال به اندام هوایی، عامل افزایش کلروفیل و نیز هدایت یون‌های ضروری به اندام هوایی است. احتمالاً همین علت در آزمایش حاضر نیز صادق است. از طرف دیگر با حضور باکتری‌های محرک رشد، افزایش رشد گیاه با ترشح هورمون‌های رشد (ایندول استیک اسید و سیتوکینین) و به دنبال آن افزایش تقسیم سلولی و توسعه ریشه، افزایش میزان



شکل ۲- تأثیر تیمارهای آزمایش بر شاخص کلروفیل
Figure 2- Effects of treatments on chlorophyll index



شکل ۳- تأثیر تیمارهای آزمایش بر هدایت روزنه‌ای
Figure 3- Effect of treatments on stomatal conductance



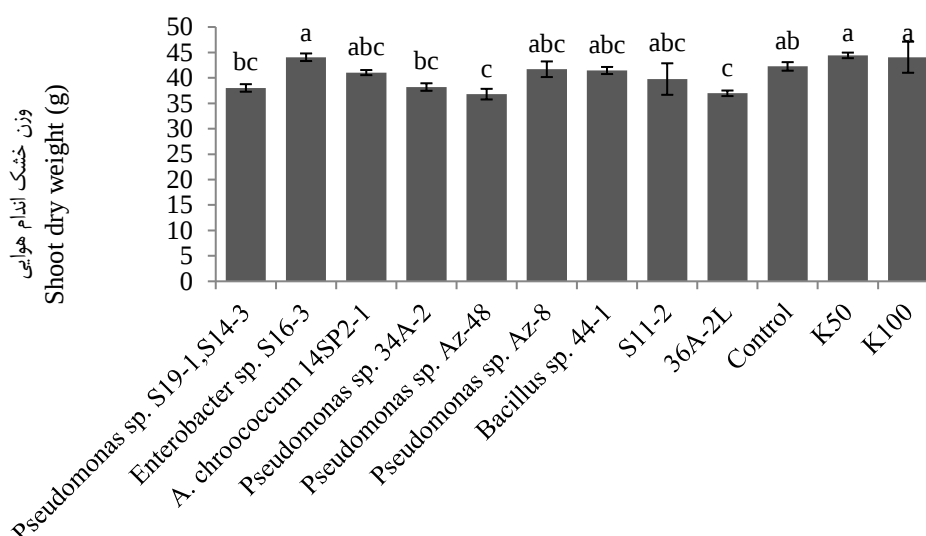
شکل ۴- تأثیر تیمارهای آزمایش بر وزن تر اندام هوایی
Figure 4- Effects of treatments on shoot wet weight

megaterium) بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار می‌باشد.

وزن تر و خشک ریشه

اثر تیمارهای آزمایش بر پارامتر وزن تر ریشه در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بود هر چند در بین تیمارهای باکتریایی مورد استفاده در این آزمایش اختلاف آماری مشاهده نشد اما بالاترین میانگین وزن ریشه در تیمار باکتری *Pseudomonas sp. Az-48* و برابر با ۱۸۷/۲ گرم بوده که با افزایش ۵۰٪ نسبت به شاهد با آن دارای اختلاف آماری معنی‌دار می‌باشد (شکل ۶).

در بین تیمارهای باکتریایی و باتوجه به صفت مهمی نظیر وزن خشک بخش هوایی، تلقیح گیاه با جدایه S16-3 وزن خشک بیش‌تری را سبب شده بود هر چند این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار نبود. در برخی موارد حتی تلقیح برخی تیمارهای باکتری باعث کاهش وزن خشک هوایی در مقایسه با شاهد بدون تلقیح شدند که شاید این موضوع به اثرات رقابتی آن با گیاه مربوط باشد. نتیجه آزمایش ظفر و همکاران (۵۰) نشان داد وزن تر و خشک ساقه عدس با تلقیح باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد به ترتیب ۳۳ و ۲۴٪ نسبت به شاهد افزایش یافتند. کشاورز زرسانی و همکاران (۱۸) گزارش کردند که اثر تلقیح شش سویه (یک سویه *Lysinibacillus fusiformis* و ۵ سویه از *B.*



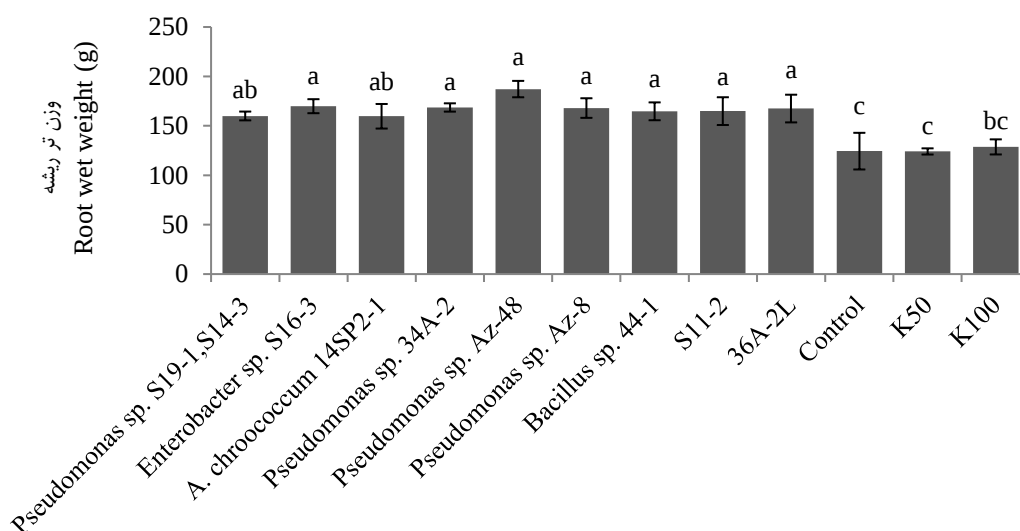
شکل ۵- تأثیر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک اندام هوایی
Figure 5- Effects of treatments on shoot dry weight

در سطح احتمال ۱٪ معنی‌دار بوده و بالاترین میانگین وزن خشک کل متعلق به تیمار باکتری *Enterobacter* sp. S16-3 بوده و برابر با ۶۸/۶ گرم می‌باشد که نسبت به شاهد بدون تلقیح و بدون مصرف کود افزایش ۷٪ را داشته است اما با آن در یک گروه آماری قرار گرفت. پس از این باکتری، باکتری *Pseudomonas* sp. Az-8 تیمارهای کودی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ بهتر عمل کرده و وزن بالاتری داشتند هر چند همگی آن‌ها در یک کلاس آماری قرار گرفتند (شکل ۷). کمترین وزن خشک کل با کاهش ۹/۳٪ و اختلاف آماری معنی‌دار نسبت به شاهد در تیمار باکتری 36A-2L به‌دست آمد. توجه به صفت مهمی نظیر وزن خشک کل گیاه معیاری در انتخاب باکتری‌ها در آزمون‌های گلدانی است. اثر کاهش معنی‌دار برخی از باکتری‌ها نظیر جدایه 36A-2L در کاهش این پارامتر می‌تواند به برهمکنش منفی آن با گیاه یا عدم سازگاری باکتری‌ها در ریزوسفر گیاه مربوط باشد. کما اینکه دلیل انتخاب این باکتری‌ها در آزمایش گلدانی به خاطر برتری نسبی آن‌ها در آزمایشات درون‌شیشه‌ای سنجش آزادسازی پتاسیم بوده است و این خود نشان می‌دهد که صرفاً اتکا به نتیجه یک مطالعه نمی‌تواند برای انتخاب یا رد باکتری مفید باشد. پس از این تیمارهای باکتریایی، تیمارهای کودی وزن خشک کل بالاتری داشته‌اند. علت برتری باکتری‌ها نسبت به تیمارهای سطوح کودی احتمالاً می‌تواند مربوط به مکانیسم‌های مستقیم و غیرمستقیم باکتری‌ها به‌خصوص تولید فیتوهورمون‌های گیاهی مربوط باشد که می‌توانند در افزایش رشد و عملکرد گیاهان موثر باشند (۳۶).

اما وزن خشک ریشه متأثر از تیمارهای آزمایش قرار نگرفت. وزن تر بالاتر ریشه هر چند نشان از بهتر بودن شرایط لنگرگاهی گیاه است اما دلیل قطعی بر تغذیه بهتر گیاه نخواهد بود. چون ریشه‌های مویی تر علی‌رغم جذب بهتر آب و عناصر غذایی، وزن کمتری را به خود اختصاص می‌دهند. در این تحقیق هم مشخص شد در تیمارهایی مانند باکتری *Pseudomonas* sp. Az-48 که وزن ریشه بالایی داشته کمترین وزن اندام هوایی را داشته و تیماری مانند تیمار کودی ۵۰٪، با دارا بودن بیش‌ترین وزن اندام هوایی که از نظر تغذیه‌ای و ارتفاع نیز در وضعیت خوبی است، کمترین وزن ریشه را دارد و تمام این اختلافات به دلیل نوع و شرایط توسعه ریشه‌ای متفاوت در گیاهان می‌باشد. احتمالاً هورمون‌های رشد، تراکم ریشه و ریشه‌های مویین را زیاد کرده و از این طریق بر جذب بیش‌تر عناصر غذایی به‌خصوص عناصر پرمصرف مانند فسفر و پتاسیم اثر می‌گذارد (۷). می‌توان بیان کرد افزایش رشد ریشه و گسترش تارهای کشنده توسط هورمون‌های محرک رشد موجب افزایش جذب مواد غذایی و در نتیجه افزایش عملکرد ذرت می‌شود (۲۸). مانسک و همکاران (۲۵) دریافتند که استفاده از مایه تلقیح /زئوباکتر با افزایش طول و تراکم ریشه‌ها سبب افزایش کارایی مصرف نیتروژن و فسفر و میزان عملکرد دانه گندم شد.

وزن تر و خشک کل

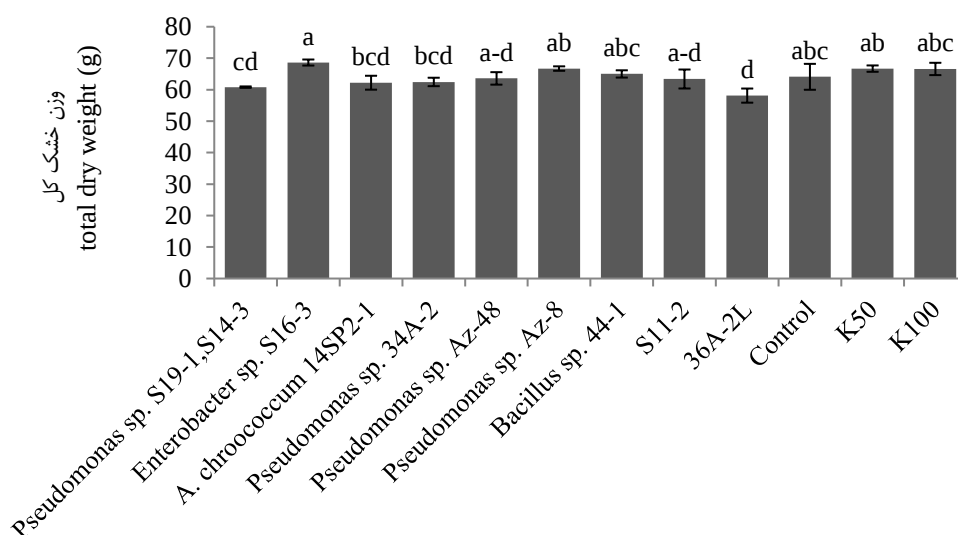
تجزیه واریانس نتایج نشان داد، بین تیمارهای آزمایش از نظر وزن تر کل اختلاف آماری معنی‌دار وجود ندارد ولی وزن خشک کل



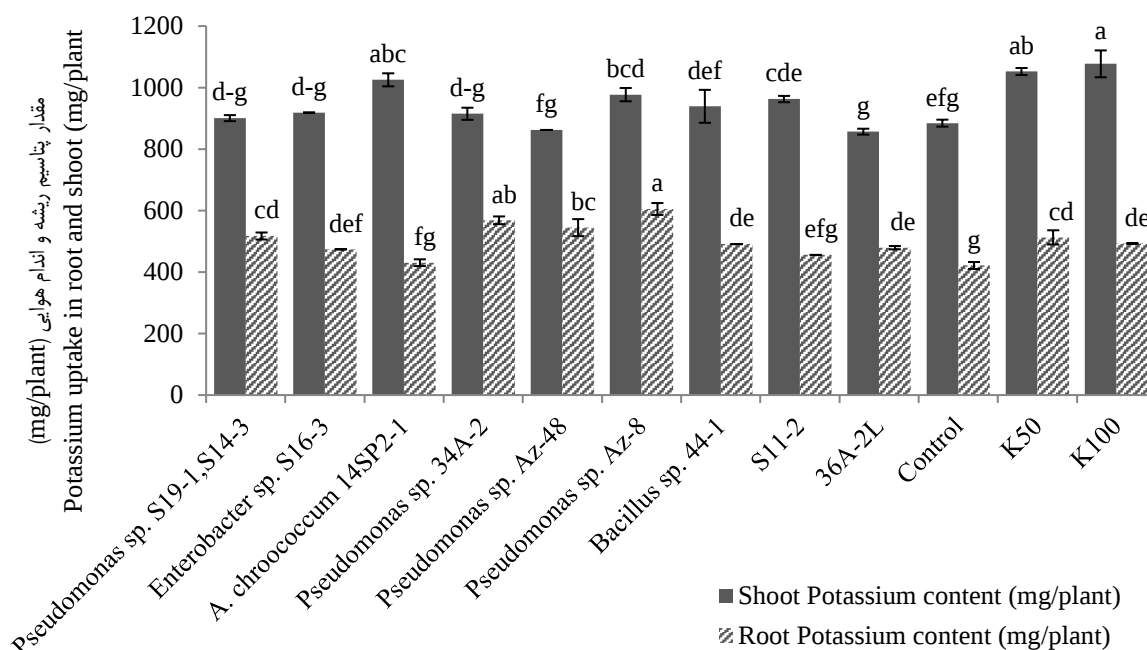
شکل ۶- تأثیر تیمارهای آزمایش بر وزن تر ریشه
Figure 6- Effects of treatments on root wet weight

باکتری‌های محرک رشد گیاه می‌تواند موجب افزایش رشد گیاه و افزایش مقدار پتاسیم در اجزای گیاه گندم شود. نتیجه آزمایش مرادی و همکاران (۲۹) که به منظور بررسی اثربخشی تعدادی جدایه باکتری در ریشه‌زایی و رشد عمومی گیاه ذرت انجام شد و تمام عناصر مورد نیاز گیاه از طریق محلول غذایی هوگلند تأمین شده بود، حاکی از این بود که بیش‌ترین وزن خشک ریشه در جدایه *sp. Az-8* و *Pseudomonas* بیش‌ترین وزن خشک کل بوته در جدایه *sp. Az-8* مشاهده شد. آن‌ها این افزایش را به تولید اکسین در این باکتری‌ها نسبت دادند.

گریندلر و همکاران (۱۳) نیز علت افزایش عملکرد در سیستم‌های تغذیه‌ای ارگانیک را به کاهش وزن مخصوص ظاهری خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب و ساختمان گرانوله‌ای خاک، افزایش فعالیت‌های میکروبی-آنزیمی و آزادسازی عناصر غذایی موجود در کلونیدهای خاک بیان کردند. سوگوماران و جانارتانام (۴۷) و لیو و همکاران (۲۲) بیش‌ترین میزان آزادسازی پتاسیم را در باکتری‌های *سودوموناس* و *باسیلوس* عنوان کردند. رحمتی خورشیدی و اردکانی (۳۴) در مورد تأثیر باکتری *سودوموناس* و *آزوسپیریلوم* بر عملکرد برنج طارم نشان دادند که بیش‌ترین عملکرد برنج در تلقیح باکتری *سودوموناس* به دست می‌آید. اگامبردیو و هوفلیخ (۱۱) هم نشان دادند که تلقیح با



شکل ۷- تأثیر تیمارهای آزمایش بر وزن خشک کل
Figure 7- Effects of treatments on total dry weight



شکل ۸- تأثیر تیمارهای آزمایش بر مقدار پتاسیم اندام هوایی و ریشه
Figure 8- Effects of treatments on root and shoot potassium content

مقدار پتاسیم ریشه و اندام هوایی

تجزیه واریانس نتایج مقدار پتاسیم اندام هوایی و ریشه نشان داد هر دو پارامتر در سطح ۱٪ معنی‌دار بود. بالاترین میانگین مقدار پتاسیم اندام هوایی مربوط به تیمار کودی ۱۰۰٪ و سپس ۵۰٪ به ترتیب برابر ۱۰۷۷/۳ و ۱۰۵۲/۳ میلی‌گرم بر وزن اندام هوایی بوده که با اختلاف آماری معنی‌دار، افزایش نسبی ۲۰/۴٪ نسبت به شاهد بدون تلقیح و بدون مصرف کود داشت و کمترین مقدار پتاسیم اندام هوایی که در تیمار باکتری 36A-2L مشاهده شد و کاهش ۲۰/۴٪ نسبت به شاهد نشان داد اما با آن در یک گروه آماری قرار گرفت (شکل ۸). بالاترین مقدار پتاسیم ریشه در تیمار باکتری *Pseudomonas sp. Az-8* با افزایش معنی‌دار ۴۳/۵٪ نسبت به شاهد برابر ۶۰۵/۱ میلی‌گرم بر وزن ریشه بوده است و کمترین مقدار پتاسیم ریشه در تیمار شاهد برابر با ۴۲۱/۴ میلی‌گرم بر وزن ریشه به دست آمد (شکل ۸).

همانطور که از نتایج به‌دست آمده است در تیمارهای کودی ۱۰۰٪ و ۵۰٪ با دسترسی آسان گیاه به مقدار کافی پتاسیم مقدار جذب پتاسیم نیز در اندام هوایی افزایش پیدا کرده است. اما در بین تیمارهای باکتریایی، *Pseudomonas Az-8* و *A. chroococcum* 14SP2-1 شرایط بهتری نسبت به بقیه باکتری‌ها داشته‌اند. تفاوتی که تیمار *سودوموناس* و *ازتوباکتر کروکوکوم* دارند مربوط به توان انتقال آن‌ها می‌باشد به طوری که 14SP2-1 مقدار بالایی از پتاسیم جذب شده را به اندام هوایی انتقال داده ولی *Az-8* بیش‌تر در ریشه‌ها

تجمع داده است. از دلایل این موضوع می‌توان به افزایش اسیدیته خاک و عدم تثبیت پتاسیم در حضور میکرواورگانیزم‌ها اشاره کرد که می‌تواند از عوامل افزایش دسترسی این عنصر در خاک و به تبع آن جذب بیش‌تر آن توسط گیاه باشد. مینا و همکاران (۲۷) افزایش میزان حلالیت پتاسیم در اثر تلقیح با باکتری‌های محرک رشد را ۸۴/۸-۱۲۷/۹ درصد نسبت به شاهد بیان کردند. مرادی و همکاران (۳۰) توان رهاسازی پتاسیم جدایه‌های آزمایش را با بهره‌گیری از محیط کشت الکساندروف مایع مورد ارزیابی قرار دادند. بالاترین میزان پتاسیم آزادشده با افزایش ۲۰٪ نسبت به شاهد، متعلق به جدایه *Az-8* بود و به طور متوسط میزان آزادکنندگی از کانی بیوتیت ۸۲٪ بیش‌تر از موسکویت مشاهده شد. آنالیز عناصر گیاهی در بافت خشک نیز نشان داد جدایه *Az-48* بیش‌ترین مقدار نیتروژن، فسفر، پتاسیم و آهن را جذب نموده است (۲۹). نتیجه آزمایش ابراهیمی و همکاران (۱۰) نیز نشان داد بالاترین توان آزادسازی پتاسیم در جدایه 44SP-2 از میکای بیوتیت و 35SP-2 از میکای موسکویت بود. در این میان برخی از جدایه‌ها نه تنها در افزایش پتاسیم محلول کارایی نداشتند بلکه پتاسیم رها شده در محیط کشت را نیز در ساختار زیست توده خود جذب نموده و سبب کاهش پتاسیم محلول در محیط کشت در برابر نمونه شاهد شدند.

نتیجه‌گیری

با توجه به مجموع نتایج به دست آمده از این مطالعه و در نظر

صفات فوق‌الذکر پیشنهاد می‌شوند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از گزارش نهایی طرح پژوهشی می‌باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا گردیده است.

گرفتن صفاتی نظیر وزن خشک کل، مقدار پتاسیم بافت گیاهی، شاخص کلروفیل و هدایت روزنه‌ای، برخی از تیمارهای باکتریایی مورد استفاده در این تحقیق را می‌توان برای آزمایشات بیش‌تر پیشنهاد نمود. جدایه‌های *Azotobacter chroococcum* 14SP2-1 و *Pseudomonas* sp. Az-8 به دلیل برتری نسبی آن‌ها در مقایسه با شاهد بدون تلقیح و بدون کود در

منابع

- 1- Arzanesh M.H., Alikhani H.A., Khavazi K., Rahimian H.A., and Miransari M. 2011. Wheat growth enhancement by *Azospirillum* sp. under drought stress. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27: 197-205.
- 2- Aseri G.K., Jain N., Panwar J., Rao A.V., and Meghwal P.R. 2008. Biofertilizers improve plant growth, fruit yield, nutrition, metabolism and rhizosphere enzyme activities of Pomegranate (*Punica granatum* L.) in Indian Thar Desert. *Scientia Horticulturae*, 117: 130-135.
- 3- Badr M.A., Shafei A.M., and El-Deen S.H.S. 2006. The dissolution of K and P-bearing minerals by silicate dissolving bacteria and their effect on sorghum growth. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(1): 5-11.
- 4- Barker W.W., Welch S.A., Chu S., and Banfield J.F. 1998. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Minerals*, 83:1551-1563.
- 5- Basak B.B., and Biswas D.R. 2008. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginous*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare* Pers) grown under two Alfisols. *Plant Soil*, 317: 235-255.
- 6- Basak B.B., and Biswas D.R. 2010. Coinoculation of potassium solubilizing and nitrogen fixing bacteria on solubilization of waste mica and their effect on growth promotion and nutrient acquisition by a forage crop. *Biology and Fertility of Soils*, 46: 641-648.
- 7- Broughton W.J., and Ouler S. 1986. Nitrogen fixation. volume 4: *Molecular Biology*. Clarendon press, Oxford.
- 8- Deilamirad M., Sarikhani M.R., and Oustan Sh. 2016. Evaluating the nutrient uptake and tomato growth by *Pseudomonads* isolates and mineral potassium levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(4): 144-156. (In Persian with English abstract)
- 9- Dordipour E., Farshadirad A., and Arzanesh M.H. 2010. Effect of *Azotobacter chroococcum* and *Azospirillum lipoferum* on the release of soil potassium in pot culture of soybean (*Glycine max* var. Williams). *Journal of Agroecology*, 2(4): 593-599. (In Persian)
- 10- Ebrahmi M., Safari Sinegani A.A., Sarikhani M.R., Mohammadi S.A., and Aliasgharzad N. Isolation, identification, and determination of plant growth promoting properties of Azotobacteria isolated from soil samples North-west of Iran under different land usage. (In press)
- 11- Egamberberdiyeva D., and Hoflich G. 2003. Influence of growth-promoting bacteria on the growth of wheat indifferent soils and temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 35: 973-978.
- 12- Egilla N., Davies F.T., and Boutton T.W. 2005. Drought stress influence leaf water content, photosynthesis, and water use efficiency of *Hibiscus rosasinensis* at three potassium concentrations. *Biomedical and Life Science*, 43 (1): 135-140.
- 13- Gryndler M., Sudova R., and Rydlova J. 2008. Cultivation of high biomass crops on mine spoil banks: Can microbial inoculation compensate for high doses of organic matter?. *Bioresource Technology*, 99: 6391-6399.
- 14- Hajeeboland R., Asgharzadeh N., and Mehrfar Z. 2004. Ecological study of *Azotobacter* in two pasture lands of the North-west Iran and its Inoculation effect on Growth and mineral nutrition of wheat (*Triticum aestivum* L.cv.omid) plants. *Journal of Water and Soil Science*, 8(2): 27-90. (In Persian with English abstract)
- 15- Han H.S., Supanjani D., and Lee K.D. 2006. Effect of co-inoculation with phosphate and potassium solubilizing bacteria on mineral uptake and growth of pepper and cucumber. *Plant, Soil and Environment*, 52: 130-136.
- 16- Jiang Q., Roche D., Monaco A., and Hole D. 2006. Stomatal conductance is a key parameter to assess limitations to photosynthesis and growth potential in barley genotypes. *Plant Biology*, 8(4): 515-521.
- 17- Kavino M., Harish S., Kumar N., Saravanakumar D., and Samiyappan R. 2010. Effect of chitinolytic PGPR on growth, yield and physiological attributes of banana (*Musa* spp.) under field conditions. *Applied Soil Ecology*, 45: 71-77.

- 18- Keshavarz Zarjani J., Aliasgharzad N., and Oustan S. 2012. Effects of six strains of potassium releasing bacteria on growth and potassium uptake of tomato plant. *Journal of Water and Soil Science*, 23: 245-255. (In Persian with English abstract)
- 19- Keshavarz Zarjani J., Aliasgharzad N., Oustan S., Emadi M., and Ahmadi A. 2013. Isolation and characterization of potassium solubilizing bacteria in some Iranian soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(12): 1713-1723.
- 20- Khormali F., Dordipour E., Amini A., Ghorbani R., and Ajami M. 2011. Analysis of the indigenous Glauconitic sandstone for its K supplying power and investigating its chemical and biological weathering by mineralogical and microscopic studies. Research Report. Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources, 46p. (In Persian)
- 21- Lin Q. M., Rao Z.H., Sun Y.X., Yao J., and Xing L.J. 2002. Identification and practical application of silicate – dissolving bacteria. *Agricultural Science in China*, 1: 81-85.
- 22- Liu W., Xu X., Wu X., Yang Q., Luo Y., and Christie P. 2006. Decomposition of silicate minerals by *Bacillus mucilaginosus* in liquid culture. *Environmental Geochemistry and Health*, 28: 133-140.
- 23- Madani O., Sarikhani M.R., and Oustan S. 2015. Inoculation effects of potassium releasing bacteria on K nutrition of tomato in sand-muscovite medium and identification of efficient isolates, 26(1): 259-271. (In Persian with English abstract)
- 24- Malakouti M.J., and Gheibi M.N. 1988. Determine the Critical Nutrients Strategic and Proper Fertilizer Recommendations in the Country. Publication of Agricultural Education, Training and Equipping the Human Resources Department of Tat, The Ministry of Agriculture, Karaj, Iran.
- 25- Manske G.B., Luttger A., Behi R.K., Vlek P.G., and Cimmit M. 2000. Enhancement of *mycorrhiza* (VAM) infection, nutrient efficiency and plant growth by *Azotobacter chroococcum* in wheat. *Plant Breeding*, 13: 78-83.
- 26- Marchiol L., Letia L., Marti M., Ppersotti A., and Zerbi G. 1996. Physiological responses of two soybean cultivars to cadmium. *Journal of Environmental Quality*, 25: 562-566.
- 27- Meena V.S., Maurya B.R., and Verma J.P. 2014. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils. *Microbiological Research*, 169: 337-347.
- 28- Mirza M.S., Rasul G., Mehnazs Ladha J.K., Ali S., and Malik K.A. 2000. Beneficial effects of inoculated nitrogen-fixing bacteria on rice. Pp: 191-204. In: Ladha J.K., and Reddy P.M. (eds). The quest for nitrogen fixation in rice. International Rice Research Institute, India.
- 29- Moradi Sh., Sarikhani M.R., and Aliasgharzad N. 2016. The effect of some bacterial isolates on root growth and nutrient uptake in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(4): 34-47. (In Persian with English abstract)
- 30- Moradi Sh., Sarikhani M.R., and Aliasgharzad N. 2017. Assessment of potassium releasing ability of some bacterial isolates in in-vitro condition and identification of efficient isolates. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48(2): 385-395. (In Persian)
- 31- Ostadi Jaafari A., Rezvani Moghaddam P., and Ghorbani R. 2012. Study of beneficial levels and effect of *Azotobacter spp.* And *Azospirillum spp.*. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(2): 277-283. (In Persian)
- 32- Park M., Singvilay D., Seok Y., Chung J., Ahn K., and Sa T. 2003. Effect of phosphate solubilizing fungi on 'P' uptake and growth of tobacco in rock phosphate. *Soil Science and Fertilizer*, 36: 233-238.
- 33- Prajapati K., Sharma M.C., and Modi H.A. 2013. Growth promoting effect of potassium solubilizing microorganisms on *Abelmoscus esculantus*. *International Journal of Agriculture Sciences*, 3(1): 181-188.
- 34- Rahmati khorshidi Y., and Ardakani M.R. 2011. Response of yield and yield components of rice (*Oryza sativa*) to *Pseudomonas fluorescense* and *Azospirillum lipoferum* under different nitrogen levels. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*, 10: 387-395. (In Persian)
- 35- Read J.J., Reddy K.R., and Jenkins H.N. 2006. Yield and quality of upland cotton as influenced by nitrogen and phosphorus. *European Journal of Agronomy*, 24: 282-290.
- 36- Reddy G.S.N., Prakash J.S.S., Matsumoto G.I., Stackebrandt E., and Shivaji S. 2002. *Arthrobacter roseus* sp. nov., a psychrophilic bacterium isolated from an Antarctic cyanobacterial mat sample. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 52: 1017-1021.
- 37- Rokhzady A. 2008. Effects of inoculation *Azotobacter* and *Mezorhizobioum* on growth and yield of chickpea, Ph.D. thesis, Agronomy-Crop Physiology, Islamic Azad University, Science and Research unit. (In Persian with English abstract)
- 38- Sadeghi S., Ostan S., Najafi N., Valizadeh M., and Monirifar H. 2017. Effects of Cadmium and Zinc interactions on growth and chemical composition of Corn (*Zea mays* cv. single cross). *Journal of Water and Soil*, 31(2): 460-477.
- 39- Sheikh Alipour P., Bolandnazar S.A., Sarikhani M.R., and Irani F. 2016. Effect of some isolates of *Pseudomonas* vaccination on growth and nutrient uptake of tomato under field condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 26(1): 100-117. (In Persian with English abstract)

- 40- Sheng X.F., and Huang W.Y. 2002. Study on the conditions of potassium release by strain NBT of silicate bacteria scientia. Agricultural Sinica, 35: 673-677.
- 41- Sheng X.F. 2005. Growth promotion and increased potassium uptake of cotton and rape by a potassium releasing strain of *Bacillus edaphicus*. Soil Biology and Biochemistry, 37: 1918-1922.
- 42- Sheng X.F., He L.Y., and Huang W.Y. 2002. The conditions of releasing potassium by a silicate-dissolving bacterial strain NBT. Agricultural Sciences in China, 1: 662-666.
- 43- Tabatabaei S.J. 2009. Principles of Mineral Nutrition of Plants. Tabriz, Iran.
- 44- Sindhu S.S., Dua S., Verma M.K., and Khandelwal A. 2010. Growth Promotion of Legumes by Inoculation of Rhizosphere Bacteria. Microbes for Legume Improvement. CCS Haryana Agricultural University, India.
- 45- Singh J.S., Pandey V.C., and Singh D.P. 2011. Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. Agriculture, Ecosystems and Environment, 140: 339-353.
- 46- Singh G., Biswas D.R., and Marwah T.S. 2010. Mobilization of potassium from waste mica by plant growth promoting rhizobacteria and its assimilation by maize (*Zea mays*) and wheat (*Triticum aestivum* L.). Journal of Plant Nutrition, 33: 1236-1251.
- 47- Sugumaran P., and Janarthanam B. 2007. Solubilization of potassium containing minerals by bacteria and their effect on plant growth. World Journal of Agricultural Sciences, 3: 350-355.
- 48- Vikram A., Hamzehzarghani H., Al-Mughrabi K.I., Krishnaraj P.U., and Jagadeesh K.S. 2007. Interaction between *Pseudomonas fluorescens* FPD-15 and *Bradyrhizobium* spp. in peanut. Biotechnology, 6: 292-298.
- 49- Waling I., Vark W.V., Houba V.G.J., and Van der lee J.J. 1989. Soil and plant analysis, a series of syllabi. Part 7. Plant Analysis Procedures. Wageningen Agriculture University, The Netherland.
- 50- Zafar M., Abbasi M.K., Khan M.A., Khaliq A., Sultan T., and Aslam M. 2012. Effect of plant growth promoting rhizobacteria on growth, nodulation and nutrient accumulation of lentil under controlled conditions. Pedosphere, 22: 848-859.



Inoculation of Plant Growth Promoting Bacteria on Yield, Stomatal Conductance and Chlorophyll Index of Corn under Potassium Deficiency

M. Leylasi Marand¹- M.R. Sarikhani^{2*}

Received: 18-12-2017

Accepted: 20-05-2018

Introduction: Potassium is one of essential elements for plants and it is the most abundant nutrient on soil surface which is important factor on plant growth and development. Factors such as potassium fixation, erosion, run-off and leaching cause reduction in available potassium of soil. Microorganisms especially bacteria play important role in changing unavailable potassium to available form. Hence, such bacteria can be used for increasing available potassium in soil and consequently production and quality of crops. The K- releasing bacteria can be employed as a biofertilizer to provide plant nutrients in a sustainable approach.

Materials and Methods: In this study, 10 bacterial isolates including *Enterobacter* sp. S16-3, *Azotobacter chroococcum* 14SP2-1, *Pseudomonas* sp. 34A-2, *Pseudomonas* Az-48, *Pseudomonas* Az-8, S11-2 and 36A-2L provided from soil biology laboratory, department of soil science, University of Tabriz, *Bacillus* sp. 44-1 provided from soil biology laboratory of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, and S19-1+ S14-3 isolated from Potabarvar biofertilizer produced by Green Biotech Company were used as a potassium biofertilizer. For this purpose, bacterial inoculant prepared in bagasse and perlite carrier was used to inoculate the disinfected seeds of corn (single cross 704). In this research, bacterial treatments were compared with chemical fertilizer treatments including K50 and K100, in these treatments based on soil test, 50% and 100% of fertilizer recommendation were used (equal to 0.115 g and 0.23 g potassium sulfate per pot, respectively). The experiment was conducted based on completely randomized design with three replications. Duration of this study was about 2 months. Parameters measured during growth were stem diameter, height, chlorophyll index and stomatal conductance and after harvesting, wet and dry weight of root, shoot wet and dry weight, total wet and dry weight.

Results and Discussion: The results showed that expect root dry weight, total wet weight and stem diameter, all parameters were significantly affected by the treatments. The highest plant height was observed for fertilizer treatment 50% (100.8 cm) with an increase of 3.5% compared to the negative control. As to bacterial isolates, highest height was measured in *Bacillus* sp. 44-1 (98.6 cm). Plant height and stem diameters are indicators of vegetative growth, these parameters can thus increase when plant can use soil nutrients more than others. *Enterobacter* sp. S16-3 had the maximum stem diameter and the lowest height. It can be due to decreased potassium nutrition and auxin and gibberellin transferred from root. The chlorophyll index and stomatal conductance were equal to 9.567 and 0.097, respectively, which were related to *A. chroococcum* 14SP2-1. These are the factors of photosynthesis parameters. Increase of these factors may be attributed to the hormone balance effects such as cytokinin which can expand root growth and absorbance of nutrients. *A. chroococcum* is one of plant growth promoting rhizobacteria which can provide more phytohormones and cause improved plant growth. Therefore, photosynthesis activities can be better. The highest wet weight (265.6 g) and shoot dry weight (44.4 g) were found at fertilizer treatments 50% and then 100% fertilizer recommendation, but in regards to bacterial isolates, *A. chroococcum* 14SP2-1 and *Pseudomonas* Az-8 had higher values as compared with the control. The maximum root dry weight was observed in *Pseudomonas* Az-48 (187.2 g). However, the lowest root weight was obtained at 50% fertilizer recommendation. Hence, this can be explained by the root developing types. The highest total dry weight was measured in *Enterobacter* sp. S16-3 (63.68 g) and *Pseudomonas* Az-8 and after these bacterial isolates, fertilizer treatments had better condition. Consequently, these bacteria had another effects on plants such phytohormones productions and enzymatic activities that chemical fertilizer did not have such influences. The highest average of shoot potassium content was observed at 100% fertilizer recommendation (1077.3 mg/plant).

Conclusions: The results showed that fertilizer treatments K50 and K100 had better conditions and pots with

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor of Soil Biology and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

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

chemical fertilizer grew more than others in most plants. But some bacterial isolates showed comparable results relative to K50 and K100. These bacteria can affect plants with directly and indirectly mechanisms. Bacterial treatments such as *A. chroococcum* 14SP2-1 and *Pseudomonas* Az-8 improved growth parameters through solubilizing potassium and producing phytohormones. Hence, these isolates can be considered for further studies particularly under field condition.

Keywords: Biofertilizer, Bacterial inoculation, *Enterobacter*, K-releasing bacteria, Potabarvar



اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک

بهناز آتش پز¹ - سالار رضاپور^{2*} - نادر قائمیان³

تاریخ دریافت: 1396/10/27

تاریخ پذیرش: 1397/03/09

چکیده

در طی چند دهه گذشته مطالعات قابل توجهی در ارتباط با تأثیر آبیاری با فاضلاب خام بر خصوصیات خاک انجام شده است اما تحقیقات چندانی برای اثرات فاضلاب تصفیه شده صورت نگرفته است. بر این اساس به منظور بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب خروجی از تصفیه‌خانه ارومیه بر غلظت، توزیع و آلودگی بعضی عناصر سنگین خاک، تعداد شش نقطه (پنج نقطه در اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک نقطه در اراضی تحت آبیاری با آب چاه به عنوان شاهد) در منطقه ارومیه تعیین و در محدوده عمق ریشه گیاهان زراعی این منطقه (افق AP، عمق 0-30 سانتی‌متری) نمونه‌برداری صورت گرفت. نتایج نشان داد که عملیات آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل توجه شکل قابل استخراج توسط DTPA عناصر فوق به صورت توالی Ni > Cu (13-87 %) > Zn (35.7-73.3 %) > Cd (54.4-125 %) > Pb (6-32.3 %) خاک شده است. با این وجود به استثنای کادمیم شکل قابل استفاده سایر عناصر در محدوده‌های مجاز قرار گرفتند. در مقایسه با شاهد، در اکثر خاک‌های مطالعه شده شکل کل عناصر فوق نیز (به استثنای مس) به طور معنی‌داری افزایش یافته بود و بیشترین افزایش (200 تا 300 درصد) و کمترین افزایش (10 تا 32 درصد) به ترتیب مربوط به کادمیم و مس بود. همچنین نتایج شاخص‌های آلاینده‌گی AP، PI، PIN، PLI نشان داد که اکثر خاک‌های مورد مطالعه در دامنه آلودگی کم تا آلودگی بالا قرار داشتند و کادمیم بیشترین نقش را در افزایش کلاس شاخص‌های فوق داشت.

واژه‌های کلیدی: دشت ارومیه، شاخص آلاینده‌گی، شکل DTPA عناصر، شکل کل عناصر

مقدمه

باعث افزایش معنی‌دار ($p < 0.05$) غلظت عناصر روی، مس، سرب و کادمیم نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه شده است. به طور کلی منابع مهم فلزات سنگین فاضلاب‌ها، سیالات خروجی واحدهای تولیدی، صنعتی و تأسیسات حومه شهرها هستند. این فلزات از نظر زیستی تجزیه‌ناپذیر بوده و به شدت در محیط‌زیست ماندگار می‌باشند (26). همچنین خاک نیز دارای ظرفیت محدودی برای جذب و نگهداری این عناصر است و چنانچه غلظت آن‌ها از دامنه‌های مجاز تعیین شده بیشتر شوند می‌توانند سبب آلودگی چرخه آب، خاک، گیاه و انسان شوند. عابدی و همکاران (1) در بررسی اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده بر خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک در یک منطقه خشک دریافتند که سیستم‌های آبیاری تأثیری بر تجمع فلزات سنگین در خاک نداشته، اما کاربرد فاضلاب باعث تجمع معنی‌دار سرب، منگنز، نیکل و کبالت در مقایسه با تیمار آب زیرزمینی شده است. همچنین کلی و همکاران (11) با بررسی اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه شده نشان دادند، غلظت فلزات سنگین در خاک به خصوص برای سرب و کادمیم با دوره آبیاری افزایش یافته است.

در ایران نیز آبیاری با فاضلاب در اراضی حومه شهرها سابقه نسبتاً طولانی دارد و این رویکرد عمدتاً به علت دسترسی آسان به

در طی چند دهه اخیر به علت تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب، بازیابی و استفاده از فاضلاب‌های شهری مخصوصاً در کشورهای واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک رو به افزایش نهاده است. اما از آنجایی که پساب جز منابع غیرمستعارف آب محسوب می‌شود، کاربرد آن در کشاورزی نیازمند مدیریتی خاص است که ضمن بهره‌گیری مطلوب از آن، مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی را در خاک، گیاه و منابع آب سطحی و زیرزمینی به همراه نداشته باشد (29). از طرف دیگر، فاضلاب‌ها اغلب دارای مقادیر قابل توجهی فلزات سنگین و سمی می‌باشند (28) که نوع و مقدار آن‌ها از مکانی به مکان دیگر و حتی در یک مکان خاص، در طول زمان متفاوت است (19). رضاپور و صمدی (22) طی مطالعاتی در اراضی آهکی شمال غرب ایران گزارش کردند که آبیاری طولانی مدت با فاضلاب‌های خام شهری

1 و 2- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه
(*- نویسنده مسئول: Email: S_Rezapour2000@yahoo.com)

3- کارمند سابق مؤسسه تحقیقات خاک و آب ارومیه
DOI: 10.22067/jsw.v32i3.69794

معمول خاک شامل تعیین pH، قابلیت هدایت الکتریکی (EC^1)، کربن آلی (OC^2) (16)، کربنات کلسیم معادل (CCE^3) (17) و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC^4) (3) قرار گرفتند. شکل‌های کل و قابل استفاده عناصر روی، مس، کادمیم، سرب و نیکل به ترتیب به روش هضم در اسید نیتریک غلیظ (5) و DTPA (دی‌اتیلن تری‌آمین پنتا استیک اسید) (12) عصاره‌گیری شدند و غلظت آن‌ها نیز توسط دستگاه جذب اتمی مدل شیمادزو اندازه‌گیری شد. همچنین کلیه آزمایش‌های مربوط به خاک و آب در سه تکرار انجام شدند و سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel داده‌ها دسته‌بندی، جداول و نمودارهای هر کدام ترسیم و با کمک نسخه 19 نرم‌افزار SPSS روابط بین متغیرها بررسی گردید.

شاخص‌های آلودگی خاک

برای بررسی تأثیر آبیاری بر دامنه آلودگی عناصر سنگین بعضی شاخص‌های آلاینده‌ی مربوط به آن‌ها به شرح زیر محاسبه شد. درصد دسترسی (Ap^5) فلزات سنگین با استفاده از فرمول زیر:

$$Ap = \left(\frac{Cia}{Cit} \right) \times 100$$

که Cia و Cit به ترتیب غلظت شکل قابل استفاده (DTPA) و شکل کل فلزات سنگین در نمونه نام می‌باشد. از این شاخص برای مقایسه تحرک و سمیت فلزات سنگین در خاک استفاده می‌شود (20). شاخص آلاینده‌ی منفرد عناصر (PI^6): این شاخص با استفاده از فرمول $PI = \frac{C_s}{C_b}$ برای فلزات سنگین این مطالعه محاسبه شد که در این فرمول C_s غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده و C_b غلظت عناصر در شاهد است (2). شاخص آلودگی ترکیبی (PIN^7): شاخص فوق برای عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل با استفاده از معادله زیر تعیین شد (4).

$$PIN = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PI_i \right)^2 + [max(PI_i)]^2}{2}}$$

که PI شاخص آلاینده‌ی منفرد و n تعداد فلزات سنگین مطالعه شده است.

فاضلاب در حاشیه مزارع و غلظت قابل توجه عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان در فاضلاب می‌باشد. در شهرستان ارومیه نیز طی چند سال گذشته بخش زیادی از فاضلاب این شهر از طریق مجاری زیرزمینی به تصفیه‌خانه این شهر منتقل و پس از مراحل پاک‌سازی کلی از طریق کانال روباز به طرف دریاچه ارومیه هدایت می‌شود و اراضی زراعی این مسیر نیز تحت آبیاری این فاضلاب باز یافتی قرار می‌گیرند (31). چنین رویکردی برای مدت 10 سال است که انجام می‌شود اما تحقیقی در ارتباط با اثرات این نوع آبیاری بر خواص خاک‌های این منطقه انجام نشده است لذا مطالعه حاضر در جهت بررسی تأثیر آبیاری با فاضلاب‌های تصفیه شده شهرستان ارومیه بر غلظت، توزیع و آلودگی عناصر روی، مس، کادمیم، سرب و نیکل انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در منطقه دشت ارومیه واقع در بین 45 درجه و 15 دقیقه تا 45 درجه و صفر دقیقه طول و 37 درجه و 45 دقیقه تا 37 درجه و 30 دقیقه عرض جغرافیایی روستای قهرمانلو استان آذربایجان غربی انجام شده است. در این منطقه متوسط بارندگی سالانه 330 میلی‌متر با متوسط درجه حرارت 13 درجه سلسیوس منجر به اقلیم نیمه‌خشک با رژیم رطوبتی خاک زیریک و رژیم حرارتی مزیک شده است. مواد مادری اراضی این ناحیه از نوع رسوبات آبرفتی جوان است و خاک‌های آن‌ها نیز از رده اینسپتی‌سول‌ها می‌باشد. محصولات زراعی این منطقه گندم، ذرت و آفتاب‌گردان می‌باشد که آب مورد نیاز آن‌ها عمدتاً به وسیله کانال خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب شهر ارومیه تأمین می‌شود و سیستم آبیاری آن‌ها نیز به صورت غرقابی با سابقه حدود 10 سال است.

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

در عملیات میدانی شش نقطه جهت برداشت نمونه‌های خاک (پنج نقطه در اراضی آبیاری شده با فاضلاب و یک نقطه در اراضی تحت آبیاری با آب چاه به عنوان شاهد) در نظر گرفته شد. در مرحله بعد نمونه‌های خاک از قسمت‌های تعیین شده جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل شدند. همچنین در سه مقطع زمانی در طول فصل زراعی (قبل کاشت یا مرحله آماده‌سازی زمین، مرحله رشد رویشی و مرحله قبل از رسیدن محصول) از آب فاضلاب تصفیه شده نمونه برداری انجام شد.

تجزیه آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک پس از آماده‌سازی در آزمایشگاه (هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی‌متری) تحت آزمایش‌های شیمیایی

- 1- Electrical of conductivity
- 2- Organic carbon
- 3- Calcium carbonate equivalent
- 4- Cation exchange capacity
- 5- Availability fraction percentage
- 6- Single-factor pollution index
- 7- Nemerow pollution index

جدول 1- کلاس‌های تعریف شده برای شاخص‌های PI، PIN و PLI

Table 1- Classes defined for PI, PIN and PLI indicators

PI			PLI			PIN		
Value	Class	Pollution Level	Value	Class	Pollution Level	Value	Class	Pollution Level
مقدار	کلاس	سطح آلودگی	مقدار	کلاس	سطح آلودگی	مقدار	کلاس	سطح آلودگی
$PI \leq 1$	1	Clean (بدون آلودگی)	$PLI \leq 0.7$	1	Clean (بدون آلودگی)	$PIN \leq 0.7$	1	Clean (بدون آلودگی)
$1 < PI \leq 2$	2	Low Pollution (آلودگی کم)	$1 \leq PLI \leq 2$	2	Low Pollution (آلودگی کم)	$0.7 \leq PIN \leq 1$	2	Low Pollution (آلودگی کم)
$2 < PI \leq 3$	3	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)	$2 < PLI \leq 3$	3	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)	$1 < PIN \leq 2$	3	Slight Pollution (آلودگی نسبتاً کم)
$PI > 3$	4	High Pollution (آلودگی زیاد)	$PLI > 3$	4	High Pollution (آلودگی زیاد)	$2 < PIN \leq 3$	4	Moderate Pollution (آلودگی متوسط)
-	-	-	-	-	-	$PIN > 3$	5	High Pollution (آلودگی زیاد)

خدماتی زیادی (مانند مراکز خدمات موتور، رنگرزی، آبکاری فلزات) فعالیت می‌کنند که فاضلاب آن‌ها احتمالاً یکی از دلایل اصلی تولید و ایجاد عناصر فوق می‌باشند. اگرچه مواد شیمیایی مختلفی که در منازل مسکونی و تأسیسات شهری مصرف می‌شوند و به فاضلاب-های خروجی این شهر اضافه می‌شوند نیز تأثیر قابل توجهی دارند.

خصوصیات شیمیایی خاک‌ها

عملیات آبیاری با فاضلاب یک رویکرد افزایشی در کلیه ویژگی-های شیمیایی اندازه‌گیری شده این تحقیق ایجاد کرده است (جدول 3) اگرچه اکثر این تغییرات از لحاظ آماری معنی‌دار نشده است. در مقایسه با اراضی شاهد یک افزایش 0/5 تا سه درصد در pH خاک-های تحت آبیاری با فاضلاب مشاهده شد که چنین تغییرات ناچیزی در pH این خاک‌ها به علت ظرفیت بافری بالای آن‌ها (کربنات کلسیم معادل در دامنه 37 تا 42 درصد) چندان دور از انتظار نیست. همچنین EC خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب نیز یک افزایش قابل توجه (شش تا 54 درصد) نسبت به شاهد نشان دادند که این روند می‌تواند یک تأثیر منفی بر کیفیت خاک داشته باشد. براساس نتایج اسمیت و دورن (27) در خاک‌های آهکی و مناطق خشک و نیمه‌خشک، هر گونه افزایش در pH و EC باعث کاهش کیفیت خاک می‌شود. در مقابل آبیاری با فاضلاب از طریق افزایش مواد آلی (یک تا 17 درصد) و CEC خاک (پنج تا 17 درصد)، اثرات مثبتی بر کیفیت خاک بجای گذاشته است. چنین مشاهداتی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (23 و 24).

شاخص بار آلودگی (PLI^1): این شاخص نیز بر اساس فرمول $PLI = \sqrt[n]{PI_1 \times PI_2 \times \dots \times PI_n}$ برای فلزات سنگین این مطالعه محاسبه گردید (33).

با توجه به دامنه تغییرات شاخص آلودگی منفرد عناصر (PI)، شاخص آلودگی ترکیبی (PIN) و شاخص بار آلودگی (PLI) یک سری کلاس بندی‌هایی برای توصیف شاخص‌های ذکر شده که به شرح جدول 1 ارائه شده است.

نتایج و بحث

کیفیت فاضلاب تصفیه‌شده

مشخصه‌های اندازه‌گیری شده در فاضلاب شهری به همراه استانداردهای بین‌المللی (7، 30 و 31) و داخلی (9) جهت بررسی کیفیت آب آبیاری در جدول 2 ارائه شده است. همانطوریکه مشاهده می‌شود میانگین pH آب فاضلاب مورد مطالعه در دامنه بهینه و قابل قبول قرار دارد. اما میانگین EC بیش از دو برابر استانداردهای داخلی و جهانی است که می‌تواند باعث افزایش غلظت نمک و فشار اسمزی و کاهش عملکرد گیاهان زراعی اراضی تحت آبیاری با این فاضلاب گردد.

در بین پنج عنصر مورد مطالعه نیز میانگین غلظت سرب، روی و نیکل فاضلاب کمتر از دامنه قابل قبول داخلی و بین‌المللی آنها بود اما میانگین غلظت مس و کادمیم چندین برابر بزرگتر از استانداردهای داخلی و سازمان‌های بین‌المللی بود که می‌تواند باعث تجمع آلوده کننده این عناصر در خاک شود. در حومه شهرستان ارومیه مراکز

جدول 2- مقایسه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در فاضلاب شهری تصفیه شده با استانداردهای بین‌المللی (7، 30، 31) و داخلی (9)
Table 2- Comparison of measured features in refined urban wastewater with international (7, 30, 31) and domestic standards (9)

ویژگی‌ها Features	فاضلاب شهری تصفیه‌شده Urban Treated wastewater		WHO	EPA	IRNDOE	FAO
	دامنه Range	میانگین ± انحراف معیار Mean ± SD	سازمان بهداشت جهانی	سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا	سازمان حفاظت از محیط‌زیست ایران	سازمان خوار و بار جهانی
pH	7.09 - 7.57	7.24 ± 0.29	6.5 – 8.5	6.5 – 8.4	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
EC (dS m ⁻¹)	1.32 - 1.60	1.33 ± 0.28	0.7	0.7	0.7	0.7
Zn (mg L ⁻¹)	0.77 – 0.958	0.87 ± 0.06	2	1	2	2
Cu (mg L ⁻¹)	0.515 – 0.73	0.59 ± 0.07	0.2	0.2	0.2	0.2
Cd (mg L ⁻¹)	0.106 – 0.19	0.14 ± 0.03	0.01	0.01	0.05	0.01
Pb (mg L ⁻¹)	0.47 – 0.965	0.77 ± 0.15	5	5	1	5
Ni (mg L ⁻¹)	0.04 – 0.144	0.095 ± 0.04	0.2	0.2	2	0.2

جدول 3- مقایسه ویژگی‌های شیمیایی اندازه‌گیری شده در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده و آب چاه
Table 3- Comparison of chemical features measured in irrigated lands with treated wastewater and well water
خاک منطقه یک (پروفیل یک)

ویژگی‌ها Features	Soil area 1 (profile 1)		درصد تغییرات Percent change (%)
	خاک آبیاری شده با فاضلاب Irrigated soil with sewage	خاک آبیاری شده با آب چاه Irrigated soil with well water	
pH	7.93 ± 0.015	7.70 ± 0.05	2.99
EC (dS m ⁻¹)	2.73 ± 0.297	2.50 ± 1.75	9.20
OM (%)	2.83 ± 0.867	2.58 ± 0.86	9.69
CCE (g kg ⁻¹)	42.2 ± 1.39	40.7 ± 1.36	3.70
CEC (Cmol kg ⁻¹)	24.3 ± 1.12	21.8 ± 2.31	11.5
خاک منطقه دو (پروفیل دو) Soil area 2 (profile 2)			
pH	7.74 ± 0.021	7.70 ± 0.047	0.52
EC (dS m ⁻¹)	3.64 ± 2.16	2.50 ± 1.75	45.6*
OM (%)	2.60 ± 0.91	2.58 ± 0.86	0.775
CCE (g kg ⁻¹)	40.4 ± 1.04	40.7 ± 1.36	-0.700
CEC (Cmol kg ⁻¹)	25.45 ± 0.77	21.8 ± 2.31	16.6
خاک منطقه سه (پروفیل سه) Soil area 3 (profile 3)			
pH	7.71 ± 0.05	7.60 ± 0.047	1.46
EC (dS m ⁻¹)	2.59 ± 0.88	2.45 ± 1.75	5.84
OM (%)	2.76 ± 0.66	2.35 ± 0.86	17.4
CCE (g kg ⁻¹)	42.8 ± 1.59	40.8 ± 1.36	4.88
CEC (Cmol kg ⁻¹)	23.5 ± 0.40	18.8 ± 2.31	7.90
خاک منطقه چهار (پروفیل چهار) Soil area 4 (profile 4)			
pH	7.77 ± 0.21	7.65 ± 0.021	1.57
EC (dS m ⁻¹)	3.78 ± 1.58	2.45 ± 1.47	54.3*
OM (%)	2.60 ± 0.011	2.35 ± 0.063	10.6
CCE (g kg ⁻¹)	37.4 ± 1.73	30.8 ± 1.23	21.5
CEC (Cmol kg ⁻¹)	18.16 ± 0.40	17.3 ± 0.097	4.97
خاک منطقه پنجم (پروفیل پنجم) Soil area 5 (profile 5)			
pH	7.70 ± 0.021	7.60 ± 0.32	1.32
EC (dS m ⁻¹)	3.78 ± 1.58	2.46 ± 1.42	53.6*
OM (%)	2.60 ± 0.11	2.24 ± 0.05	9.70
CCE (g kg ⁻¹)	37.4 ± 1.73	30.3 ± 1.60	23.4
CEC (Cmol kg ⁻¹)	20.13 ± 0.80	17.6 ± 0.045	14.1

* معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد می‌باشد

* Significant at a probability level of 5%

فلزات سنگین خاک

شکل قابل استخراج با (DTPA) عناصر

مقایسه میانگین غلظت شکل DTPA عناصر پنج‌گانه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) ما بین خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب و خاک شاهد نشان داد که آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل توجه شکل قابل استفاده عناصر فوق شده است (جدول 4). این افزایش برای نیکل بیشترین مقدار و بعد از آن به ترتیب کادمیم، روی، مس و سرب قرار دارد. چنین نتایج و داده‌هایی در مطالعات گذشته نیز گزارش شده است (24) اگرچه تحقیقات قبلی بیشتر تأثیر آبیاری با فاضلاب خام را بررسی کردند. با این وجود بر اساس منابع داخلی (13) و خارجی (10) مقدار بخش قابل استخراج با DTPA عناصر پنج‌گانه در هر دو اراضی تحت آبیاری با فاضلاب و شاهد کمتر از حد قابل قبول بود به استثنای کادمیم که در خاک‌های منطقه دو و سه بالاتر از حد استاندارد بود. این نشان می‌دهد که کادمیم قابل جذب می‌تواند در دو سایت فوق باعث تجمع و آلودگی محصولات زراعی این منطقه شود بنابراین بایستی عملیات‌های مدیریتی مناسب برای مقابله با این پتانسیل لحاظ شود. همچنین بیشترین افزایش در مقدار کادمیم قابل استفاده در خاک منطقه دو و سه مشاهده شد جایی که بیشترین مقدار CEC نیز وجود داشت. این ممکن است ناشی از این موضوع باشد که CEC نقش موثری در نگهداری کادمیم قابل استفاده داشته است. در مطالعات گذشته نیز چنین نتیجه و ارزیابی بیان شده است (24). در خاک‌های متعلق به سایت‌های مختلف تحت نفوذ فاضلاب غلظت عناصر پنج‌گانه با روند منظم و یکسان تغییر نیافته بودند طوری که برای عناصر نیکل (142%) و مس (87%) بیشترین افزایش غلظت در خاک‌های سایت پنج مشاهده شد، در حالی که کادمیم (125%) و روی (73%) بیشترین افزایش غلظت را پس از آبیاری در خاک سایت دو نشان دادند چنین وضعیتی برای عنصر سرب (32%) در خاک منطقه چهار مشاهده گردید. این نتایج و تغییرات ممکن است مربوط به کمیت و کیفیت فاضلاب ورودی به مزارع، خصوصیات مختلف خاک‌ها و اثرات متقابل مابین فاضلاب ورودی و خاک‌های دریافت کننده این فاضلاب باشد.

شکل کل عناصر

آبیاری با فاضلاب باعث افزایش قابل ملاحظه شکل کل عناصر مس، روی، کادمیم، سرب و نیکل خاک نسبت به خاک شاهد شده است (جدول 4) و این افزایش برای این عناصر به صورت $Cd > Zn > Pb > Ni > Cu$ بود. این نتایج می‌تواند ناشی از ورود عناصر فوق از طریق فاضلاب و برهمکنش فاضلاب و خاک‌های دریافت کننده آن باشد. افزایش معنی‌دار غلظت کل عناصر سنگین پس از آبیاری با

فاضلاب در سایر تحقیقات مربوط به ایران نیز گزارش شده است (22 و 23). میانگین مس کل از 10 تا 32 درصد در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب نسبت به شاهد افزایش یافته است با این وجود میانگین این عنصر در تمام خاک‌های مورد مطالعه کمتر از حد قابل قبول آن‌ها بود و در حال حاضر در محدوده خطر آفرین نیست. در مقایسه با شاهد، مقدار روی کل در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب در اکثر خاک‌ها به طور معنی‌داری به صورت خاک منطقه دو (157%) < خاک منطقه سه (112%) < خاک منطقه پنج (64%) < خاک منطقه چهار (54%) < خاک منطقه یک (12%) افزایش یافته بود. اما با این وجود میانگین عنصر نیز فوق بر اساس منابع مختلف کمتر از حد آستانه قابل قبول بود. در بین عناصر پنج‌گانه این مطالعه عملیات آبیاری با فاضلاب بیشترین افزایش را در مقادیر عنصر کادمیم ایجاد کرده است به طوری که در خاک‌های مناطق مختلف یک افزایش دو تا سه برابر در غلظت کادمیم کل نسبت به اراضی تحت آبیاری با آب چاه اتفاق افتاده بود. از طرف دیگر غلظت کادمیم در اراضی تحت آبیاری با فاضلاب بیش از دو برابر حد مجاز این عنصر در منابع مختلف بین‌المللی و داخلی است (جدول 4) که می‌تواند بسیار نگران‌کننده باشد. این نگرانی می‌تواند بیشتر شود با در نظر گرفتن این حقایق که: 1- کادمیم در بین عناصر سنگین به عنوان متحرک‌ترین عنصر شناخته شد (15) و 2- شکل قابل استفاده این عنصر نیز در بعضی خاک‌های این منطقه بالاتر از حد مجاز می‌باشد. بنابراین کادمیم خطرناک‌ترین عنصر این مطالعه است که می‌تواند تبعات ناگواری را در چرخه خاک، آب، گیاه، حیوان و انسان ایجاد کند. افزایش معنی‌دار و نگران‌کننده کادمیم پس از آبیاری با فاضلاب در حومه مناطق شهری توسط سایر محققان نیز گزارش شده است (6 و 11). همچنین پس از حدود 10 سال آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده میانگین نیکل کل در دامنه 14 تا 127 درصد (در مقایسه با شاهد) افزایش یافته است. اگرچه این افزایش نگران‌کننده است و بایستی راهکارهای مدیریتی مناسب برای مقابله با آن در نظر گرفته شود اما دامنه این عنصر هنوز کمتر از آستانه قابل قبول آن می‌باشد. همانند سایر عناصر این مطالعه سرب کل نیز به طور قابل توجه و نگران‌کننده (در دامنه 11 تا 203 درصد) در اثر عملیات آبیاری با فاضلاب تصفیه شده افزایش یافته است و بیشترین میزان این عنصر در خاک‌های منطقه سه (همانند کادمیم) مشاهده شد. با این وجود دامنه تغییرات آن براساس منابع داخلی و خارجی در آستانه قابل قبول بود (جدول 4). به طور کلی آبیاری با فاضلاب تصفیه شده در طی یک دوره حدود 10 ساله در بخشی از اراضی حومه شهر ارومیه باعث افزایش قابل توجه و نگران‌کننده شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر مس، روی، کادمیم، نیکل و سرب شده است اگرچه این افزایش برای عناصر فوق در دامنه‌های کاملاً مختلفی اتفاق افتاده است که می‌تواند ناشی از

تواند ناشی از این حقیقت باشد که فاضلاب تصفیه شده شهر ارومیه پس از خروج از تصفیه‌خانه از طریق یک کانال روباز به طرف دریاچه ارومیه و مزارع مسیر هدایت می‌شود، به احتمال زیاد در این مسیر مقداری فاضلاب خام نیز از منابع مختلف به آن افزوده می‌گردد.

کیفیت و منابع فاضلاب و خصوصیات متفاوت خاک‌های دریافت کننده این فاضلاب باشد (6 و 23). از طرف دیگر در مقایسه با مطالعات مشابه (23) غلظت عناصر پنج‌گانه مورد تحقیق در فاضلاب تصفیه شده این مطالعه به‌طور معنی‌داری بیشتر است و این رفتار می‌-

جدول 4- اثرات آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بر غلظت شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر کادمیوم، مس، سرب، روی و نیکل
Table 4- Effects of irrigation with treated wastewater on the concentration of DTPA and Total elements of Cd, Cu, Pb, Zn and Ni

عناصر سنگین Heavy metals	خاک منطقه یک (پروفیل یک) Soil area 1 (profile 1)		درصد تغییرات Percent change (%)	استاندارد Standard		
	خاک آبیاری شده با فاضلاب Irrigated soil with sewage	خاک آبیاری شده با آب چاه Irrigated soil with well water		داخلی Domestic	خارجی Foreign	
DTPA – Cd (mg.kg^{-1})		0.44 ± 0.10	0.285 ± 0.04	54.386*	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg.kg^{-1})		2.49 ± 0.275	2.213 ± 0.11	12.94	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg.kg^{-1})		2.043 ± 0.49	1.85 ± 0.17	10.43	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg.kg^{-1})		1.893 ± 0.49	1.395 ± 0.24	35.7*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg.kg^{-1})		1.39 ± 0.114	0.764 ± 0.07	81.94**	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg.kg^{-1})		10.62 ± 1.53	2.8 ± 1.52	279.3***	5	3
Total – Cu (mg.kg^{-1})		56.62 ± 2.71	49.75 ± 0.99	13.81	200	100
Total – Pb (mg.kg^{-1})		55.71 ± 5.98	49.56 ± 0.824	12.41	75	-
Total – Zn (mg.kg^{-1})		40.16 ± 3.19	20.204 ± 1.76	98.77**	360	300
Total – Ni (mg.kg^{-1})		21.14 ± 3.32	18.59 ± 1.36	13.72	110	110
خاک منطقه دو (پروفیل دو) Soil area 2 (profile 2)						
DTPA – Cd (mg.kg^{-1})		0.63 ± 0.13	0.28 ± 0.034	125***	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg.kg^{-1})		3.14 ± 0.31	2.65 ± 0.412	18.5	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg.kg^{-1})		1.96 ± 0.41	1.85 ± 0.17	5.95	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg.kg^{-1})		2.42 ± 0.24	1.39 ± 0.24	73.35**	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg.kg^{-1})		1.34 ± 0.32	0.75 ± 0.10	78.9**	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg.kg^{-1})		9.63 ± 1.7	2.81 ± 1.56	243***	5	3
Total – Cu (mg.kg^{-1})		55.6 ± 2.6	49.9 ± 0.68	11.3	200	100
Total – Pb (mg.kg^{-1})		4.25 ± 54.	48.9 ± 1.86	10.6	75	-
Total – Zn (mg.kg^{-1})		51.95 ± 2.35	20.2 ± 1.76	157***	360	300
Total – Ni (mg.kg^{-1})		50.7 ± 20.1	29.3 ± 1.96	73.1**	110	110
خاک منطقه سه (پروفیل سه) Soil area 3 (profile 3)						
DTPA – Cd (mg.kg^{-1})		0.615 ± 0.15	0.28 ± 0.03	119***	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg.kg^{-1})		2.78 ± 0.25	2.32 ± 0.19	19.8	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg.kg^{-1})		2.22 ± 0.11	1.85 ± 0.17	20	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg.kg^{-1})		2.25 ± 0.19	1.39 ± 0.24	61.3*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg.kg^{-1})		1.75 ± 0.19	0.75 ± 0.10	133***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg.kg^{-1})		11.7 ± 0.92	2.85 ± 1.56	310***	5	3
Total – Cu (mg.kg^{-1})		55.0 ± 2.8	49.9 ± 0.68	10.1	200	100
Total – Pb (mg.kg^{-1})		56.4 ± 3.12	18.6 ± 4.3	203***	75	-
Total – Zn (mg.kg^{-1})		42.8 ± 3.7	20.2 ± 1.76	112***	360	300
Total – Ni (mg.kg^{-1})		34.7 ± 1.79	29.3 ± 1.96	18.5	110	110

خاک منطقه چهار (پروفیل چهار)
Soil area 4 (profile 4)

DTPA – Cd (mg kg ⁻¹)	0.42 ± 0.045	0.21 ± 0.017	100**	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg ⁻¹)	3.47 ± 0.285	1.86 ± 0.11	86.6**	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg ⁻¹)	2.88 ± 0.20	2.18 ± 0.37	32.4*	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg ⁻¹)	2.47 ± 0.442	1.73 ± 0.06	42.8*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg ⁻¹)	1.57 ± 0.27	0.67 ± 0.28	135***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg ⁻¹)	11.6 ± 2.09	2.90 ± 1.45	302***	5	3
Total – Cu (mg kg ⁻¹)	57.2 ± 2.32	46.21 ± 3.16	23.8	200	100
Total – Pb (mg kg ⁻¹)	60.5 ± 0.66	37.16 ± 1.4	62.7*	75	-
Total – Zn (mg kg ⁻¹)	41.1 ± 2.79	27.2 ± 1.88	51.1*	360	300
Total – Ni (mg kg ⁻¹)	41.7 ± 3.68	18.4 ± 2.41	127***	110	110

خاک منطقه پنج (پروفیل پنج)
Soil area 5 (profile 5)

DTPA – Cd (mg kg ⁻¹)	0.39 ± 0.045	0.21 ± 0.017	85.7**	0.5	0.2 – 0.6
DTPA – Cu (mg kg ⁻¹)	3.48 ± 0.453	1.86 ± 0.12	87.1**	0.2 – 2	0.2 – 5
DTPA – Pb (mg kg ⁻¹)	2.55 ± 0.36	2.18 ± 0.37	16.9	-	5.2 – 10
DTPA – Zn (mg kg ⁻¹)	2.59 ± 0.4	1.73 ± 0.06	50.1*	0.2 – 6	0.6 – 10
DTPA – Ni (mg kg ⁻¹)	1.62 ± 0.14	0.67 ± 0.28	142***	-	0.2 – 2
Total – Cd (mg kg ⁻¹)	11.8 ± 2.65	2.90 ± 1.45	307***	5	3
Total – Cu (mg kg ⁻¹)	60.9 ± 1.80	46.2 ± 3.16	31.9*	200	100
Total – Pb (mg kg ⁻¹)	59.9 ± 0.61	37.2 ± 1.40	61.1*	75	-
Total – Zn (mg kg ⁻¹)	44.7 ± 4.37	27.2 ± 1.80	64.3*	360	300
Total – Ni (mg kg ⁻¹)	22.6 ± 5.80	18.4 ± 2.42	22.9	110	110

*, **, و *** به ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد، 1 درصد و 0/1 درصد می‌باشند.

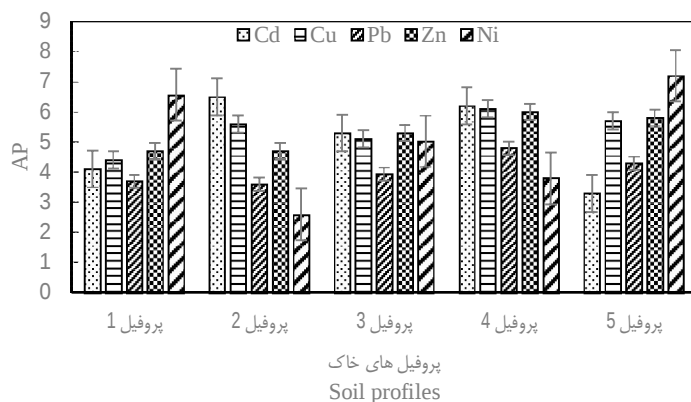
*, ** and *** significantly, at a probability levels of 5%, 1% and 0.1% respectively

ارزیابی شاخص‌های آلودگی خاک

شاخص درصد دسترسی فلزات سنگین (AP)

شاخص AP به عنوان بک شاخص مناسب برای مقایسه پتانسیل تحرک و سمیت فلزات سنگین در خاک می‌باشد (14 و 20). مقادیر این شاخص برای فلزات سنگین این مطالعه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) در خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب تصفیه شده محاسبه و در شکل 1 ارائه شده است. در اکثر پروفیل‌های مطالعه شده بیشترین مقدار AP مربوط به کادمیم بود که بیانگر سمیت و تحرک بیشتر این عنصر در مقایسه با سایر عناصر می‌باشد و در مقابل در اکثر خاک‌ها کم‌ترین مقدار شاخص فوق مربوط به سرب بود که نشان دهنده

حداقل تحرک این عنصر در مقایسه با سایر عناصر می‌باشد. تحرک-پذیری بیشتر کادمیم نسبت به سایر عناصر در مطالعات و تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است به عنوان مثال راموس و همکاران (20) در خاک‌هایی از اسپانیا و رضاپور و همکاران (25) در خاک‌های ایران براساس محاسبه شاخص AP کادمیم را به عنوان متحرک‌ترین عنصر و منگنز را به عنوان کم‌تحرک‌ترین عنصر در خاک‌های آهکی و قلیایی گزارش کردند. از طرف دیگر در هر پروفیل بین مقادیر AP عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. اما در سایت‌های 1 و 5 مقدار AP نیکل به‌طور معنی‌داری بیشتر از سایر عناصر بود.



شکل 1- مقادیر درصد دسترسی فلزات کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل در پروفیل‌های مختلف
Figure 1- Percentage of Cd, Cu, Pb, Zn and Ni in various profiles

این امر احتمالاً ناشی از مصرف یک دهه آب فاضلاب حاوی این عناصر برای آبیاری این اراضی کشاورزی است. چنین نتایجی با مطالعات پارسفر و همکاران (18) مطابقت دارد. از طرف دیگر علت افزایش کادمیم و افزایش کلاس آلاینده‌گی آن می‌تواند ناشی از ترکیبات موجود در فاضلاب مصرفی باشد.

شاخص آلودگی ترکیبی (PIN)

مقادیر شاخص آلودگی ترکیبی برای عناصر مورد مطالعه (کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل) در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده محاسبه گردید (شکل 2).

شاخص آلاینده‌گی منفرد عناصر (PI)

مقادیر فاکتور آلاینده‌گی منفرد عناصر (PI) برای خاک‌های مورد مطالعه در جدول 5 نشان داده شد. براساس این جدول بیشترین مقدار PI برای عناصر کادمیم در پروفیل سه، مس در پروفیل چهار، سرب در پروفیل چهار، روی در پروفیل دو و نیکل در پروفیل چهار مشاهده شد. همچنین میانگین فاکتور آلاینده‌گی منفرد عناصر پنج‌گانه به صورت توالی $Cd > Zn > Ni > Pb > Cu$ بوده عنصر کادمیم در خاک‌های مطالعه شده دارای بالاترین کلاس فاکتور آلاینده‌گی منفرد عناصر (کلاس 4) و از لحاظ آلودگی در سطح آلودگی بالا قرار داشت و وضعیت مابقی عناصر در سطح آلودگی کم تا متوسط قرار داشت که

جدول 5- شاخص PI

Table 5- PI index

شماره پروفیل Profile number	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni
پروفیل یک Profile 1	3.79 (4)	1.14 (2)	1.12 (2)	1.98 (2)	1.14 (2)
پروفیل دو Profile 2	3.43 (4)	1.11 (2)	1.11 (2)	2.57 (3)	1.73 (2)
پروفیل سه Profile 3	4.09 (4)	1.10 (2)	1.16 (2)	2.12 (3)	1.18 (2)
پروفیل چهار Profile 4	4.02 (4)	1.24 (2)	1.28 (2)	1.51 (2)	2.27 (3)
پروفیل پنج Profile 5	4.07 (4)	1.32 (2)	1.27 (2)	1.64 (2)	1.23 (2)
میانگین Mean	3.88 (4)	1.18 (2)	1.19 (2)	1.96 (2)	1.51 (2)

2: class2: Low pollution, 3: class 3: Moderate pollution, 4: class 4: High pollution

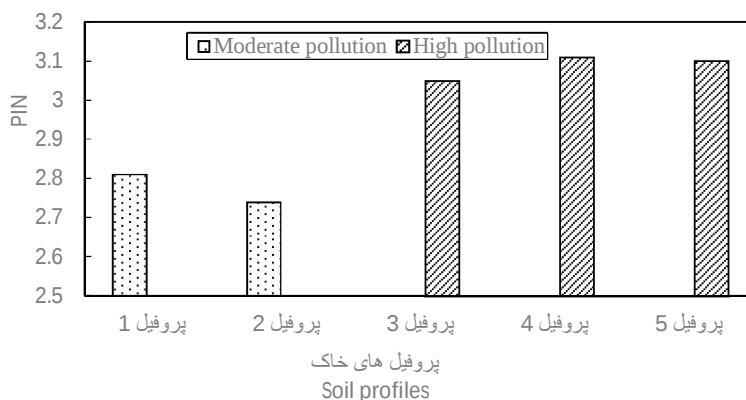
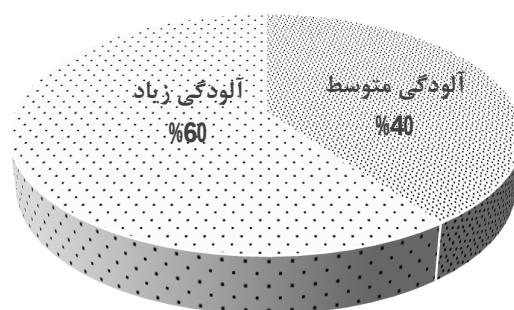
پروفیل چهار < پروفیل دو < پروفیل پنج < پروفیل سه < پروفیل یک بود (شکل 3). همچنین شاخص فوق در خاک‌های مورد مطالعه در سطح آلودگی کم (کلاس 2) قرار داشت. اما اگر چنین روندی ادامه یابد آلودگی در سطح بالای خاک‌های این منطقه در آینده محتمل است. به‌طور کلی با در نظر گرفتن سه شاخص PI، PIN و PLI می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که خاک متعلق به پروفیل چهار با داشتن بیشترین کمیت شاخص‌های فوق در مقایسه با سایر خاک‌ها از آلودگی بیشتری برخوردار بود و کادمیم بیشترین نقش را در افزایش مقدار این شاخص نشان داد. بنابراین کادمیم خطرناک‌ترین عنصر برای سیستم آب، خاک و گیاه اراضی این منطقه است که بایستی عملیات مدیریتی مناسب برای کاهش مقدار آن در نظر گرفته شود.

با در نظر گرفتن مطالب فوق به نظر می‌رسد که کادمیم در شرایط حاضر عنصر خطرناکی برای زنجیره خاک، آب، گیاه و انسان در این منطقه می‌باشد که نیاز به برنامه مدیریتی و حفاظتی برای کاهش دامنه این عنصر ضروری به نظر می‌رسد.

بر این اساس بیشترین و کم‌ترین میزان شاخص PIN به ترتیب در پروفیل‌های چهار و دو مشاهده شد و توزیع آن نیز به صورت پروفیل چهار < پروفیل پنج < پروفیل سه < پروفیل یک < پروفیل دو بود. همچنین 60 درصد از خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب این منطقه در سطح آلودگی بالا (کلاس 5) و 40 درصد در سطح آلودگی متوسط (کلاس 4) قرار داشتند (شکل 2). بیشترین تأثیر از بین عناصر پنج-گانه این مطالعه مربوط به عناصر کادمیم و بعد روی در ایجاد این سطح آلودگی بوده و این امر نشان دهنده بالا بودن میزان این فلزات در فاضلاب و تجمع آن‌ها در قسمت‌های سطحی خاک است.

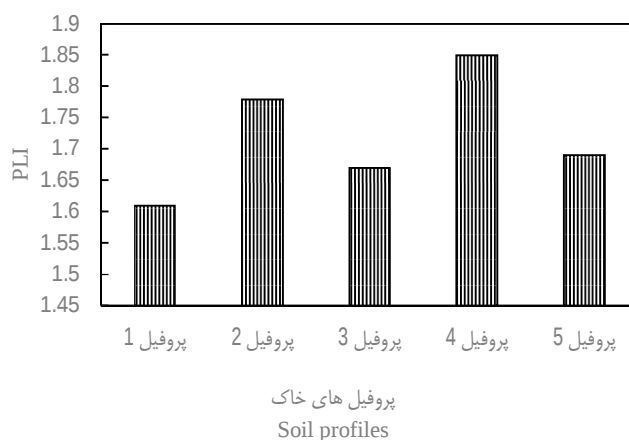
شاخص بار آلودگی (PLI)

شاخص بار آلودگی عناصر پنج‌گانه مورد مطالعه در خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده به گونه‌ای بود که به مانند شاخص آلودگی ترکیبی بیشترین میزان آن در پروفیل چهار مشاهده شد. توزیع پروفیلی این شاخص در منطقه مورد مطالعه به صورت



شکل 2- شاخص آلودگی ترکیبی (PIN) در خاک‌های تحت نفوذ فاضلاب

Figure 2- Nemerow pollution index (PIN) in sewage-affected soils



شکل 3- شاخص بار آلودگی (PLI) در خاک های تحت نفوذ فاضلاب
Figure 3- Pollution index (PLI) in sewage-affected soils

حومه شهر استفاده شود و یا تکنیک‌های دقیق‌تری برای تصفیه فاضلاب‌های شهر ارومیه به کار گرفته شود، طوری که قادر به حذف عناصر سنگین و املاح محلول موجود در فاضلاب شده و مانع از افزایش آلودگی این فلزات در خاک شوند. همچنین بایستی از ورود فاضلاب‌های خام به کانال انتقالی فاضلاب تصفیه شده در مسیر خروجی از تصفیه‌خانه تا مزارع زراعی این منطقه ممانعت شود و به صورت دوره‌ای غلظت عناصر سنگین موجود در فاضلاب، خاک و گیاهان تحت آبیاری با این فاضلاب آنالیز شوند. از طرفی غلظت عناصر پنج‌گانه این مطالعه بایستی در قسمت‌های مصرفی محصولات زراعی این منطقه اندازه‌گیری و همچنین فاکتور غلظت و فاکتور انتقال عناصر فوق نیز از خاک به بخش‌های مختلف (ریشه، ساقه و دانه) گیاهان زراعی غالب این منطقه محاسبه شوند.

نتیجه‌گیری

براساس یافته‌های این تحقیق یک تجمع معنی‌داری از شکل‌های قابل استفاده و کل عناصر کادمیم، مس، سرب، روی و نیکل در اثر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده در خاک‌های مختلف این منطقه اتفاق افتاده است و چنانچه این روند آبیاری ادامه داشته باشد قطعاً در آینده صدمات جبران‌ناپذیری به اکوسیستم این اراضی وارد می‌شود. همچنین در بین این عناصر کادمیم در همه خاک‌های تحت آبیاری با فاضلاب تصفیه شده این مطالعه بیشترین افزایش را نشان داد. از طرفی کادمیم بیشترین تأثیر را نیز در ایجاد کلاس شاخص‌های آلودگی خاک داشت. بنابراین با توجه به این نتایج برای جلوگیری از تخریب سیستم آب، خاک و گیاه این منطقه بایستی در صورت امکان از این فاضلاب برای مصارف غیرکشاورزی مانند آبیاری فضای سبز

منابع

- 1- Abedi-Koupai J.B., Mostafazadeh-Farid M., Afyuni and Bagheri M.R. 2006. Effect of treated wastewater on soil chemical and physical properties in an arid region. *Plant, soil and Environmental*, 52(8):335-344.
- 2- Bai J., Yang Z., Cui B., Gao H., Ding Q. 2010. Some heavy metals distribution in wetland soils under different land use types along a typical plateau lake, China. *Soil & Tillage Research*, 106: 344-348.
- 3- Chapman H.D. 1965. Cation exchange capacity. In: Black CA (ed) *Methods of soil analysis*, Part2. American Society of Agronomy, Madison, pp: 891-900.
- 4- Cheng J.L., Shi Z., Zhu Y.W. 2007. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China. *Journal Environmental Science*, 19: 50-54.
- 5- Dahnke W.C., and Journal G.V. 1990. In Westerman RL (ed) *soil Testing and plant Analysis*: American Society of Agronomy Inc. Madison, Wisconsin, USA, 6, 120-140.
- 6- Farahat E., and Linderholm W. 2015. The effect of long-term wastewater irrigation on accumulation and transfer of heavy metals in *Cupressus sempervirens* leaves and adjacent soils. *Science of Total Environment*. SID, 513: 1-7.
- 7- FAO. 1992. *Wastewater Treatment and Use in Agriculture*. Irrigation and Drainage Paper, No 47, FAO, Rome, Italy.
- 8- Hati K.M., Biswas A.K., Bandyopadhyay K.K., and Misra A.K. 2007. Soil properties and crop yields on a vertisol in India with application of distillery effluent. *Soil & Tillage Research*, 92(1-2):60-68.
- 9- Iranian Environmental Protection Agency Research Deputy. 1992. *Sewage outlet standard*. Environmental Education Office. (In Persian).

- 10- Kabata-Pendias A. 2010. Trace elements in soils and plants. Boca Raton (FL): CRC Press, 157-166.
- 11- Klay S.A., Charef A., Ayed B., Houman and Rezgu F. 2010. Effect of irrigation with treated wastewater on geochemical properties (saltiness, C,N and heavy metals) of isohumic soils (Zaouit Sousse perimeter, Oriental Tunisia). *Desalination*, 253:180-187.
- 12- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil science society of America Journal*, 42(3), 421-428.
- 13- Malakouti M.J., and Gheibi M.N. 2000. Determination of critical levels of nutrients in soils, plant and fruit for the quality and yield improvements of Iran's strategic crops. *Applied Agriculture Science Publishers*, Tehran, Iran. (In Persian).
- 14- Massas I., Ehaliotis C., Gerontidis S., and Sarris E. 2009. Elevated heavy metal concentrations in top soils of an Aegean island town (Greece): total and available forms, origin and distribution. *Environmental Monitoring Assessment*. 151: 105-116.
- 15- Mc Bride M.B., Richards B.K., Steenhuis T., Russo J.J., and Save S. 1997. Mobility and solubility of toxic metals and nutrients in soil fifteen years after sludge application, *Soil Science*. 7: 487-500.
- 16- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total Carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis*. Part, 3(3), 961-1010.
- 17- Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page PL (ed) *Methods of soil analysis*, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, pp: 181-199.
- 18- Parsfar N., Maroufi S., Rahimi A.H., and Maroufi H. 2015. Evaluation of the rate of Cd, Zn, Cu and Pb in irrigation soil with municipal wastewater. *Journal of Water and Soil Science*, Vol. 25, No.1, Page 1 to 25. (In Persian with English abstract).
- 19- Rattan R.K., Datta S.P., Chhonkar P.K., Suribabu K and Singh A.K. 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater-A case study. *Agriculture, Ecosystems and Environmental*, 109:310-322.
- 20- Ramos-Miras J.J., Roca-Perez L., Guzmán-Palomino M., Boluda R., and Gil C. 2011. Background levels and baseline values of available heavy metals in Mediterranean greenhouse soils (Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 110(2), 186-192.
- 21- Rezapour S., Jafarzadeh A.A., Samadi A., and Oustan S. 2010. Distribution of iron oxides forms on A transect of calcareous soils, north-west of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 56:165-182.
- 22- Rezapour S., and Samadi A. 2011. Soil quality response to long-term wastewater irrigation in Inceptisols from a semi-arid environment. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 91(3), 269-2.
- 23- Rezapour S., Samadi A., and Khodaverdiloo H. 2012. An Investigation of the soil property changes and Heavy metal accumulation in relation to long-term wastewater irrigation in the semi-arid Region of Iran. *Soil and Sediment contamination: An International Journal*, 20, 841-856.
- 24- Rezapour S., Kouchinezhad P., Samadi P., and Rezapour M. 2015. Level, pattern, and risk assessment of the selected soil trace metals in the calcareous-cultivated Vertisols. *Chemical Ecology*, 8:692-706.
- 25- Rezapour S., Kouchinezhad P., and Samadi A. 2017. The potential ecological risk of soil trace metals following over five decades of agronomical practices in a semi-arid environment. *Chemistry and Ecology*, 68-78.
- 26- Sharma R.K., Agrawal M., and Marshall F. 2007. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 66(2):258-266.
- 27- Smith J.L., and Doran J.W. 1996. Measurements and use of pH and electrical conductivity for soil quality analysis. In *Methods for assessing soil quality*. SSSA special publication 49 (pp. 169-185). Madison: Soil Science Society of America.
- 28- Tabari M., Salehi A., and Ali-Arab A.R. 2008. Effects of wastewater application on heavy metals (Mn, Fe, Cr and Cd) contamination in a black locust stand in semi-arid zone of Iran. *Research Journal of Environmental Science*, 7(4): 382-388.
- 29- Toze S. 2006. Reuse of effluent water (benefit and risks). *Agriculture Water Management*, 80(1-30):147-59.
- 30- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1993. Standards for use of disposal of sewage sludge, Final rules, 40 CFR, Parts 257, 403 and 503. *Federal Register*, 58 (32): 9248 – 9415.
- 31- Urmia Environmental Organization. 2008. Archive of figures.
- 32- WHO. 2006. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water, part II, Geneva.
- 33- Yu L., Zhang B., and Zhang S.Q. 2004. Heavy metal elements pollution evaluation on the ecological environment of the Sanjiang Plain based on GIS. *Chinese Journal of Soil Science*, 35(5), 529-532.

Effects of Treated Wastewater Irrigation on Heavy Metals Concentration, Distribution and Contamination of Soil

B. Atashpaz¹- S. Rezapour^{*2}- N. Ghaemian³

Received: 17-01-2018

Accepted: 30-05-2018

Introduction: Over the past decades, due to climate change and water scarcity, the recovery and use of urban wastewater, especially in arid and semi-arid climates, has increased. But since wastewater is considered as an unconventional source of water, its use in agriculture requires special management which, while benefiting from it, does not have environmental and health hazards in soil, plant and surface water and underground water resources. On the other hand, sewage systems often have significant amounts of heavy and toxic metals, the type and amount of which varies from place to place, and even in the specific location, over time. The soil also has a limited capacity to absorb and maintain these elements, and if their concentration exceeds the permitted range, they can cause pollution of the water, soil, plant and human cycle. Therefore, the present study was conducted to investigate the effect of irrigation with treated wastewater in Urmia city on concentrations, distribution and contamination of Zn, Cu, Cd, Pb and Ni elements.

Materials and Methods: In field work, 6 soil profiles (5 profiles from the wastewater-irrigated soils and a profile from the well-irrigated soil as control soil) were dug, described, and sampled. At around each profile, composite soil samples were also obtained in the root depth of the area (Ap horizon, the depth of 30 cm). Soil samples were first air-dried and passed through a 2-mm sieve and then analyzed for the determination of heavy metals. The available and total fraction of zinc (Zn), copper (Cu), cadmium (Cd), leads (Pb), and nickel (Ni) were extracted by DTPA method and concentrated acid (HNO₃) procedure, respectively. The content of Zn, Cu, Cd, Pb and Ni were determined by an atomic absorption spectrophotometer (Shimadzu AA-6300). Descriptive statistics were conducted using SPSS 16 for Windows. In order to study the effect of irrigation with treated wastewater on the extent of contamination of heavy metals, the AP (availability percentage), PI (Single-factor pollution index), NPI (Nemerows pollution index), and PLI (Pollution load index) in the affected soils with this wastewater was calculated. Also, all soil and water experiments were performed in 3 replicates and then, using the excel data software category, tables and charts were plotted.

Results and Discussion: The soils were alkaline and calcareous as characterized by high pH, ranging from 7.6 to 8, and calcium carbonate equivalent, ranging from 30 to 42%. On average, the value of the available fraction of the examined metals in the wastewater-irrigated soils ranged from 1.9 to 3.5 mg kg⁻¹ for Zn, 2.5- to 3.5 mg kg⁻¹ for Cu, 0.4 to 0.62 mg kg⁻¹ for Cd, 2 to 2.9 mg kg⁻¹ for Pb, and 1.34 to 1.75 mg kg⁻¹ for Ni. Comparing to the control, irrigation with wastewater resulted in a considerable build-up in the available fraction of the metals in the rank of Ni (79-142%)> Cd (54-125%)> Zn (35-73%)> Cu (13-87%)> Pb (6-32%). These patterns can be due to the quality and quantity of the used wastewater and impact of the used wastewater with its receiving soils. Similar to the available fraction, there was an increasing trend in the total fraction of metals in the order of Cd> Zn>Pb> Ni> Cu following wastewater irrigation. In this context, the mean content of total Zn, Cu, Cd, Pb, and Ni in wastewater-irrigated soils was as 51-157%, 10-32%, 243-310, 11-203%, and 13-126% higher than those of control soil, respectively. In spite of such enrichment, only the Cd values exceeded the maximum acceptable limits. The AP index is an appropriate index to compare the mobility potential and the toxicity of heavy metals in soil. In this study, the highest rate of this index among the heavy metals was related to Cd and its lowest level was related to Pb, which showed more toxicity and more mobility of Cd compared with other elements. The average of single-factor pollution index of five elements was observed in sequence Cd> Zn> Ni>Pb> Cu that the element of Cd had the highest class of PI (class 4). The highest and lowest of NPI values of five elements were observed in profiles 4 and 2, respectively. Also, the greatest effect of the five elements of this study is on the elements of Cd and Zn in the generation of this level of contamination. The pollution index of the five studied elements in irrigated soils with treated wastewater was similar to the NPI, its maximum was observed in profile 4 and Cd showed the highest effect on increasing the value of this index.

1 and 2- Former M.Sc. Student of Agriculture Engineering Science and Associate Professor, Department of Soil Sciences, Faculty of Agriculture, Urmia University

(*- Corresponding Author Email: S_Rezapour2000@yahoo.com)

3- Former Employee of Urmia Soil and Water Research Institute

Conclusions: The results of this study showed that irrigation with sewage significantly increased the available fraction of the metals in the order of Ni (78.9-141.8%)> Cd (54.4-125%)> Zn (35.7-73.3%)>Cu (13-87%)>Pb (6-32.3%) compared to the control. However, with the exception of cadmium, the available fraction of other elements was within the permissible limit. Compared to the control, in the majority of studied soils, the total fraction of the metals (with the exception of copper) was significantly increased and the lowest and highest increase associated with Cu (10-32%) and Cd (2 - 3 times). Also, the results of pollutant indices showed that the majority of the studied soils were in the low to high contamination and Cd was known as the major metal affecting the indices yield.

Keywords: DTPA fraction, Pollution index, Total metal fraction, Urmia plain

اثر تغییر کاربری اراضی بر برخی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک منطقه سروک، شهرستان یاسوج

فاطمه مهماندوست^۱ - حمیدرضا اولیایی^{۲*} - ابراهیم ادهمی^۳ - رضا نقی‌ها^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

چکیده

تغییر کاربری اراضی از قبیل تغییر جنگل به اراضی تحت کشت به طور معنی‌داری می‌تواند بر خصوصیات خاک تأثیر گذاشته و فرآیندهای تشکیل خاک را تحت تأثیر قرار دهد. از آنجایی که تغییر کاربری جنگل‌های زاگرس روند رو به رشدی دارد، به منظور بررسی اثرات این تغییر کاربری‌ها بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک در منطقه سروک شهرستان یاسوج، از سه کاربری جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم، ۵ نمونه خاک سطحی (۰-۲۰ سانتی‌متر) برداشت و پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام شد. آزمایش‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. نتایج تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های به دست آمده از سه کاربری نشان داد که به دنبال تغییر کاربری اراضی جنگلی، مقادیر هدایت الکتریکی (۴۰ درصد)، ماده آلی (۷۴ درصد)، نیتروژن کل (۷۵ درصد)، پتاسیم قابل دسترس (۴۹ درصد)، تنفس پایه (۷۶ درصد)، تنفس برانگیخته (۷۴ درصد)، جمعیت قارچ (۱۱ درصد)، آنزیم‌های اسید فسفاتاز (۵۵ درصد) و آلکالین فسفاتاز (۴۷ درصد) در کاربری زراعی کاهش یافتند. این در حالی است که جمعیت باکتری در کاربری زراعی افزایش یافت (۸ درصد). مقدار فسفر قابل جذب تفاوت معنی‌داری را نشان نداد. به طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که در پی تخریب جنگل و تغییر کاربری، ماده آلی خاک و شاخص‌های مرتبط با آن به خصوص ویژگی‌های زیستی به میزان بیشتری تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.

واژه‌های کلیدی: آنزیم‌های خاک، جمعیت قارچ، خاک جنگلی، عناصر خاک

مقدمه

در چهار قرن گذشته حدود ۳۰ درصد از اراضی جنگلی و مراتع طبیعی، به زمین کشاورزی تبدیل شده‌اند که این موضوع سبب هدر رفت بیشتر کربن آلی و تولید دی‌اکسید کربن و انتشار آن به اتمسفر شده است. حدود ۳۴ درصد از کل میزان کربن منتشر شده ناشی از تغییر کاربری اراضی و ۶۶ درصد آن از طریق احتراق سوخت‌های فسیلی وارد هوا می‌گردد. جنگل‌زدایی و تغییر کاربری اراضی از طریق افزایش نسبت انتشار کربن، اثرات قابل ملاحظه‌ای بر چرخه جهانی کربن دارند (۲۷).

محققان گزارش نموده‌اند که تغییر کاربری از طریق عملیات شخم، جنگل‌تراشی، چرای بی‌رویه و استفاده از کودهای معدنی در عرصه‌های طبیعی به تحقق می‌پیوندد و می‌تواند باعث ایجاد تغییرات در ویژگی‌های خاک شود. کاهش حاصلخیزی خاک بر اثر شست و شو و از دسترس خارج شدن عناصر غذایی که ناشی از بروز پدیده فرسایش است می‌تواند بر اثر تغییر کاربری اراضی به وجود آید (۴۹).

تعیین اثرات کاربری بر خاک، از طریق مطالعه و ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک امکان‌پذیر است. یکی از مسائل مهم در دنیا

تغییر کاربری زمین نمونه‌ای مهم از تأثیرگذاری انسان بر محیط است، بنابراین به منظور برنامه‌ریزی و کنترل زمین و تحولات آن، لازم است عوامل تأثیرگذار بر آن را شناسایی و ارزشیابی نمود (۳۲). شاخص‌های کیفیت خاک به صورت فرایندها و ویژگی‌هایی از خاک تعریف می‌شوند که به تغییر کاربری خاک حساس باشند. این ویژگی‌ها برای انجام یک ارزیابی ساده و کاربردی کیفیت خاک، اهمیت دارند (۱۲). تغییر کاربری زمین موجب تغییر در پوشش گیاهی، هیدرولوژی و نیز بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک می‌شود که بسته به شرایط محیطی و اقلیمی، ممکن است آثاری مثبت و یا منفی بر کیفیت خاک داشته باشد (۴۴).

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشجویان گروه علوم خاک، دانشگاه یاسوج

(Email: Owliaie@gmail.com)

(*) - نویسنده مسئول:

۴ - استادیار گروه علوم دام، دانشگاه یاسوج

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.71746

تجزیه آسان مانند گلوکز می باشد، می تواند نشان دهنده میزان جمعیت فعال میکروبی و گاهی میزان فراهمی زیستی کربن برای هتروتروف ها باشد (۴۳).

از آن جایی که آنزیم های خاک یکی از شاخص های مناسب زیستی خاک هستند، این پژوهش با بررسی آن ها در کاربری جنگل متراکم، جنگل نیمه متراکم و کاربری زراعی فعالیت زیستی خاک را ارزیابی کرده است. علی اصغر زاد و همکاران (۲) نشان دادند که تغییر کاربری به کشاورزی همواره سبب تخریب خاک و کاهش کیفیت آن نمی شود. اگر مدیریت صحیح انجام گیرد، ممکن است شاخص های کیفیت خاک بهبود یابند. همچنین تبدیل زمین های بایر با پوشش گیاهی ضعیف به کشاورزی و اعمال مدیریت های مناسب، منجر به بهبود کیفیت خاک می گردد.

منطقه یاسوج در طی ۴۰ سال گذشته از یک منطقه نسبتاً بکر به منطقه ای شهری تبدیل شده است. رشد جمعیت، کمبود اراضی قابل کشت مناسب به دلیل کوهستانی و تپه ماهوری بودن منطقه، قطع درختان و تغییر کاربری جنگل های در طی این دوره از مهمترین عوامل مؤثر در تخریب خاک در این منطقه بوده است. این تغییرات بر خاک و ویژگی های مختلف آن اثراتی داشته است. بنابراین پژوهش حاضر به منظور بررسی تأثیر تغییر کاربری جنگلی و اثرات ناشی از تخریب آن بر برخی از شاخص های فیزیکی، شیمیایی و زیستی در منطقه سروک یاسوج در قالب یک مطالعه موردی انجام گرفته است.

مواد و روش ها

منطقه سروک در ۴ کیلومتری جنوب شهر یاسوج و در حد فاصل مختصات جغرافیایی $30^{\circ}36'11''$ تا $30^{\circ}37'47''$ عرض شمالی و $51^{\circ}36'14''$ تا $51^{\circ}37'00''$ طول شرقی واقع شده است. عمده دشت و دامنه بر روی سازند رازک و تراس های قدیمی و واریزه های آبرفتی بادی زنی شکل آهکی قرار گرفته است. ارتفاع منطقه در دامنه ۱۸۳۳ تا ۱۸۶۹ متر می باشد. میانگین بارش و دمای سالانه منطقه به ترتیب ۸۰۰ میلی متر و ۱۴ درجه سانتی گراد می باشد. در بازدیدهای صحرایی، از هر کاربری (جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و کشت دیم) ۵ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۲۰ سانتی متر) به صورت تصادفی برداشت شد. نمونه ها در هر کاربری بر روی مواد مادری مشابه و تقریباً در یک خط ارتفاعی برداشت تا اثر عواملی چون پستی و بلندی و جنس مواد مادری به حداقل برسد. کشاورزان برای کشت دیم (عمدتاً جو) به طور معمول، به جز مقادیری کود اوره، کودی (شیمیایی و یا آلی) مورد استفاده قرار نداده اند. نمونه های خاک پس از هوا خشک شدن و عبور از الک دو میلی متری به آزمایشگاه انتقال یافتند. نمونه های مرتبط با آزمایش های زیستی تا زمان انجام آزمایش در یخچال در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. آزمایش ها به

اثرات مخرب کشاورزی بر کیفیت خاک است. این اثرات مخرب می تواند محدوده وسیعی از تغییر خاک شامل ویژگی های فیزیکی نظیر فشردگی خاک، کاهش آبگذری خاک ها، تخریب ساختمان خاک و تغییر بافت خاک، خصوصیات شیمیایی نظیر انباشتگی برخی عناصر نظیر فسفر، کاهش برخی دیگر نظیر پتاسیم، شست و شوی برخی دیگر نظیر نیترات، تجمع املاح و شور شدن خاک ها و خصوصیات زیستی خاک نظیر کاهش جمعیت میکروبی خاک، کاهش فعالیت جانداران خاک، کاهش ماده آلی خاک و آنزیم های مفید خاک باشد.

عمادی و همکاران (۱۳) در مطالعه خود تحت عنوان اثر تغییر کاربری بر خصوصیات خاک در ارتفاعات شمال ایران به این نتیجه رسیدند که کشت و زرع و تغییر کاربری به میزان زیادی از کربن آلی، ماده ای آلی، ازت کل و فسفر موجود در خاک می کاهد. فو و همکاران (۱۶) بیان کردند که تغییر کاربری اکوسیستم های جنگلی در منطقه ای در در کشور چین سبب کاهش مواد آلی، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم قابل دسترس شده است، در حالی که تغییر کاربری از زراعت به جنگل در طی حدود ۲۰ سال منجر به افزایش مواد آلی (۲۱٪)، نیتروژن کل (۱۸٪)، نیتروژن قابل دسترس (۶۵٪)، فسفر قابل دسترس (۱۷٪) و پتاسیم قابل دسترس (۱۷٪) شد.

جمعیت جانداران ریز، متوسط و بزرگ، تنفس خاک، فعالیت های آنزیمی، زیست توده میکروبی و شدت معدنی شدن عناصر غذایی از شاخص های زیستی کیفیت خاک هستند. به نظر می رسد زیست توده میکروبی، تنفس خاک و فعالیت های آنزیمی بیشتر از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به تغییرات کاربری اراضی حساس هستند (۵۱) و (۵۶). چندین تحقیق بر روی اثرات مدیریت کشاورزی بر فعالیت میکروبی خاک انجام شده (۱ و ۴۶)، اما در خصوص تأثیر مدیریت در اکوسیستم های جنگلی پژوهش های زیادی انجام نشده است (۴۸). تبدیل مواد آلی و فعالیت های زیست پایایی در ارتباط می باشند، یافتن عوامل فیزیکی و شیمیایی متفاوت اثرگذار بر فعالیت های آنزیمی دارای اهمیت ویژه ای است. آنزیم های خاک و ریز موجودات عوامل اصلی و پایه ای فرآیندهای زیستی خاک محسوب می شوند (۳۱).

آنزیم های اسید فسفاتاز و آلکالین فسفاتاز در واقع شاخص ها و کاتالیزورهای چرخه های بیوشیمیایی و غذایی هستند که در خاک روی می دهند و به ترتیب توسط ریشه گیاهان و ریز موجودات خاک تولید می شوند (۱۴). قارچ های خاک زری در چرخه عناصر غذایی اهمیت زیادی دارند. بسیاری از قارچ ها در تبدیل مواد آلی به شکل معدنی با تولید آنزیم های مختلف نقش مهمی دارند. از آن جایی که بخش عمده فسفر خاک در خاک های آلی به شکل آلی می باشد، نقش قارچ ها در معدنی کردن این ترکیبات بسیار با اهمیت است. تنفس برانگیخته (ناشی از سوختن) شاخص بسیار مهمی از جمعیت فعال میکروبی خاک می باشد. تنفس برانگیخته که میزان کربن معدنی متصاعد شده از تنفس میکروبی پس از اضافه کردن سوختن با

داد (جدول ۱ و ۲). به نظر می‌رسد که مواد آلی خاک در نتیجه تجزیه خود و همچنین در نتیجه تولید اسیدهای آلی ناشی از تجزیه با کانی‌های خاک واکنش و موجب رهاسازی یون‌ها و در نتیجه موجب افزایش هدایت الکتریکی خاک می‌شود. حاج عباسی و همکاران (۱۷) گزارش نمودند که در اثر تبدیل مرتع به زمین زراعی میزان هدایت الکتریکی خاک تغییر نکرد. شعبان‌زاده و همکاران (۵۰) طی پژوهش‌های خود در منطقه کیاسر، یافته‌های مبنی بر نبود اختلاف معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی بین کاربری جنگل و کشاورزی را گزارش کردند.

مقادیر حاصل از اندازه‌گیری pH کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم منطقه سروک برابر ۷/۹۰، ۸/۰۹ و ۸/۲۵ بود که افزایش معنی‌داری در سطح ۱ درصد به دنبال تغییر کاربری اراضی جنگلی و قطع درختان مشاهده شد (جدول ۱ و ۲). خرمالی و همکاران (۲۲) بیان نمودند که در کاربری جنگلی به دلیل وزن مخصوص کمتر و تخلخل بیشتر، نفوذ عمقی آب به خاک بیشتر می‌باشد. این موضوع سبب می‌شود که آبشویی کربنات‌ها به اعماق خاک بیشتر شده و واکنش سطح خاک به مقدار بیشتری کاهش یابد. افزون بر این، کشت و زرع به دلیل تأثیر بر فعالیت کربن آلی خاک می‌تواند سبب افزایش pH خاک شود (۵). فعالیت زراعی با شخم زنی و زیر و رو کردن خاک موجب اکسایش سریع‌تر مواد آلی خاک و کاهش میزان آن می‌شود. همین امر مقدار اسیدهای آلی تولیدی در نتیجه تجزیه مواد آلی توسط ریزموجودات را کاهش داده که موجب می‌شود در کاربری زراعی pH خاک در مقایسه با کاربری جنگل بالاتر باشد. در نتیجه حاج عباسی و همکاران (۱۷) مشاهده کردند بر اثر تبدیل مراتع به اراضی زراعی pH خاک تحت تأثیر قرار نگرفت. همچنین مک‌دونالد و همکاران (۳۵) نیز مشاهده نمودند تفاوت در مقدار pH خاک بین سه کاربری شامل زمین بایر، زراعی و جنگل-زراعی معنی‌دار نبود. ظرفیت بافری نسبتاً بالای خاک‌های جنوب ایران که به میزان بالای کربنات کلسیم، بافت متوسط تا نسبتاً سنگین و رس‌های با ظرفیت بالا مربوط می‌شود از عوامل ممانعت از تغییرات بالای pH در نتیجه عواملی چون تغییر کاربری است.

تغییر در کاربری اراضی نیز سبب کاهش مقدار مواد آلی خاک در منطقه سروک گردید. میانگین مواد آلی خاک، در خاک‌های دست‌نخورده جنگل متراکم ۸/۱۹ درصد و در خاک‌های جنگل تخریب شده ۵/۰۵ درصد و در کاربری زراعت دیم ۲/۱۴ درصد خاک برآورد شد، که کاهش معنی‌داری در سطح ۱ درصد نشان داد (جدول ۱ و ۲). در اثر تغییر کاربری اراضی، مقدار مواد آلی در خاک‌های دست‌خورده کاهش چشم‌گیری نشان داد که این یافته با نتایج سیلک (۹) مطابقت داشت. شکسته شدن خاک‌دانه سبب می‌شود که مواد آلی که در داخل خاک‌دانه‌ها قرار دارند، بر روی سطح قرار گیرند و این مورد موجب افزایش اکسیداسیون توسط باکتری‌ها می‌شود. مقداری از

شرح زیر بر روی نمونه‌های آماده شده انجام شدند: قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره‌ی گل اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، pH توسط دستگاه پ‌هاش متر شیشه‌ای در گل اشباع، اندازه‌گیری کربن آلی به روش سوزاندن تر، که در آن مواد آلی خاک توسط بی‌کرومات پتاسیم در مجاورت اسید سولفوریک غلیظ اکسید شده و باقی‌مانده بی‌کرومات پتاسیم با فروآمونیم سولفات تیتیر شد (۱۹). پتاسیم قابل دسترس به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ نرمال با پ‌هاش ۷ اندازه‌گیری شد (۳۹). فسفر قابل جذب به روش رنگ‌سنجی آبی مولیبدات اندازه‌گیری و سپس با دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت انجام گردید (۳۳). اندازه‌گیری نیتروژن کل خاک به روش کج‌لدال (۷) انجام شد.

تنفس میکروبی پایه نیز با استفاده از ظروف سر بسته و به روش تیتراسیون برگشتی با سود باقی‌مانده اندازه‌گیری گردید. جهت اندازه‌گیری تنفس برانگیخته مقدار ۲ میلی‌لیتر از گلوکز ۱٪ به عنوان سوبسترا به نمونه‌های خاک در ظرف یک لیتری اضافه شده و داخل انکوباتور در دمای 30 ± 1 درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت نگهداری شده سپس طبق روشی که برای تنفس پایه‌ی خاک قید گردید عمل تیتراسیون انجام و مقدار تنفس برانگیخته محاسبه گردید (۴). شمارش جمعیت باکتری خاک به کمک محیط کشت Nutrient Agar و تهیه رقت‌های پی در پی بر پایه‌ی ده و شمارش به کمک دستگاه شمارنده پرگنه (colony counter) انجام شد (۶۰). شمارش جمعیت قارچ خاک نیز به کمک محیط کشت Potato Dextrose Agar و تهیه‌ی رقت‌های سریالی بر پایه‌ی ده و شمارش به کمک دستگاه شمارنده پرگنه (۶۰) صورت گرفت. برای اندازه‌گیری فعالیت دو آنزیم آلکالین و اسید فسفاتاز از روش ارائه شده توسط طباطبایی (۵۳)، که براساس رنگ‌سنجی پارانیتروفنل آزاد شده است، استفاده شد. این روش برای اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک ارائه شده است و شامل تخمین کالریمتریک (رنگ‌سنجی) پارانیتروفنل آزاد شده به وسیله‌ی فسفاتاز طی فرآیند انکوباسیون با محلول بافر pH=6.5 برای اسید فسفاتاز و pH=11 برای آلکالین فسفاتاز، سدیم پارانیتروفنیل فسفات و تولوئن است.

نتایج و بحث

تأثیر تغییر کاربری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

داده‌های به دست آمده از اندازه‌گیری هدایت الکتریکی در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم در منطقه سروک به ترتیب برابر ۰/۱۰۲، ۰/۰۵۲، ۰/۰۶۱ دسی زیمنس بر متر بود که به دنبال تغییر کاربری اراضی جنگلی، مقادیر هدایت الکتریکی خاک کاهش معنی‌داری در سطح یک درصد از خود نشان

اثر تغییر کاربری بر روی عناصر پرنیاز خاک

مقادیر میانگین فسفر قابل جذب در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم به ترتیب برابر ۱۵/۶، ۱۲/۷ و ۹ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بود که به رغم روند کاهشی، تفاوت معنی داری را نشان ندادند (جدول ۳ و ۴). با توجه به اینکه بخش مهمی از فسفر از منابع معدنی خاک تأمین می گردد و اینکه تغییر کاربری بیشتر بر بخش آلی خاک تأثیرگذار بوده است، انتظار می رود که تغییر کاربری چندان بر تغییر میزان فسفر قابل جذب خاک تأثیر نداشته باشد. گرچه برای نتیجه گیری قطعی نیاز به اندازه گیری مجزای بخش معدنی و آلی با روش عصاره گیری جزء به جزء می باشد. در این ارتباط در مطالعات مشابه نتایج متفاوتی گزارش شده است. لارسون و همکاران (۲۶) گزارش کردند که مواد آلی، فسفر قابل دسترس گیاهان را افزایش می دهد و به طور غیرمستقیم از رسوب فسفات به صورت فسفات آهن، آلومینیوم در واکنش های ۶ تا ۹ که به شکل غیرقابل جذب برای گیاه است، جلوگیری می کند. محققین دیگر اظهار داشتند که افزایش ماده آلی به خاک ممکن است توانایی خاک را در جذب فسفر کاهش دهد، زیرا اسیدهای آلی به وسیله ی تبادل لیگاندی جذب سطوح می شوند و برای محل های جذب با فسفر رقابت می کنند (۳۷). نیک نهاد و مارامایی (۳۸) در تحقیقی که در منطقه کچیک استان گلستان در راستای تغییر کاربری از جنگل به زراعت و قطع درختان انجام دادند، کاهش میزان فسفر قابل جذب خاک را ضمن تغییر کاربری اراضی از جنگل به کاربری زراعتی گزارش نمودند.

کربن نیز در اثر برداشت محصول، سوزاندن یا خارج کردن بقایای گیاهی از زمین هدر می رود (۱۱). تأثیر تبدیل جنگل به اراضی زراعی و مرتعی به ماده آلی خاک متفاوت و حتی گاهی متناقض است. در برخی از اکوسیستم ها افزایش ماده آلی (۱۰) و در برخی دیگر کاهش ماده آلی گزارش شده است (۵۷ و ۵۸). به عقیده ی تیسن و همکاران (۵۵) تغییر میزان ماده ی آلی خاک بعد از جنگل زدایی به طور قوی بستگی به نوع خاک دارد و تغییر کاربری اراضی نیاز به مدیریت کربن و حاصلخیزی خاک در یک چهارچوب وسیع تر دارد.

در اکثر مطالعات انجام شده در راستای تغییر کاربری از جنگل به زراعتی همگی حاکی از کاهش ماده ی آلی خاک در راستای تغییر کاربری و قطع درختان بودند که از بین آن ها می توان به مطالعات انجام گرفته توسط نیک نهاد و مارامایی (۳۸) اشاره نمود. آن ها در تحقیقی که در منطقه کچیک استان گلستان انجام دادند، کاهش میزان ماده آلی خاک را ضمن تغییر کاربری اراضی از جنگل به کاربری زراعتی ذکر نمودند. مطالعه ای دیگری توسط رضایی و همکاران (۴۵) انجام گرفت، آن ها با حفر ۱۸ خاکرخ در موقعیت های مختلف جغرافیایی (قله، شانه شیب و پای شیب) از مزارع چای و جنگل های طبیعی ویژگی های مورفولوژیکی خاک را مورد مطالعه قرار دادند. تجزیه و تحلیل نمونه های گرفته شده از هر افق نشان داد که پس از تغییر جنگل به چای مقدار ماده آلی خاک کاهش یافت.

جدول ۱- تجزیه واریانس برخی ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک سه کاربری

Table 1- The analysis of variance of physicochemical parameters of three land uses

منابع تغییر	میانگین مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	f	Sig.
Sources of variations	Mean squares	df	Mean squares		
مواد آلی (Organic matter)					
کاربری (Land use)	45.7	2	45.7		
خطا (Error)	0.57	12	0.57	79.2	0.000**
کل (Total)		14			
واکنش خاک (pH)					
کاربری (Land use)	0.155	2	0.155		
خطا (Error)	0.002	12	0.002	70.9	0.000**
کل (Total)		14			
هدایت الکتریکی (EC)					
کاربری (Land use)	0.003	2	0.003		
خطا (Error)	0.000	12	0.000	24.8	0.000**
کل (Total)		14			

جدول ۲- مقایسه میانگین برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک سه کاربری

Table 2- Comparison of the means of some physicochemical parameters in three land uses

	واکنش خاک pH	مواد آلی Organic matter (%)	هدایت الکتریکی EC (dSm ⁻¹)
جنگل متراکم (Dense forest)	7.90 ^c	8.19 ^a	0.102 ^a
جنگل تخریب شده (Degraded forest)	8.09 ^b	5.05 ^b	0.052 ^b
زراعت دیم (Dry farming)	8.25 ^a	2.14 ^c	0.061 ^b

منطقه سروک در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده، و زراعت دیم به ترتیب برابر $۶۵۱/۷$ ، $۳۳۰/۷$ و $۳۱۰/۲$ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود، که کاهش معنی‌داری در سطح یک درصد در کاربری جنگل تخریب شده و زراعت دیم در مقایسه با جنگل متراکم نشان داد (جدول ۳ و ۴). اسیدهای آلی تولید شده در پی تجزیه مواد آلی موجب تسریع در آزادسازی پتاسیم از کانی‌ها می‌شود. ضمن اینکه خود مواد آلی خاک حاوی مقداری عنصر پتاسیم می‌باشند. بر خلاف نتایج این پژوهش، لمنی و همکاران (۲۹) در تحقیقی در جنوب اتیوپی، افزایش ۳۶۵ درصدی درمقدار پتاسیم در دسترس در طی ده سال پس از قطع درختان جنگلی و تغییر کاری مشاهده کردند. کیانی و همکاران (۲۳) در پژوهشی در استان گلستان به این نتیجه رسیدند که مقدار پتاسیم با قطع درختان جنگلی و انجام عملیات کشاورزی و در نتیجه، افزایش شست‌وشوی این عنصر و انتقال به لایه‌های پایینی خاک، از $۲۵۵/۴$ به ۲۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش یافته است. با توجه به اینکه معمولاً بیشترین پتاسیم در سطح خاک است، هدررفت آن در اثر فرسایش (به علت تغییر کاربری) کاملاً تأیید می‌شود (۴۲). در تحقیق دیگری در کشور یونان مشاهده شد که تغییر کاربری در یک بازه ۴۰ تا ۵۰ سال موجب افزایش سدیوم و پتاسیم تبادلی در اراضی زیر کشت شده است (۲۵). تلن و یرما (۵۴) در پژوهشی در کشور کامرون حداکثر مقدار پتاسیم تبادلی به ترتیب در اراضی جنگلی حفاظت شده (۴ سانتی‌مول بر کیلوگرم)، اراضی زراعی (۲/۹۴ سانتی‌مول بر کیلوگرم) و ساوانا و چراگاه‌ها (۱/۰۵ سانتی‌مول بر کیلوگرم) مشاهده گردید. آنها مقادیر بالای پتاسیم در سطح خاک جنگل را به جذب پتاسیم توسط ریشه از عمق خاک نسبت دادند. همچنین استفاده از بقایای خانگی از جمله خاکستر چوب و همچنین سوزاندن کاه و کلش مزارع در کاربری زراعی دلیل بیشتر بودن مقدار پتاسیم تبادلی نسبت به ساوانا و چراگاه اعلام نمودند.

اثر تغییر کاربری بر روی ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنفس در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم در منطقه سروک برای تنفس پایه مقادیر ۱۵۶، ۱۰۵، $۳۶/۷$ و برای تنفس برانگیخته برابر ۲۵۹، ۱۱۰ و $۶۷/۲$ ($\text{mgCO}_2/\text{kg/day}$) بود، که کاهش معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان می‌دهد (جدول ۵ و ۶). هدررفت مواد آلی در اثر کشت و کار و مدیریت نامناسب خاک اغلب به عنوان عامل اصلی کاهش تنفس خاک در خاک‌های زراعی نسبت به خاک‌های بکر جنگلی گزارش شده است.

لمینه و همکاران (۲۹) نیز طی پژوهشی که در ارتفاعات جنوب اتیوپی انجام دادند، گزارش کردند که مقدار فسفر قابل جذب خاک در لایه‌ی سطحی آن، بیش از ۲۰۷ درصد طی ده سال نخست پس از قطع درختان جنگلی افزایش یافت. گرچه کیانی و همکاران (۳۳) در مطالعه‌ای در استان گلستان یافته‌هایی مبنی بر نبود تفاوت معنادار میان میزان فسفر قابل جذب در خاک اراضی جنگلی و کشاورزی گزارش کردند که با نتایج مشاهده‌های بکت و استروس نیچدر (۶) و نیز نتایج این پژوهش هم‌خوانی دارد. منگ و همکاران (۳۶) با بررسی اثر کاربری اراضی بر روی هدررفت میزان فسفر در اراضی لسی چین به این نتیجه رسیدند که کاربری کشاورزی دارای بیشترین هدررفت فسفر نسبت به سایر کاربری‌ها توسط فرسایش می‌باشد.

مقادیر میانگین نیتروژن کل در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم به ترتیب برابر با $۰/۴۰۹$ ، $۰/۲۵۲$ و $۰/۱۰۷$ میلی‌گرم بر کیلوگرم است که تفاوت معنی‌داری را در سطح یک درصد نشان می‌دهند (جدول ۳ و ۴). با توجه به اینکه منشأ اصلی نیتروژن خاک مواد آلی می‌باشد، طبیعی است که هر عاملی که بر کاهش و از بین رفتن مواد آلی خاک اثر داشته باشد بر کاهش نیتروژن خاک نیز مؤثر است. لمینه و ایثانا (۲۸) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند، آن‌ها در مطالعات خود به کاهش نیتروژن کل خاک در اراضی کشاورزی در مقایسه با اراضی جنگلی اشاره کردند. سرعت کاهش مواد آلی (مانند کربن و نیتروژن) در اولین سال‌های تغییر کاربری از جنگل و مرتع به کشاورزی در بیشترین حد خود قرار دارد، زیرا بخش فعال مواد آلی اولین منبعی است که در اثر دست‌کاری خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد و کربن و نیتروژن آلی خاک این بخش است که در سال‌های اولیه شخم و کشت و کار هدر می‌رود.

تغییر کاربری اراضی از جنگل به زراعی سبب کاهش نیتروژن خاک می‌شود. سولومون و همکاران (۵۲) دلیل این امر را کاهش ورود مواد آلی به خاک و همچنین، تأثیر عملیات خاک‌ورزی اعلام کردند. این پژوهشگران با بررسی خاک‌های مناطق مرتفع و نیمه مرطوب اتیوپی دریافتند که جنگل تراشی و ۲۵ سال کشت و زرع پیوسته، ۵۲ درصد از ازن کل خاک را از بین برده است. کیانی و همکاران (۳۳) نیز در استان گلستان مشاهده کردند که نیتروژن بر اثر تبدیل جنگل به اراضی کشاورزی، به طور تقریبی به مقدار یک‌سوم کاهش یافته است. این پژوهشگران بیان کردند که به نظر می‌رسد تجزیه ریشه و جذب توسط گیاهان، تأثیر بسزایی بر پراکنش نیتروژن کل در خاک دارد. لمنی و همکاران (۲۹) کاهش $۵۹/۲$ درصدی مقدار نیتروژن را ضمن تغییر کاربری از جنگل به اراضی زراعی اعلام کردند. مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری پتاسیم قابل دسترس خاک

جدول ۳- تجزیه واریانس عناصر پر مصرف در خاک سه کاربری

Table 3- The analysis of variance of macronutrients in three land uses

	منابع تغییر (Sources of variations)	مجموع مربعات (Sum of squares)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean squares)	f	Sig.
فسفر (Phosphorus)	کاربری (Land use)	95.7	2	55	1.788	0.209 ^{ns}
	خطا (Error)	242	12	30.7		
	کل (Total)	337	14			
پتاسیم قابل دسترس (Available potassium)	کاربری (Land use)	344053	2	172026	16.64	0.000**
	خطا (Error)	123997	12	10333		
	کل (Total)	468050	14			
نیتروژن کل (Total nitrogen)	کاربری (Land use)	0.229	2	0.114	79.21	0.000**
	خطا (Error)	0.017	12	0.001		
	کل (Total)	0.246	14			

جدول ۴- مقایسه میانگین عناصر پر مصرف در خاک سه کاربری (میلی گرم بر کیلوگرم)

Table 4- Comparison of the means of macronutrients of the soil of three land uses (mgkg⁻¹)

	نیتروژن (Nitrogen)	فسفر (Phosphorus)	پتاسیم قابل دسترس (Available potassium)
جنگل متراکم (Dense forest)	0.409 ^a	15.6 ^a	651.7 ^a
جنگل تخریب شده (Degraded forest)	0.252 ^b	12.7 ^a	330.7 ^b
زراعت دیم (Dry farming)	0.107 ^c	9.04 ^a	310.2 ^b

کاهش جمعیت قارچها می شود، ضمن آنکه شرایط اسیدی تر خاک جنگلی شرایط را برای گسترش بیشتر قارچها فراهم می نماید (۴۲). نتایج حاصل از اندازه گیری جمعیت باکتری در کاربری های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم در منطقه ی سروک به ترتیب برابر ۵/۲۰، ۴/۷۲ و ۵/۶۳ (CFU) بود که افزایش معنی داری را در کاربری زراعی نسبت به دو کاربری دیگر در سطح یک درصد نشان می دهد (جدول ۵ و ۶). در ارتباط با اثر تغییر کاربری از جنگل به کشاورزی بر جمعیت باکتری در منابع نتایج متفاوتی گزارش شده است. اسلام و ویل (۱۸) نیز گزارش کردند که تغییر کاربری جنگل های طبیعی مناطق حاره به زمین های کشاورزی موجب کاهش چشم گیر در کربن توده زنده میکروبی می شود. آن ها نتیجه گرفتند که کاهش کیفیت خاک بر اثر تبدیل این اراضی، موجب کاهش توده زنده میکروبی می گردد. میزان کربن و نیتروژن آلی خاک تأثیر زیادی بر میزان توده ی زنده ی میکروبی خاک دارد. رمضان پور و رسولی (۴۲) بیشترین جمعیت باکتری را در پوشش جنگلی خاک تشکیل یافته بر روی سنگ مادر آندزیت بازالتی و کمترین مقدار آن در باغ چای با سنگ مادر گرانیت در استان گیلان گزارش نمودند. جلالی و همکاران (۲۰) در مطالعه ای پیرامون اثر تغییر کاربری در منطقه جیرفت بر

تفاوت تنفس برانگیخته نسبت به تنفس پایه و بیشتر شدن تنفس با افزودن سوپسترا به خاک نشان می دهد که جمعیت میکروبی فعال برای تجزیه ی گلوکز در این خاک ها عامل محدود کننده بوده است و با افزودن گلوکز در این خاک ها جمعیت فعال افزایش یافته و باعث بیشتر شدن تنفس گردیده است. رئیس ی و اسدی (۴۱) گزارش کردند که تنفس خاک از شاخص های حساس کیفیت خاک به تغییر کاربری اراضی به شمار می آید و تعیین کننده میزان و سرعت خروج کربن از خاک است. تغییر کاربری اراضی و عملیات کشاورزی در اراضی بکر، باعث کاهش ورود بقایای گیاهی تازه به خاک و در نتیجه کاهش تنفس و فعالیت های میکروبی می گردد.

در اینجا نیز همان طور که انتظار می رفت نتایج مقایسه میانگین و تجزیه ی واریانس داده های به دست آمده از منطقه نشان داد که به دنبال تغییر کاربری کاهش معنی داری در سطح یک درصد در جمعیت قارچ کاربری زراعی مشاهده شد. به طوری که جمعیت قارچ در کاربری های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم در منطقه ی سروک به ترتیب برابر ۴/۲۲، ۳/۹۳ و ۳/۷۷ (CFU¹) بود. خاک ورزی و کشت و کار منجر به پاره شدن هیفهای قارچ و در نتیجه

با مقدار کربن آلی خاک همبستگی دارند. همبستگی قوی این آنزیم‌ها با کربن آلی خاک نشان‌دهنده آن است که آنزیم فسفاتاز دارای تمایل قوی برای برقراری پیوند با بخش آلی خاک می‌باشند. دلیل این همبستگی انکارناپذیر نقش کلیدی کربن آلی به عنوان پیش ماده برای سنتز آنزیم عنوان شده است (۵۹). متین‌زاده و همکاران (۳۴) با مطالعه در دو رویشگاه دست‌خورده و دست‌نخورده‌ی بلوط در چهارمحال و بختیاری نشان دادند که فعالیت آنزیم‌های اسید فسفاتاز و آلکالین فسفاتاز در منطقه‌ی دست‌نخورده به طور معنی‌داری از منطقه‌ی دست‌خورده بیشتر است. کاراواکا و همکاران (۸) اثرات کاربری اراضی را بر خصوصیات بیوشیمیایی مربوط به فعالیت میکروبی خاک که در برگ‌برنده چرخه عناصر می‌باشد بررسی و مشاهده نمودند که فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی پس از انجام عملیات مختلف کشاورزی به طور اساسی کاهش یافت و مقدار این آنزیم در خاک‌های کشت شده کمتر از خاک‌های کشت نشده بود. نتایج لی و همکاران (۳۰) بیان‌گر این نکته بود که فعالیت آنزیمی در کاربری‌های جنگلی و مرتعی نسبت به زمین‌های کشاورزی بیشتر بود. این محققان نشان دادند که شاخص آنزیمی خاک در کاربری‌های مختلف به‌صورت جنگلی < مرتعی < کشاورزی بود. گزارش‌های مشابهی مبنی بر افت فعالیت آنزیمی خاک به دنبال تغییر کاربری زیست بوم‌های پایدار جنگلی و مرتعی به کشاورزی ارائه گردیده است (۲۴).

ترکیب جمعیت باکتری خاک در کاربری‌های باغ میوه، مرتع و زراعی گزارش نمودند که ویژگی‌هایی چون بافت خاک، آهک، کربن آلی، ازت کل و هدایت الکتریکی بر ترکیب جمعیت باکتری خاک موثر بوده و اظهار نمودند که فعالیت‌های زراعی نه تنها موجب کاهش غنای گونه‌های باکتری نشده است، بلکه در مقایسه با مرتع و باغ نیز افزایش نشان می‌دهد. بیشتر بودن pH خاک کاربری زراعی در مقایسه با سایر کاربری‌ها شرایط را برای افزایش جمعیت باکتری‌ها فراهم می‌آورد.

میزان آنزیم اسید فسفاتاز در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تخریب شده و زراعت دیم در منطقه‌ی سروک به ترتیب برابر $\mu\text{g PNP /g/h}$ ۵۲۴، ۲۹۹، ۲۴۴ بود و کاهش معنی‌داری در سطح یک درصد نشان دادند و مقادیر آلکالین فسفاتاز نیز به ترتیب برابر $\mu\text{g PNP /g/h}$ ۴۵۷، ۲۳۷، ۲۴۳ بود و کاهش معنی‌داری را در سطح پنج درصد نشان دادند به‌طوری‌که فعالیت این دو آنزیم در جنگل متراکم بیشتر از جنگل تخریب شده و در جنگل تخریب شده بیشتر از زراعت دیم برآورد گردید (جدول ۵ و ۶). آنزیم‌ها به صورت طبیعی دارای قابلیت تحرک بسیار پایینی در خاک هستند. بنابراین، برای این‌که آنزیم‌ها بیشترین تأثیر را داشته باشند، سوبستراها باید نزدیک به نقطه منشأ آنزیم‌ها باشند. در این میان ماده آلی خاک یک حامل آلی برای آنزیم‌های خاک به شمار می‌رود (۲۴). فعالیت‌های آنزیمی عموماً

جدول ۵- تجزیه واریانس پارامترهای زیستی خاک سه کاربری مورد مطالعه

Table 5- The analysis of variance of biological parameters of three studied land uses

میانگین مربعات	f	sig	درجه آزادی	مجموع مربعات	منابع تغییرات
Mean squares			df	Sum of squares	Sources of variations
33844	0.000**		2	35938	کاربری
			12	59.6	خطا
			14	35997	کل
10136	0.000**		2	103634	کاربری
			12	61.3	خطا
			14	103696	کل
15.54	0.000**		2	2.15	کاربری
			12	1.18	خطا
			14	3.33	کل
58.33	0.000**		2	0.59	کاربری
			12	1.97	خطا
			14	2.57	کل
28.07	0.000**		2	21986	کاربری
			12	46988	خطا
			14	266848	کل
3.09	0.082*		2	156602	کاربری
			12	30331	خطا
			14	459912	کل

جدول ۶- مقایسه میانگین پارامترهای زیستی خاک در سه کاربری مطالعه شده

Table 6- Comparison of the means of biological parameters in three studied land uses

انزیم آلکالین فسفاتاز (Alkaline phosphatase enzyme) ($\mu\text{g PNP /g/h}$)	تنفس پایه (Basal respiration) ($\text{mgCO}_2/\text{kgs/day}$)	تنفس برانگیخته (Substrate-induced respiration) ($\text{mgCO}_2/\text{kgs/day}$)	جمعیت باکتری (Bacterial community) (CFU/gr)	جمعیت قارچ (Fungi community) (CFU/gr)	آنزیم اسید فسفاتاز (Acid phosphatase enzyme) ($\mu\text{g PNP /g/h}$)
جنگل متراکم (Dense forest)	156 ^a	259 ^a	5.20 ^b	4.22 ^a	524.2 ^a
جنگل تخریب شده (Degraded forest)	105 ^b	110 ^b	4.72 ^c	3.93 ^b	299.2 ^b
زراعت دیم (Dry farming)	36.7 ^c	67.2 ^c	5.63 ^a	3.77 ^c	244.4 ^b

بنابراین افزایش مواد آلی نه تنها از طریق افزایش فعالیت میکروبی، بلکه از طریق پایدارسازی آنزیم فسفاتاز در خاک باعث افزایش فعالیت این آنزیم می‌شود. افزایش فعالیت آنزیمی با افزایش مواد آلی به خاطر وابستگی فعالیت میکروبی و آنزیم تولید شده به عرضه‌ی سوسترای کربن می‌باشد. مواد آلی همچنین نقش مهمی در حفظ آنزیم‌ها از غیرمتحرک شدن توسط کانی‌های رسی یا ترکیبات هوموسی ایفا می‌کنند (۲۱).

مطالعاتی که به منظور بررسی اثرات کاربری‌های مختلف بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، در استان گیلان صورت گرفت، نشان داد که تغییر کاربری از جنگل به باغ، pH، کربن آلی، کلسیم + منیزیم تبادلی و پتاسیم تبادلی، ظرفیت تبادل کاتیونی، اکسید آهن بی شکل، تنفس میکروبی و جمعیت باکتری را کاهش داده است (۴۲). اندرسون و کرنی (۳)، بیان نمودند که تغییرات کاربری اراضی بر ساختار جمعیت و تنوع جامعه قارچ‌های خاک اثر می‌گذارد. احتمالاً نوع گونه گیاهی (در پوشش جنگلی)، علفی (در پوشش مرتع) و سایر گونه‌های گیاهی (در کشاورزی) و مخلوطی از پوشش‌های جنگلی و کشاورزی (جنگل - زراعی) نقش کلیدی را در تغییرات قارچ‌ها اعمال می‌کنند (۱۵). مقادیر بیشتر دی‌اکسیدکربن آزاد شده طی فرآیند تنفس، نشان‌دهنده‌ی فعالیت عمومی میکروب‌ها به‌ویژه فعالیت هتروتروف‌ها بوده و شاخصی برای تعیین بخش قابل معدنی شدن کربن آلی خاک محسوب می‌شود (۴۰). خرمالی و همکاران (۲۲) نیز نشان دادند که تنفس خاک در اراضی زراعی به طور معنی‌داری کمتر از جنگل‌های بکر بود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که هرگونه مدیریت و نوع کاربری که

باعث افزایش دست‌خوردگی خاک گردد، می‌تواند کاهش کیفیت خاک و افزایش حساسیت اراضی به تخریب را در پی داشته باشد. این تغییر کاربری‌ها باعث کاهش میزان مواد آلی خاک گردیده که به دلیل بازگشت کمتر ماده آلی به خاک از یک سو و افزایش سرعت تجزیه ماده آلی از سوی دیگر است. در این پژوهش که به صورت یک مطالعه موردی صورت گرفت نتایج حاکی از آن بود که تغییر کاربری در طی ۳ تا ۴ دهه گذشته به میزان زیادی شاخص‌های کیفی خاک را تحت تأثیر قرار داده است. کاهش میزان کربن آلی به عنوان اصلی‌ترین و مهمترین شاخص کیفی خاک به میزان ۷۴ درصد و به دنبال آن تحت تأثیر قرار گرفتن عمده شاخص‌های شیمیایی، تغذیه‌ای و زیستی از مضرات تغییر مدیریت نشده در بسیاری از جنگل‌های منطقه یاسوج می‌باشد. در این پژوهش شاخص‌های زیستی چون تنفس پایه، تنفس برانگیخته، جمعیت قارچ و آنزیم‌های اسید فسفاتاز و آلکالین فسفاتاز به ترتیب به میزان ۷۶، ۷۴، ۱۱، ۵۵ و ۴۷ درصد کاهش را در نتیجه تغییر کاربری از جنگل به زراعی نشان دادند. کاهش میزان پتاسیم قابل دسترس و نیتروژن کل نیز به ترتیب به میزان ۴۹ و ۷۵ درصد، از دیگر شاخص‌هایی است که تحت تأثیر این تغییر کاربری قرار گرفته‌است. شیب‌دار بودن اراضی، میانگین بالای بارش سالانه و توزیع نامناسب بارش‌ها، شرایط را برای فرسایش سریع خاک در پی تخریب جنگل‌ها و شخم خوردن خاک (به ویژه به موازات شیب) فراهم می‌آورد. با برهم خوردن تعادل خاک به عنوان یک اکوسیستم طبیعی، تعادل میان تولید و یا ورود و تجزیه مواد آلی به هم خورده و در نهایت موجب کاهش شدید شاخص‌های زیستی کیفیت خاک و در نهایت منجر به تخریب خاک می‌شود، ولی می‌توان با استفاده از روش‌هایی چون شخم حداقل و بی‌خاکورزی و رعایت اصول کشاورزی پایدار باعث شد تا روند تخریبی شاخص‌های

منابع

- 1- Acosta-Martínez V., Cruz L., Sotomayor- Ramírez D., and Pérez-Alegría L. 2007. Enzyme Activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology*, 35(1) : 35- 45.
- 2- Aliasgharzad N., Jafarzadeh A., Alipour L., and Tavassoli A. 2010. Assessing land use impacts on soil quality using biological indicators. *Proceedings of 16th AAS and 1st ISAT, Bangkok, Thailand*.
- 3- Anderson I.C., and Cairney J.W.G. 2004. Diversity and ecology of soil fungal communities: increased understanding through the application of molecular techniques. *Environment Microbiology Journal*, 6(8) : 769-779.
- 4- Anderson J.P.E. 1982. Soil respiration. Chemical and microbiological properties. p. 831-871. In: A. L. Page and R. H. Miller (Eds.). *Method of soil analysis. Part2.. The American Society of Agronomy Madison Wisconsin*.
- 5- Balesdent J., Chenu C., and Balabane M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil and Tillage Research*, 53: 215-230.
- 6- Bewket W., and Stroosnijder I. 2003. Effects of agro-ecological land use succession on soil properties in Chemoga Watershed, Blue Nil Basins, Ethiopia. *Geoderma*, 111(1-2): 85-98.
- 7- Bremner J.M., and Mulvaney C. S. 1982. Nitrogen-total, PP: 595-624, In: Page, A.L., R.H. Miller and D.R. Keeney. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Soil Science Society of America, Madiso, Wisconsin*.
- 8- Caravaca F., Masciandaro F., and Ceccanti B. 2002. Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research*, 68: 23–30.
- 9- Celic I. 2005. Land-use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil and Tillage Research*, 83: 270-277.
- 10- De Moraes J. F. L., Volkoff B., and Cerri C. C. 1996. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondonia, Brazil. *Geoderma*, 70(1): 63-81.
- 11- Dominy C. S. and Haynes R. J. 2002. Influence of agricultural land management on organic matter content, microbial activity and aggregate stability in the profiles of two Oxisols. *Biology and Fertility Soils*, 36: 298-305.
- 12- Dumanski J., and Pieri C. 2000. Land quality indicators: research plan. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 81(2) : 93-102.
- 13- Emadi M., and Emadi M. 2008. Effect of land use change on selected soil physical and chemical properties in North Highlands of Iran. *Journal of Applied Sciences*, 8(3): 496- 502.
- 14- Finkenbeina P., Kretschmer K., Kukab K., Klotza S., and Heilmeier H. 2013. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump. *Soil Biology and Biochemistry*, 56: 87-89.
- 15- Fracetto G. G. M., Azevedo L. C. B., Fracetto F. J. C., Andreote F.D., Lambais M.R., and Pfenning L.H. 2013. Impact of Amazon landuse on the community of soil fungi. *Sciatica Agricola*, 70(2): 59-67.
- 16- Fu B.J., Guo X.D., Chen L.D., Ma K.L. and Li J.R. 2001. Soil nutrient changes due to land use changes in Northern China: a case study in Zunhua Country Hebei Province. *Soil Use and Management*, 17: 294-296.
- 17- Hajabasi M. A., Jalalian A., and Karimzadeh H. R. 1997. Deforestation effects on soil physical and chemical properties Lordegan. Iran. *Plant and soil*, 190: 301-308. (In Persian with English abstract)
- 18- Islam K. R., and Will R. R. 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 79: 9-16.
- 19- Jackson M.L. 1975. *Soil Chemical Analysis: Advanced Course*. Department of Soils, College of Agriculture, University of Wisconsin, Madison, WI.
- 20- Jalali G., Lakzian A., Astaraei A., Haddad A., Azadvar M., and Esfandiarpour I. 2016. The impact of land use on bacterial community composition and physicochemical properties of soil. *Bioscience Biotechnology Research Asia*, 13(4): 2167-2176.
- 21- Khademi H., Mohammadi J., and Nael M. 2006. Comparison of selected soil quality indicators in different land use management systems in Boroojen, Chaharmahal Bakhtiari province, *The Scientific Journal of Agriculture*, 29: 111-124. (in Persian)
- 22- Khormali F., Ajami M., Ayoubi S., Srinivasarao C.H., and Wani S.P. 2009. Role of deforestation and hillslope position on soil quality attributes of loess-derived soils in Golestan province, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134 (3-4):178-189. (In Persian with English abstract)
- 23- Kiani, F., Jalalian, A., Pashayi, A., and Khademi, H. 2008. The role of forest destruction, extinction of pastures on soil quality indices in loessy lands of Golestan province. *Journal of Water and Soil Science and Technology of*

- Agriculture and Natural Resources, 47: 453-463. (In Persian with English abstract)
- 24- Kizilkaya R., and Dengiz O. 2010. Variation of land use and land cover effects on some soil physico-chemical characteristics and soil enzyme activity. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2): 15-24.
- 25- Kosmas Z.C., Gerontidis S., and Marathianou M. 2000. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece). *Catena*, 40: 51-68.
- 26- Larson, J. E., Worren D. F., and Langto N. K. 1959. Effect of Fe and Al and Humic acid on phosphorous fixation by organic soil. *Soil Science Society America Proceeding*, 123: 438-440.
- 27- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1627.
- 28- Lemenih M., and Itanna F. 2004. Soil carbon stock and turnovers in various vegetation types and arable lands along an elevation gradient in Southern Ethiopia. *Geoderma*, 123: 177-188.
- 29- Lemenih M., Karlton M., and Olsson M. 2005. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in small holders farming system in Ethiopia. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 105: 373-386.
- 30- Li Q., Liang J.H., He Y.Y., Hu, Q. J., and Yu S. 2014. Effect of land use on soil enzyme activities at karst area in Nanchuan, Chongqing, Southwest China. *Plant, Soil and Environment*, 60(1): 15-20.
- 31- Li Y.T., Rouland C., Benedetti M., Li F.B., Pando A., Lavelle P., and Dai J. 2009. Microbial biomass, enzyme and mineralization activity in relation to soil organic C, N and P turnover influenced by acid metal stress. *Soil Biology and Biochemistry Journal*, 41(5): 969-977.
- 32- Longley P.A., and Mesev V. 2000. On the measurement and generalization of urban form. *Environment and Planning A*, 32 : 473 – 488.
- 33- Marphy J., and Riley J.P. 1952. A modified sing, solution method for determination of phosphate uptake by rye. *Soil Science Society America Journal*, 48: 31-36.
- 34- Matinizadeh M., AliAhmadKorori S., Khoshnevis M., and Teimouri M. 2004. Identification of symbiotic mycorrhizal fungi with juniper (*Juniperus excelsa*) and their prevalence in Syrachal habitat. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 13 (4): 385-400.
- 35- McDonald I.R. Lifer I., Sassen R., Mitchell R., and Gui Nasso N. 2002. Transfer of Hyalvocarbons from Natural see to the water column and Atmosphere. *Geofluids*, 2: 95-107.
- 36- Meng Q., Fu B., Tang X. and Ren H. 2008. Effect of land use on phosphorus loss in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 139: 195-204.
- 37- Naghrajah S., Posner A. M., and Quirk J. P. 1970. Competitive adsorption of phosphates with polygalacturonate and other organic anions on kaolinite and oxide surfaces. *Nature, Netherlands*, 228(5266), 83.
- 38- Niknahad H., and Maramaei M. 2011. Effects of land use changes on soil properties (Case Study: the Kechik catchment). *Journal of Sustainable Soil Management*, 1: 81- 96. (In Persian)
- 39- Pratt P.F. 1965. Potassium. 1022-1030. In: Black, C.A. *Methods of Soil Analysis*, 215 part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 40- Raiesi F. 2007. The conversion of overgrazed pastures to almond orchards and alfalfa cropping systems may favor microbial indicators of soil quality in Central Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(4) : 309-318.
- 41- Raiesi F., and Asadi E. 2006. Soil microbial activity and litter turnover in native grazed and ungrazed rangelands in a semiarid ecosystem. *Biology and Fertility of Soils*, 43: 76-82.
- 42- Ramezanpur H., and Rasuli N. 2015. Study of the effects of land use and material on some soil characteristics. *Journal of Soil Science (Soil and Water Sciences)*, 21(2): 229-231. (In Persian with English abstract).
- 43- Reahi M. 2009. Effects of microbial activity and soil enzymes on some reference rangelands of Chaharmahal va Bakhtiari province. MSc thesis. Shahrekord University. 22(1):50-60. (In Persian)
- 44- Refahi H. 1997. *Water erosion and its control*, Tehran University Press.
- 45- Rezaei N., Roozitalab M., and Ramezanpour H. 2012. Effect of land use change on soil propertie and clay mineralogy of forest soils developed in the Caspian Sea region of Iran. *Journal of Agriculture and Science Technology*, 14: 1617-1624. (In Persian with English abstract).
- 46- Sakbaeva Z., Acosta-Martínez V., Moore- Kucera J., Hudnall W., and Nuridin K. 2012. Interactions of soil order and land use management on soil properties in the Kukart watershed, Kyrgyzstan. *Applied and Environmental Soil Science*. Article ID 130941, 11 pages.
- 47- Salardini A. A. 1995. *Soil Fertility*. University of Tehran Press, 428p (In Persian).
- 48- Salazara S., Sánchezb L.E., Alvareza J., Valverdea A., Galindoc P., Igualc J.M., Peixa A., and Santa-Regina I. 2011. Correlation among soil enzyme activities under different forest system management practices. *Ecological Engineering*, 37(8) :1123-1131.
- 49- Saraswathy, R., Suganya, S., and Singaram P. 2007. Environmental impact of nitrogen fertilization in tea eco-

- system. *Journal Environment Biology*, 28: 779-88.
- 50- Shaabanzadeh S., Jafarian Z., Shokri M., and Kavian A.S. 2012. Study of some physical and chemical properties of soil in the three adjacent cases. Case study (Kesar region). 12th Iranian Soil Science Congress, Tabriz, 12-14 September. (in Persian).
- 51- Six J., Elliot E.T., and Paustian K. 2000. Soil macroaggregate turn over and micro-aggregate formation for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14): 2099-2103.
- 52- Solomon D., Fritzscheb F., Lehmann J., Tekalign M., and Zech W. 2002. Soil organic matter dynamics in the subhumid agroecosystems of the Ethiopian Highlands. *Soil Science Society America Journal*, 66: 969-978.
- 53- Tabatabai, M. A. 1994. Soil enzymes, In: Weaver, R.W. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2. Soil Science Society of America, Monograph, Madison, Wisconsin*, 9: 775-833.
- 54- Tellen V.A., and Yerima B.P.K. 2018. Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environmental Systems Research*, 7 (3).
- 55- Tiessen H., Menezes R.S.C., Salcedo I.H., and Wick B. 2003. Tree effects, soil fertility and organic matter turnover in a silvo-pastoral system in semi-arid NE Brazil. *Plant Soil*, 252: 195-205.
- 56- Trasar-Cepeda C., Leiros M.C., and Gil-Sotres F. 2008. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(9): 2146-2155.
- 57- Trumbore S. E., Davidson E. A., De Camargo P.B., Nepestad D. C., and Martinelli L.A. 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 915-528.
- 58- Wang B., Xue S., Liu G.B., Zhang G.H., Li G., and Ren Z.P. 2012. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. *Catena*, 92: 186-195.
- 59- Wang Q., Xiao F., He T., and Wang S. 2013. Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics. *Annals of Forest Science*, 70: 579-587.
- 60- Wollum A. G. 1982. Cultural methods for soil microorganisms, In: Page A.L. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Am. Soc. Agron. Soil Science Society America, Madison, WI*. 781-801.



Effect of Land Use Change on some Physicochemical and Biological Properties of the Soils of Servak Plain, Yasouj Region

F. Mehmandoost¹ - H.R. Owliaie^{2*} - E. Adhami³ - R. Naghiha⁴

Received: 09-04-2018

Accepted: 17-06-2018

Introduction: Land use changes such as conversion of forest to cultivated lands, significantly affect soil properties and modify soil forming processes. Land use changes can drastically affect the soil environment, which in turn markedly affect soils and soil processes. Human activities that are not associated with proper planning have undesirable effects on natural resources such as soil, including land use change. The results of the investigations in different parts of the world show that changing the use of natural ecosystems to managed ecosystems has destructive effects on soil properties. Cutting off the forest trees and converting pastures into agricultural lands will destroy or disrupt natural ecosystems and reduce the current or future production capacity of the soil. One of the important issues in the world is the destructive effects of agriculture on soil quality. These destructive effects can include a wide range of soil changes including physical properties such as soil compaction, soil water depletion, soil structure destruction and soil texture change, chemical properties such as accumulation of some elements such as N, P, K, and soil salinity, and soil biological properties such as soil microbial population and soil fauna activity changes, soil organic matter reduction and also effect on useful soil enzymes. Land use change from forest to agriculture does not necessarily lead to soil degradation. Land use changes and forest destruction in Yasouj region has increased in last decades. In this study, we investigated the effects of land use change on some soil characteristics in Servak plain, Yasouj region.

Materials and Methods: Servak region is located in 4 km south of Yasouj city. Three main land uses of dense forest, degraded forest, and dry farming were chosen to study the role of land use change on some soil properties. The elevation of the region varies from 1833 to 1869 m above sea level. Five soil samples (0-20 cm) were taken from each land use. Samples from each land use were taken from almost similar elevation and slope to minimize the effect of topography. Soil samples were transferred to the laboratory, air dried and passed through a 2mm sieve. The chemical and biological analyses were carried out. The determination of soil organic carbon was carried out based on the Walkley-Black chromic acid wet oxidation method. Available K was extracted with 1N ammonium acetate at pH=7 and was determined by flame photometry. The Olsen method was used for the determination of available phosphorus. Total nitrogen was measured using the Kjeldahl method. Soil bacterial communities were counted using culture medium (Nutrient agar). The basal respiration rate was estimated by back-titration of the unreacted NaOH to determine CO₂ evolved over 10 h. The substrate-induced respiration was measured by adding 2 ml of 1% glucose to soil samples over 6 h. Soil suspensions were prepared by 10-fold serial dilutions with 1g soil. Counting the soil fungal community was done using a culture medium (Potato dextrose agar) and was prepared by 10-fold serial dilutions. The activity of alkaline and acid phosphate enzymes was measured based on a colorimetric method using p-nitrophenol.

Results and Discussion: The land use change from a dense forest to dry farming has modified many chemical and biological soil properties. The results of analysis of variance and comparison of the means of data obtained from this study showed that as a result of land use change from dense forest to dry farming, Organic matter, total nitrogen, exchangeable potassium, basal and substrate-induced respiration, fungal community, acid phosphatase and alkaline phosphatase enzymes contents were decreased. Also, soil bacterial communities were increased at 1% level in dry farming land use. The amounts of phosphorus did not show any significant difference. In general, it can be concluded that following the degradation of the forest and land use change, the soil organic matter and relevant properties, especially biological indices, are more affected compared to the other properties. Soil organic matter plays a key role in ensuring agroecosystem productivity and the long-term conservation of soil resources.

Conclusions: Large-scale conversion of indigenous forests to cultivated land, driven by long-term

1, 2 and 3- M.Sc. Student and Associate Professors of Soil Science, Yasouj University

(*- Corresponding Author Email: owliaie@gmail.com)

4- Assistant Professor, Department of Animal Science, Yasouj University

agricultural development in the Servak region, has greatly affected the physicochemical and biological properties of the soils. Generally, the conversion of the natural ecosystem to agroecosystems decreased organic carbon content and relevant indices such as basal and substrate-induced respiration, fungal community, acid phosphatase and alkaline phosphatase enzymes contents in the top-soils at depth of 0 to 20 cm. The decrease of organic carbon in cropped farms could be attributed to the enhanced oxidation of soil organic C caused by cultivation. The results of this study showed that any management and type of land use that decreases soil capabilities can reduce soil quality and increase the susceptibility to degradation. So, in order to maintain soil quality, appropriate management practices should be done.

Keywords: Forest soil, Fungi community, Soil elements, Soil enzymes



امکان‌سنجی استفاده از AgMERRA برای پر کردن خلأ داده‌های بارندگی و دما در ایستگاه‌های سینوپتیک افغانستان

احمد رضا رضوی^{۱*} - مهدی نصیری محلاتی^۲ - علیرضا کوچکی^۳ - علیرضا بهشتی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهمترین چالش‌های فراروی بشر در قرن جاری است که به نظر می‌رسد اثرات آن در افغانستان به خصوص در بخش کشاورزی بسیار شدید باشد. مطالعه این اثرات بیش از هر چیز مستلزم دسترسی به داده‌های هواشناسی دقیق و کافی به خصوص برای متغیرهای دما و بارش است، اما به دلایل مختلف این داده‌ها در افغانستان از دقت و کفایت لازم برخوردار نیستند. در این پژوهش امکان استفاده از پایگاه داده AgMERRA از طریق مقایسه داده‌های آن با داده‌های ثبت شده‌ی چهار ایستگاه سینوپتیک مهم در افغانستان با استفاده از پنج شاخص نکویی برازش (RMSE، NRMSE، R^2 ، d، MBE، الگوی تغییرات فصلی و نیز تابع توزیع احتمال آنها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه بیانگر قدرت و کارایی لازم داده‌های AgMERRA برای پر کردن خلأها و قابلیت مطلوب آن در تولید سری داده‌های هواشناسی بود. نتایج حاصل از طریق شاخص NRMSE بیانگر قرار گرفتن مقادیر شبیه‌سازی شده در رده عالی و خوب در تمامی ایستگاه‌ها و مقیاس‌های زمانی بود. مقدار شاخص R^2 برای شبیه‌سازی درجه حرارت در فواصل زمانی روزانه، ۱۴ روزه و ماهانه بیش از ۰/۸۶ بود. بارش در مقیاس زمانی روزانه دارای R^2 نامناسب بود، اما با افزایش مقیاس زمانی به ۱۴ روزه و ماهانه مقدار R^2 آن در حد قابل قبولی افزایش یافت. مقادیر ضریب توافقی d نیز برای بارش‌های ۱۴ روزه و ماهانه مناسب بود (حداقل ۰/۸۷). داده‌های شبیه‌سازی شده‌ی AgMERRA در مقیاس ماهانه تبعیت خوبی از الگوی فصلی داده‌های ایستگاهی نشان داد. با این وجود مقادیری از تخمین‌های کمتر و بیشتر از حد واقعی به خصوص در ایستگاه کابل مشاهده شد. این تبعیت از الگو در مقیاس روزانه نیز برای متغیرهای هواشناسی مورد مطالعه در حد قابل قبول بود، اگرچه AgMERRA توانست برخی از نوسانات موجود در توزیع احتمال داده‌های دمای حداکثر و حداقل (با بازه یک درجه سانتی گراد) را به خوبی شبیه‌سازی نماید.

واژه‌های کلیدی: آگمرا، تغییر اقلیم، داده‌های ناقص، کابل، هواشناسی

مقدمه

هر چه بیشتر محتمل ساخته‌اند (۲۳ و ۲۵). گرمایش جهانی با تأثیر بر چرخه‌های هیدرولوژیکی کره زمین، الگوهای بارش را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد (۴) و این تغییرات در مناطق خشک و نیمه خشک جهان بارزتر خواهد بود. به نظر می‌رسد که به علت طبیعت خشک و نیمه خشک افغانستان و فقر شدیدی که بخش زیادی از مردم این کشور در آن به سر می‌برند، اثرات تغییر اقلیم به صورت قابل ملاحظه‌ای شدیدتر باشد، اما تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی این کشور صورت نگرفته است (۳۳). بر اساس برآوردهای صورت گرفته توسط برنامه محیطی سازمان ملل و سازمان ملی حفاظت محیط زیست افغانستان (NEPA^۶)، بخش کشاورزی در کنار بخش‌هایی نظیر آب و تنوع

برنامه محیطی سازمان ملل متحد (UNEP^۵)، تغییر اقلیم را یکی از مهمترین چالش‌های فراروی بشر در قرن ۲۱ دانسته است. افزایش غلظت گاز کربنیک و اثبات نظریه اثر گلخانه‌ای که بر اساس آن نوع و ترکیب گازهای موجود در آتمسفر به شدت بر دمای کره زمین تأثیر می‌گذارند حقایقی انکارناپذیر هستند که وقوع تغییرات آینده اقلیمی را

۱، ۲ و ۳- به ترتیب فارغ‌التحصیل دوره دکتری و استادان گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: arazavi2005@gmail.com)

۴- دانشیار بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.68501

زیستی، مهمترین بخش‌های آسیب‌پذیر به تغییرات اقلیمی در آینده می‌باشد. بر همین اساس دو اولویت مهم پژوهشی افغانستان در زمینه علوم محیطی، «تحقیقات کشاورزی» و نیز «تحقیقات مرتبط با اقلیم و سیستم‌های هشداردهی» (از جمله ظرفیت‌سازی و پرورش متخصص جهت ارزیابی راه‌های سازگاری با تغییر اقلیم شامل ظرفیت‌های فنی برای رصد و تجزیه و تحلیل روندهای اقلیمی، برنامه‌ریزی و اجرای فعالیت‌های مرتبط با سازگاری، ارتقای ظرفیت پیش‌بینی و اطلاع‌رسانی به سیاست‌گذاران) می‌باشد (۳۳).

مطالعات تغییر اقلیم در ابعاد مختلف زیست‌محیطی از جمله بررسی اثرات آن در بخش کشاورزی، مانند تغییرات احتمالی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی یا کاربرد مدل‌های رشد گیاهان زراعی برای پیش‌بینی وضعیت تولید آینده، به شدت وابسته به وجود داده‌های هواشناسی می‌باشد. بر اساس استاندارد سازمان هواشناسی جهانی، حداقل ۳۰ سال داده‌های هواشناسی برای مطالعات اقلیمی لازم است (۳). تقریباً تمامی شاخص‌های اقلیمی کشاورزی بر اساس دما و بارش محاسبه می‌شوند و تغییرات اقلیمی آینده با تأثیر بر این شاخص‌ها شرایط رشد و نمو گیاهان زراعی را تحت تأثیر قرار خواهند داد (۱۵). مدل‌های زیست محیطی و کشاورزی هر دو نیازمند سری کامل داده‌های هواشناسی به عنوان ورودی هستند (۳۲). ثبات و شفافیت در اطلاعات آب و هوایی و روش‌های استخراج آن‌ها، باعث تسهیل در مقایسه مناطق و مدل‌های مختلف می‌شود، بخصوص زمانی که ارزیابی اثرات تغییر اقلیم مورد تأکید است (۲۶ و ۲۷). بنابراین وجود دوره مشخصی از داده‌های هواشناسی یکی از مسائل مقدماتی و ضروری است، زیرا این داده‌ها برای واسنجی مدل‌ها و همچنین به عنوان مبنایی برای توسعه سناریوهای اقلیمی آینده با استفاده از روش‌های مختلف آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۷).

پوشش داده‌های هواشناسی و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک در افغانستان به دلایل مختلف، بسیار ضعیف می‌باشد. البته به علت هزینه‌بر بودن و گاهی سخت بودن دسترسی، این دو مشکل در مناطق دیگری از دنیا نیز به وفور مشاهده می‌شود (۷). بنابراین توسعه روش‌هایی برای ایجاد داده‌های هواشناسی قابل اطمینان در مقیاس‌های مناسب زمانی و مکانی به خصوص در مناطقی که مطالعات مختلف اقلیمی-کشاورزی متکی بر وجود داده‌های هواشناسی است، یکی از مسائل حیاتی و مهم است. در همین راستا مطالعات مختلفی برای بازسازی و پر نمودن خلأ میان این داده‌ها با استفاده از روش‌های متعددی نظیر روش‌های درون و بین ایستگاهی، روش‌های آماری و همچنین سنجش از دور صورت گرفته است (۱) که اساس عمده آنها روش‌های مختلف درون‌یابی^۱ با عدم

قطعیت‌های^۲ فراوان و متنوع است (۸) و به همین دلیل وجود شرایط مختلف مستلزم کاربرد روش‌های مختلف درون‌یابی است (۲۲). در این راستا گروه‌های مطالعاتی متعددی اقدام به جمع‌آوری داده‌های هواشناسی و تولید مجموعه داده‌های^۳ منظم جهانی در مقیاس ماهانه نموده‌اند (۱۰، ۲۳، ۲۹ و ۴۰) که البته استفاده از آنها در بسیاری از موارد نیازمند مولدهای هواشناسی^۴ برای تولید داده‌های روزانه بوده و در نتیجه منجر به از دست رفتن برخی از وقایعی می‌شوند که در اعتبارسنجی و واسنجی مدل‌ها نقش مهمی دارند. بر این اساس مطالعات انجام شده در دهه‌های اخیر، باعث توسعه پایگاه داده‌های هواشناسی شبکه بندی شده‌ای گردیدند که در سه دسته کلی قرار می‌گیرد: مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده^۵ (مانند APHRODIT^۶) (۴۱ و ۴۲)، مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای (مانند PERSIANN^۷ و TRMM^۸) (۱۱ و ۱۲) و ترکیبی از داده‌های اندازه‌گیری- تصاویر ماهواره‌ای (مانند AgMERRA^۹) (۲۷). AgMERRA و AgCFSR^{۱۰} دو مجموعه داده‌ی توسعه یافته توسط دانشگاه کلمبیا و نیز انستیتوی مطالعات فضایی گوآرد و وابسته به سازمان ملی هوا-فضای آمریکا^{۱۱} هستند که به منظور برآورده کردن نیازهای پروژه AgMIP^{۱۲} به داده‌های هواشناسی و نیز با هدف ایجاد شبکه همگون و جهانی برای استفاده در پژوهش‌های کشاورزی، امنیت غذایی و مدل‌های رشد گیاهی ایجاد گردیدند و از لحاظ تفکیک‌پذیری مکانی، بهبود فیزیک مدل و نیز منابع بیشتر داده‌های گردآوری شده، پتانسیل خوبی برای ارزیابی‌های اگروکلیماتیک دارند. AgMERRA حاصل بازکاوی داده‌های ماهواره‌های MERRA، PERSIANN و CMORPH و نیز داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک ۲۳۲۴ ناحیه مهم کشاورزی دنیا می‌باشد (۲۷). تاکنون مطالعات متعددی با استفاده از مجموعه داده‌های شبکه‌بندی هواشناسی (۶ و ۷) و به خصوص AgMERRA در ایران (۱۶، ۱۷ و

2- Uncertainty

3- Dataset

4- Weather Generator

5- Gauge-based

6- Asian Precipitation- Highly-Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation

7- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks

8- Tropical Rainfall Measuring Mission

9- Agricultural Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

10- Agricultural Climate Forecast System Reanalysis

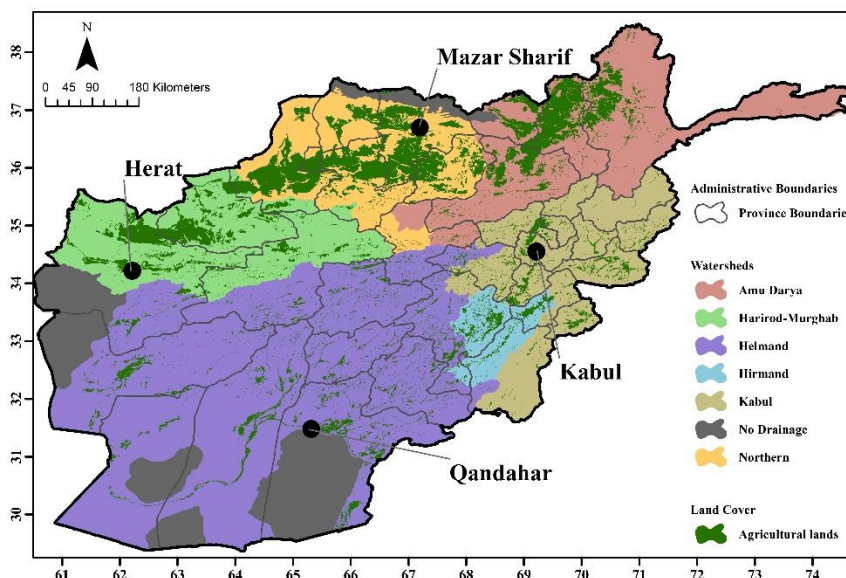
11- NASA Goddard Institute for Space Studies

12- Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project

1- Interpolation

در داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های سینوپتیک و تولید مجموعه داده‌های یکنواخت و قابل اعتماد برای چهار ایستگاه مهم هواشناسی افغانستان به منظور استفاده در مطالعات اگروکلیماتیک و نیز بررسی‌های مرتبط با تغییر اقلیم است.

۴۳) و جهان (۹، ۳۱ و ۳۶) صورت پذیرفته که در مجموع کارایی آن به منظور استفاده در مدل‌های رشد و نیز مطالعات اگروکلیماتیک مثبت ارزیابی شده است. هدف از پژوهش حاضر نیز بررسی اعتبار و دقت مجموعه داده‌های AgMERRA برای پر کردن خلأهای موجود



شکل ۱- نقشه حوزه‌های آبخیز، اراضی کشاورزی و موقعیت جغرافیایی چهار ایستگاه مورد مطالعه در افغانستان
Figure 1- Watersheds, Agricultural Land and Geographical position of four studied stations of Afghanistan

جدول ۱- خصوصیات جغرافیایی چهار ایستگاه مورد مطالعه

Table 1- Geographical characteristics of four studied *in-situ* stations

Station ایستگاه	Elevation (m) ارتفاع	Lat. (°E) عرض جغرافیایی	Long. (°N) طول جغرافیایی
Kabul کابل	1791	34.33	69.13
Herat هرات	977	34.13	62.13
Mazar Sharif مزار	3910	36.42	67.12
Qandahar قندهار	1010	31.3	65.51

Data retrieved from Afghan Meteorological Authority

میلادی شامل دمای حداکثر روزانه (T_{max})، دمای حداقل روزانه (T_{min}) و بارش روزانه (PRCP) از طریق گزارش‌های سالانه سازمان هواشناسی افغانستان^۱ و در برخی موارد از دیگر نهادهای مرتبط که اقدام به ثبت داده‌های هواشناسی می‌کنند جمع‌آوری گردید.

استخراج داده‌های AgMERRA

داده‌های AgMERRA با فرمت ذخیره‌ای nc4 از طریق پایگاه

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه روی چهار ایستگاه مهم کابل، قندهار، مزار و هرات واقع در شرق، جنوب، شمال و غرب افغانستان انجام شد (شکل ۱ و جدول ۱). انتخاب این چهار ایستگاه بر مبنای توزیع جغرافیایی، پوشش مناسب داده‌ها در دوره مطالعه، قدمت ایستگاه‌ها و نیز اهمیت شهرهایی که این ایستگاه‌ها در آن واقع شده‌اند صورت گرفت. داده‌های هواشناسی این ایستگاه‌ها در دوره زمانی ۱۹۸۰-۲۰۱۰

1- Afghan Meteorological Authority

(معادله ۱). این شاخص خطای شبیه‌سازی را بوسیله وزن‌دهی به خطاهای بیش از حد بزرگ مورد محاسبه قرار می‌دهد (۳۵). مقادیر کمتر RMSE بیانگر قدرت شبیه‌سازی بهتر مدل است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Ag_i - St_i)^2}{N}} \quad (۱)$$

شکل بدون واحد RMSE تحت عنوان جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده (NRMSE یا %RMSE) تلقی می‌شود و برای مقایسه داده‌هایی با واحدهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه NRMSE دو رهیافت مجزا وجود دارد: استانداردسازی RMSE توسط دامنه داده‌های مشاهده شده^۸ (معادله ۲) و یا توسط

میانگین آنها (معادله ۳):

$$NRMSE = \frac{RMSE}{St_{max} - St_{min}} \quad (۲)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{St}} \quad (۳)$$

در شرایطی که داده‌ها دارای مقادیر پرت زیادی بوده و یا به علت ماهیت داده‌ها نتوان برای محاسبه NRMSE از میانگین آن استفاده کرد، از دامنه داده‌های مشاهده شده بهره گرفته می‌شود (۱۴، ۲۱ و ۳۰). در این مطالعه به دلیل ماهیت داده‌های دمای حداقل و نیز بارش، NRMSE از طریق معادله ۲ محاسبه گردید. چنانچه مقدار %RMSE کمتر از ۱۰ باشد شبیه‌سازی عالی، بین ۱۰ تا ۲۰ خوب، بین ۲۰ تا ۳۰ متوسط و بیشتر از ۳۰ ضعیف خواهد بود (۳۴).

میانگین خطای اریبی (MBE) نیز عبارت از میانگین تفاضل مقادیر مشاهده شده ایستگاهی از مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی مدل (معادله ۴):

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (St_i - Ag_i)}{N} \quad (۴)$$

به منظور غلبه بر حساسیت بیش از حد شاخص‌های مبتنی بر ضریب همبستگی به تفاوت میانگین و واریانس مقادیر واقعی با شبیه‌سازی شده، شاخص توافق d مورد پیشنهاد قرار گرفته است (۳۸). شاخص توافق d نیز یکی از شاخص‌های استاندارد شده برای محاسبه خطای شبیه‌سازی مدل است که مقدار آن بین صفر و یک می‌باشد (معادله ۵). مقدار یک بیانگر حداکثر توافق و صفر نشان دهنده عدم وجود توافق است. این شاخص نیز به دلیل استفاده از مربع اختلافات به شدت به مقادیر حدی حساس است (۲۰).

$$d = 1 - \frac{\sum (St_i - Ag_i)^2}{\sum (|Ag_i - \bar{St}| + |St_i - \bar{St}|)^2} \quad (۵)$$

در معادلات فوق N ، Ag و St به ترتیب تعداد داده‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده توسط AgMERRA و مقادیر مشاهده شده ایستگاهی و نیز St_{max} ، St_{min} و $\bar{St}$ به ترتیب بیشینه، کمینه و میانگین داده‌های مشاهده شده ایستگاهی می‌باشند.

اینترنتی سازمان هوا-فضای آمریکا^۱ گردآوری شده و از طریق نرم افزار آماری R به شکل قابل استفاده استخراج گردید. همچنین در برخی موارد از نرم‌افزار Panoply ver. 4.8.4 ارائه شده توسط تولیدکننده این مجموعه داده استفاده گردید. AgMERRA شامل داده‌های دمای حداکثر و حداقل (با قدرت تفکیک مکانی $0.5^\circ \times 0.5^\circ$)، بارندگی، سرعت باد و رطوبت نسبی (با قدرت تفکیک مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) و نیز تشعشع (با قدرت تفکیک مکانی $1.0^\circ \times 1.0^\circ$) می‌باشد. قدرت تفکیک زمانی تمامی این داده‌ها در دوره ۱۹۸۰-۲۰۱۰ میلادی به صورت روزانه است.

اعتبارسنجی داده‌های AgMERRA

تناسب یک مدل با مقادیر مشاهده شده (که از آن با عنوان ارزیابی یا اعتبارسنجی مدل یاد می‌شود)، اغلب به وسیله مقایسه‌های دوگانه بین مقادیر شبیه‌سازی شده (یا پیش‌بینی شده مدل) با مقادیر مشاهده شده صورت می‌گیرد (۱۸). ملاک‌ها و شاخص‌های مختلفی برای کارایی مدل‌ها و اعتبارسنجی آنها وجود دارد (۳۰) که به صورت کلی تحت نام شاخص‌های نکویی^۲ برازش تلقی می‌گردد. بخشی از این شاخص‌ها مبتنی بر ضریب همبستگی پیرسون (R) یا مربع آن (R^2) است. این دو شاخص اگرچه از محدودیت‌هایی در زمینه بیان عملکرد مدل برخوردارند، درجه همبستگی میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهند (۱۸). از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به حساسیت بیش از اندازه به مقادیر حدی (داده‌های پرت) و حساس نبودن به تفاوت‌های افزایشی و تناسبی^۳ (اریب بودن داده‌ها) اشاره کرد، به همین جهت نسبت به کارایی مدل نگاهی نامتعادل و جهت‌دار فراهم می‌سازند (۱۳، ۱۹، ۳۸ و ۳۹). از این رو شاخص‌های دیگری نیز برای بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه نیز برای تعیین اعتبار داده‌های AgMERRA در مقابل داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک، علاوه بر ضریب تبیین (R^2) از چهار شاخص دیگر شامل جذر میانگین مربعات خطا^۴ (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای استاندارد شده^۵ (NRMSE)، میانگین خطای اریبی^۶ (MBE) و شاخص توافق^۷ (d) استفاده شده است.

RMSE به صورت گسترده‌ای به منظور محاسبه تفاوت میان داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده مورد استفاده قرار می‌گیرد

1- www.data.giss.nasa.gov قابل دسترسی آنلاین در آدرس: 1-

2- Goodness of Fit

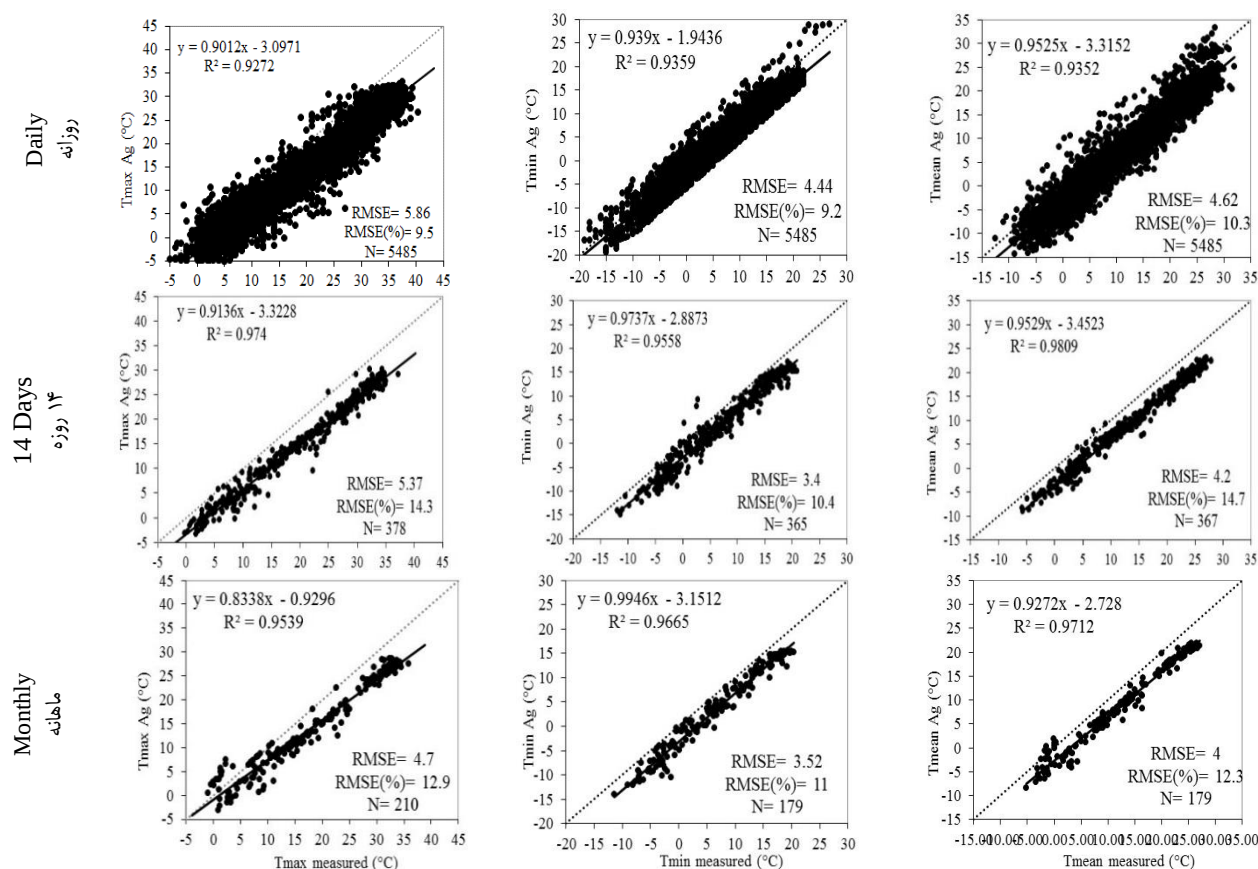
3- Additive and proportional

4- Root mean square error

5- Normalized Root mean square error

6- Mean Bias Error

7- d Index of Agreement



شکل ۲- مقایسه دماهای حداقل (Tmin)، حداکثر (Tmax) و میانگین (Tmean) میان AgMERRA و ایستگاه کابل در مقیاس‌های مختلف زمانی
Figure 2- Comparison of AgMERRA and in-situ Tmin, Tmax and Tmean in Kabul Station with three different temporal scales

مجموعه داده‌های ERA-Interim/Land، ERA-Interim و JRA-55 داشته است (۵).

بهترین تطابق بین داده‌های AgMERRA و داده‌های ایستگاهی در مورد پارامترهای دمای حداقل، حداکثر و میانگین، در ایستگاه مزار شریف مشاهده شد (شکل ۳) که مقادیر MBE و d نیز مؤید این مطلب است (جدول ۲). از نظر شاخص NRMSE نیز تمامی مقیاس‌های زمانی در ایستگاه‌های مزار و هرات در رتبه عالی (کمتر از ۱۰٪) و در ایستگاه‌های کابل و قندهار در رتبه‌های عالی و خوب (کمتر از ۲۰٪) رده بندی شدند (شکل‌های ۲ تا ۴). مطالعات دیگری نیز مؤید قدرت بالای AgMERRA برای تخمین داده‌های دمای حداقل و حداکثر روزانه بر اساس شاخص‌های مختلف نکویی برازش نظیر R^2 ، RMSE، MAE^۱ و MBE بوده است (۱۷). کمترین ضریب تبیین در میان دماهای حداقل، حداقل و میانگین مربوط به دمای حداقل در مقیاس زمانی روزانه مربوط به ایستگاه قندهار

لازم به ذکر است که مقایسه‌ی بین داده‌های ایستگاهی و شبیه‌سازی شده در ۴ ایستگاه مورد مطالعه در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۱۴ روزه و ماهانه انجام گرفت.

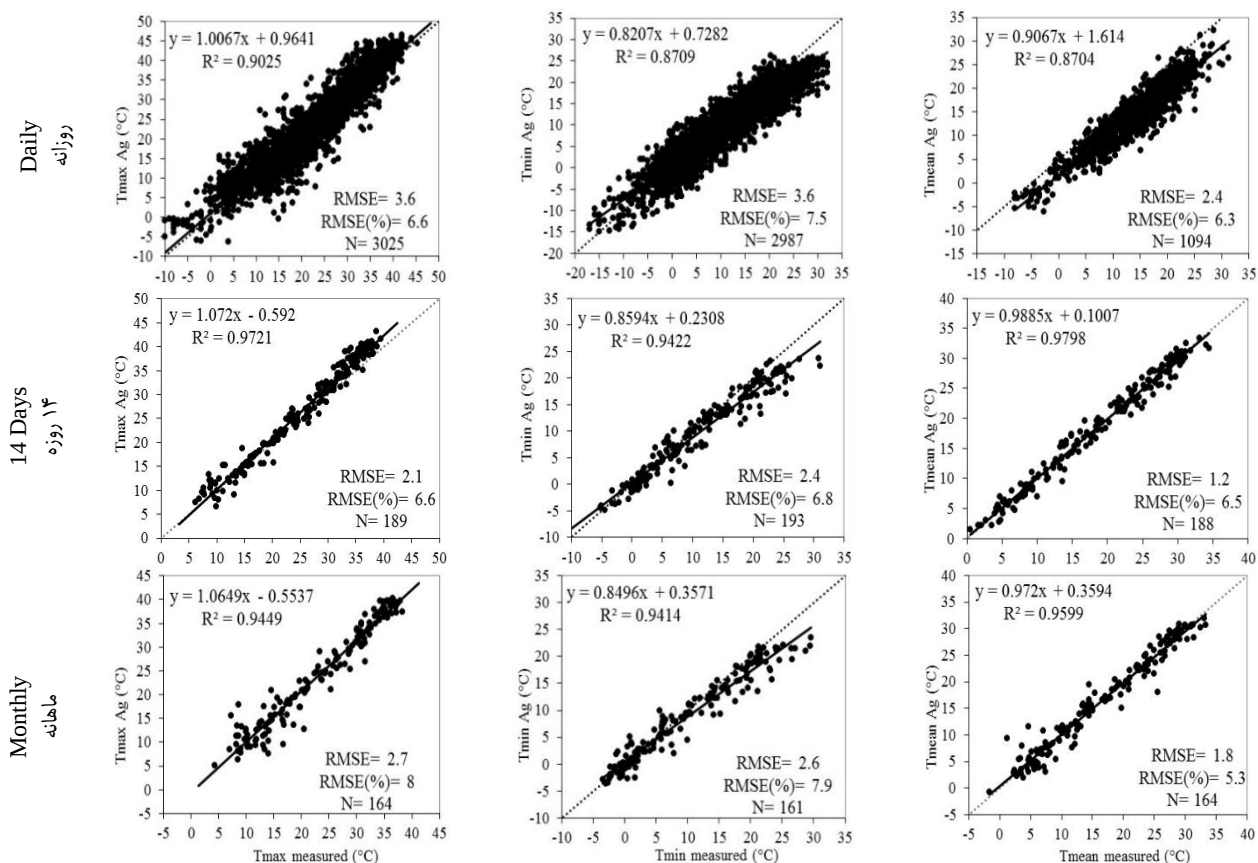
نتایج و بحث

به طور کلی نتایج اعتبارسنجی AgMERRA در مقابل داده‌های چهار ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه، بیانگر اعتبار و قدرت بالای آن در شبیه‌سازی دمای حداقل، حداکثر و بارش به خصوص در مقیاس‌های زمانی ۱۴ روزه و ماهانه بود. مطالعه دیگری نیز که به ارزیابی کارایی مجموعه داده‌های AgMERRA برای پر کردن خلأ داده‌های تاریخی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک مناطق اقلیمی مختلف ایران پرداخته بود، کارایی AgMERRA در این زمینه را رضایت بخش گزارش کرد (۲). همچنین گزارش شده است که مجموعه داده‌های AgMERRA بهترین کارایی را در انعکاس متغیر بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های سینوپتیک در مقایسه با

1- Mean Absolute error

مورد مطالعه با افزایش مقیاس از روزانه به ۱۴ روزه و ماهانه، افزایش یافت (به ترتیب ۰/۹۱، ۰/۹ و ۰/۸۷). یکی از دلایل ضعف احتمالی AgMERRA در برآورد متغیرهای دما در ایستگاه کابل، موقعیت جغرافیایی این شهر می باشد. وجود توپوگرافی پیچیده، قرار گرفتن ایستگاه هواشناسی در موقعیت نامناسب و تفاوت در پوشش سطحی را می توان از جمله دلایل احتمالی دانست که باعث ایجاد خطا در شبیه سازی های AgMERRA در این ایستگاه گردیده است. در این شرایط، احتمالاً ماهیت شبکه بندی شده ی داده های AgMERRA که مقدار متوسط یک شبکه ی $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ را برای پارامترهای هواشناسی منعکس می کند، باعث ایجاد خطای شبیه سازی نسبت به داده های دیده بانی ایستگاهی که ماهیت نقطه ای دارد شده است. تفاوت در الگوهای سینوپتیکی غالب منطقه، تأثیرپذیری از بارش های سنگین یا سهم بیشتر بارش های همرفتی نیز از دیگر علل بروز خطای شبیه سازی در داده های شبکه بندی شده نسبت به داده های ایستگاهی است.

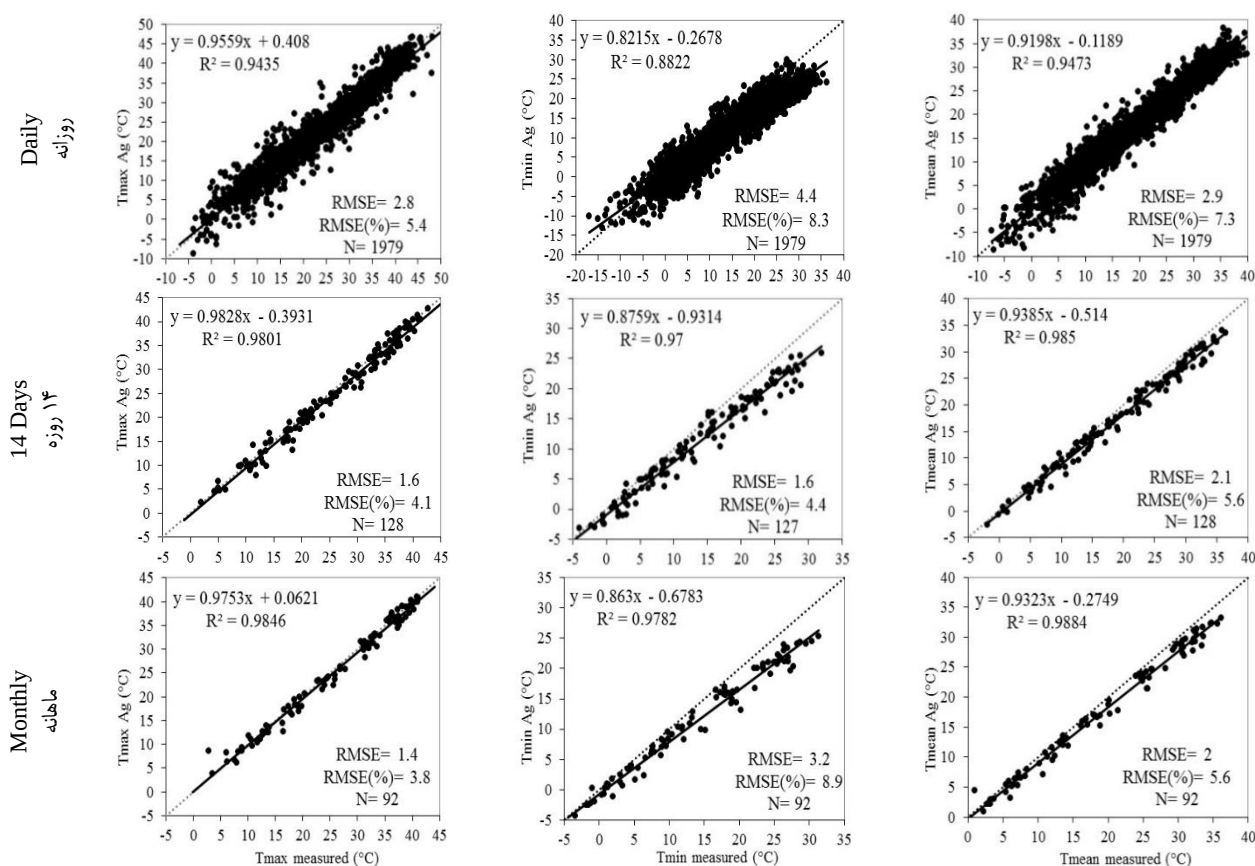
($R^2=0.8$) با اقلیم گرم و نیمه خشک بود (شکل ۴) و بیشترین آن در مورد دمای حداکثر در ایستگاه مزار ($R^2=0.947$) به مشاهده رسید. کمتر بودن ضرایب تبیین دمای حداقل نسبت به دمای حداکثر در مطالعات دیگری نیز مشاهده شده است (۴۳). در مورد این سه متغیر هواشناسی تمامی ضرایب تبیین مربوط به ایستگاه های چهارگانه مورد مطالعه در مقیاس های زمانی ۱۴ روزه و ماهانه بیش از ۰/۹۳ بود که نشان دهنده تطابق بالای AgMERRA با داده های ایستگاهی در این مقیاس ها می باشد (به استثنای دمای حداکثر ماهانه در ایستگاه قندهار که ضریب تبیین آن به علت وجود داده پرت تا ۰/۸۸ کاهش پیدا کرده است). در میان سه متغیر دما، بیشترین مقدار متوسط زمانی- مکانی شاخص MBE مربوط به دماهای روزانه و کمترین آن مربوط به دمای میانگین بود (به ترتیب با مقادیر ۱/۸ و ۰/۹)، با این وجود بیشترین مقدار MBE در دمای حداکثر روزانه ایستگاه کابل و کمترین آن در دمای متوسط ماهانه ایستگاه مزار مشاهده شد (جدول ۲). بیشترین مقدار متوسط زمانی- مکانی شاخص توافق (d) نیز در ایستگاه مزار (۰/۹۵) و کمترین آن در ایستگاه کابل (۰/۸۲) مشاهده شد. از نظر مقیاس های زمانی نیز مقدار متوسط d در ایستگاه های



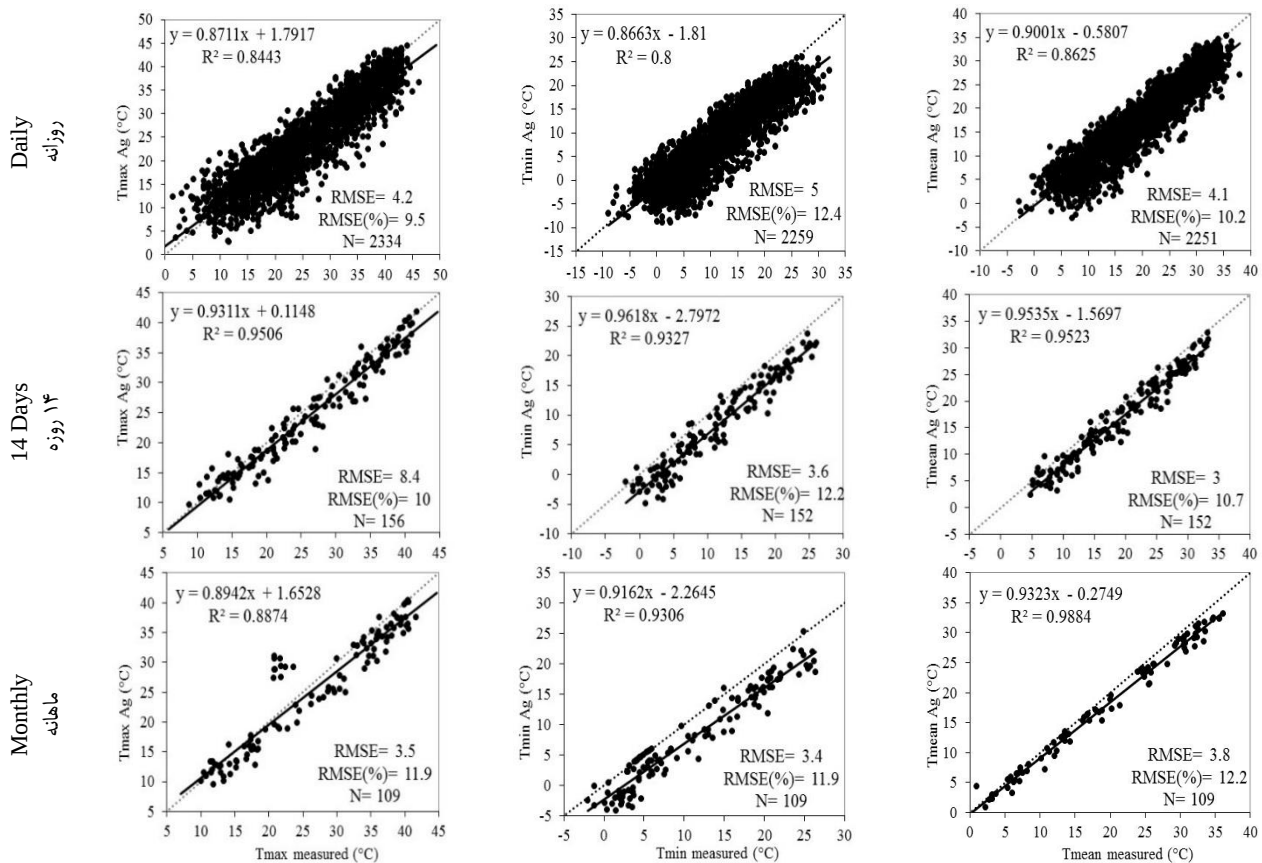
شکل ۳- مقایسه دماهای حداقل (Tmin)، حداکثر (Tmax) و میانگین (Tmean) میان AgMERRA و ایستگاه هرات در مقیاس های مختلف زمانی
Figure 3- Comparison of AgMERRA and in-situ Tmin, Tmax and Tmean in Herat Station with three different temporal scales

بیشترین و کمترین ضرایب تبیین مربوط به بارش‌های ماهانه و روزانه در ایستگاه کابل بود (به ترتیب با ۰/۹۷ و ۰/۴۵) و ایستگاه قندهار به صورت متوسط در هر سه بازه زمانی کمترین مقدار ضریب تبیین را نشان داد (۰/۸۴). NRMSE بارش نیز در تمامی مقیاس‌های زمانی در ایستگاه‌های هرات و مزار در رتبه عالی و در ایستگاه‌های کابل و قندهار در رتبه‌های خوب و عالی قرار گرفت (شکل ۶). مقدار متوسط MBE و d در چهار ایستگاه مورد مطالعه و مقیاس‌های مختلف زمانی برای بارش به ترتیب کمتر و بیشتر از پارامترهای دما بود و بیشترین مقدار شاخص توافق در بارش ماهانه ایستگاه کابل و همچنین مقیاس ۱۴ روزه و ماهانه ایستگاه مزار مشاهده شد. در ایستگاه‌های کابل، مزار و هرات مقدار شاخص MBE منفی بود در حالی که مقدار این شاخص در ایستگاه قندهار با اقلیم گرم و خشک مثبت برآورد شد (جدول ۲).

نتایج حاصل از برازش رگرسیون خطی بر داده‌های بارش ایستگاهی و AgMERRA نشان داد که ضرایب تبیین محاسبه شده برای بارش روزانه در چهار ایستگاه مطالعاتی نسبت به مقیاس‌های ۱۴ روزه و ماهانه به مراتب پایین‌تر و به صورت متوسط، بارش ایستگاه‌ها در مقیاس ماهانه دارای بهترین ضریب تبیین بود (شکل ۶). با توجه به ماهیت تصادفی و متغیر بارش، به خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، برآورد بارش در این مناطق به شدت پیچیده است (۱۱). در مطالعه‌ای دیگر که به بررسی شاخص‌های نکویی برازش میان داده‌های بارش AgMERRA و داده‌های ایستگاهی در شمال شرق ایران پرداخته شده است، این داده‌ها دارای تناسب خوبی با یکدیگر بوده‌اند و چنین نتیجه‌گیری شده است که با توجه به همبستگی مناسبی که بین شاخص‌های مختلف خشکسالی محاسبه شده بوسیله متغیر بارش مستخرج از AgMERRA و داده‌های ایستگاهی وجود دارد، می‌توان از داده‌های بارش AgMERRA برای پر کردن خلأ داده‌های ایستگاهی برای مطالعات آینده پژوهی بهره برد (۲۸).



شکل ۴- مقایسه دماهای حداقل (Tmin)، حداکثر (Tmax) و میانگین (Tmean) میان AgMERRA و ایستگاه مزار در مقیاس‌های مختلف زمانی
Figure 4- Comparison of AgMERRA and in-situ Tmin, Tmax and Tmean in Mazar Station with three different temporal scales



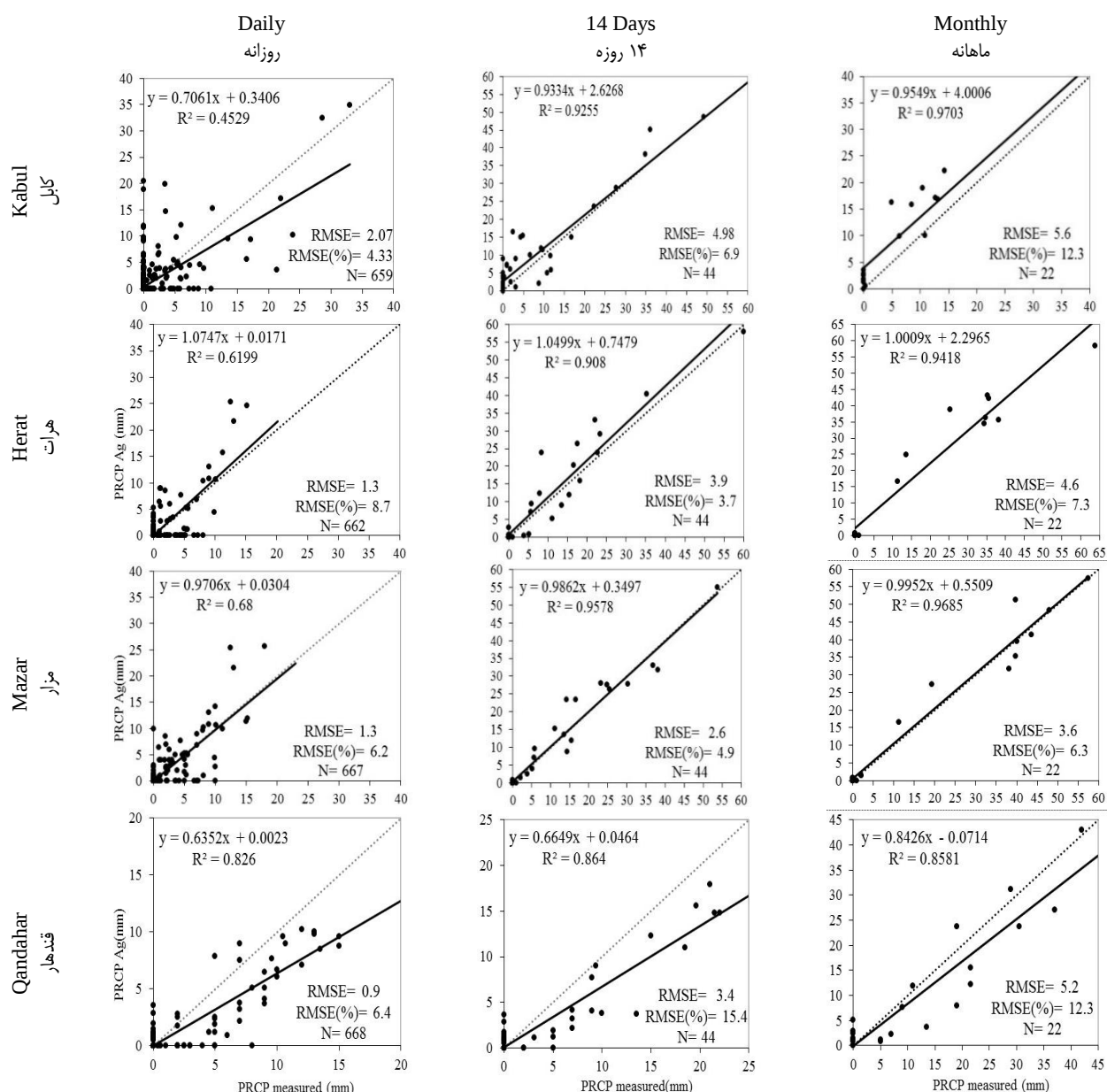
شکل ۵- مقایسه دماهای حداقل (Tmin)، حداکثر (Tmax) و میانگین (Tmean) میان AgMERRA و ایستگاه قندهار در مقیاس‌های مختلف زمانی
Figure 5- Comparison of AgMERRA and in-situ Tmin, Tmax and Tmean in Qandahar Station with three different temporal scales

مربوط به AgMERRA و ایستگاه‌های چهارگانه سینوپتیک مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۹) و به صورت کلی نتایج آن نیز بیانگر تطابق الگوی داده‌ها با یکدیگر بود و تنها در برخی موارد اختلاف‌هایی میان داده‌های واقعی و AgMERRA مشاهده شد. بر این اساس داده‌های AgMERRA قادر به برآورد دقیق نوسانات موجود در توزیع احتمال داده‌های دمای حداکثر و حداقل (با بازه یک درجه سانتیگراد) با داده‌های واقعی نبود اما در زمینه دمای میانگین این نوسانات به خوبی شبیه‌سازی شده است. کم بودن دامنه این نوسانات در AgMERRA احتمالاً به دلیل ماهیت آن که مبتنی بر بازکاوی مجموعه داده‌هایی است که با استفاده از آنها تولید شده است. لشکری و همکاران (۱۶) در مطالعه‌ای بر روی یازده ایستگاه سینوپتیک ایران انجام دادند، نتیجه‌گیری نمودند که مطابقت تابع توزیع احتمال و توزیع احتمال تجمعی بین داده‌های ایستگاهی و AgMERRA ضعیف بوده اما از لحاظ سه شاخص نکویی برازش RMSE، MBE و MAE مطابقت خوبی میان داده‌ها مشاهده شده است.

بررسی روند دمای حداکثر، حداقل و میانگین متوسط ماهانه (شکل ۷) و بارش متوسط ماهانه (شکل ۸) در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۰ میلادی نشان دهنده تبعیت قابل قبول داده‌های AgMERRA از الگوی داده‌های ایستگاهی بود. با این وجود با توجه به شاخص MBE و نیز روند داده‌های ماهانه دما، مقادیر مشخصی از شبیه‌سازی‌های کمتر^۱ و بیشتر^۲ از حد واقعی در داده‌های AgMERRA به وضوح قابل رؤیت است که این مقادیر برای پارامتر بارش کمتر از دما می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۸ و نیز جدول ۲). در ایستگاه کابل مقدار شبیه‌سازی‌های کمتر از حد واقعی AgMERRA نسبت به سه ایستگاه دیگر بیشتر بوده و در ماه‌های پاییز و زمستان در ایستگاه هرات، مقادیر AgMERRA به شبیه‌سازی بیشتر از حد واقعی دما پرداخته است.

این تبعیت از الگو در مقیاس روزانه نیز با استفاده از مقایسه نمودار توزیع احتمال داده‌های دمای حداقل، حداکثر و میانگین و نیز بارش

- 1- Under-estimate
- 2- Over-estimate

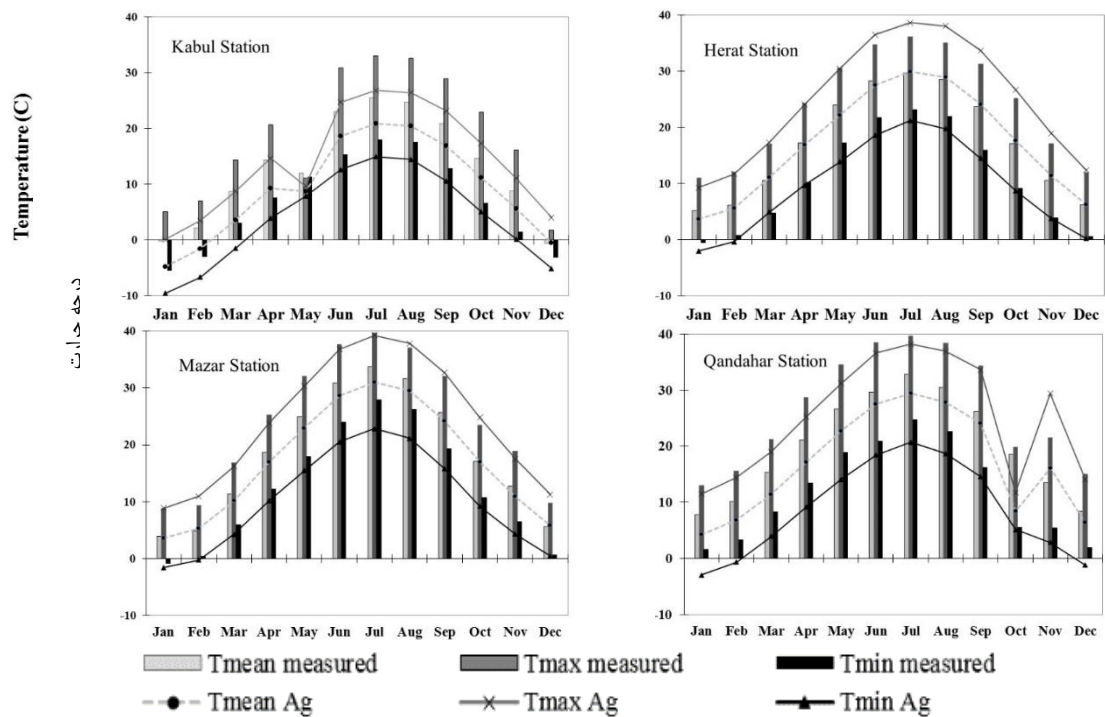


شکل ۶- مقایسه مقادیر بارش AgMERRA و داده‌های ایستگاهی چهار منطقه مورد مطالعه با مقیاس‌های زمانی روزانه، ۱۴ روزه و ماهانه
Figure 6- Comparison of AgMERRA precipitation with in-situ data of Four studied stations in three different temporal scales

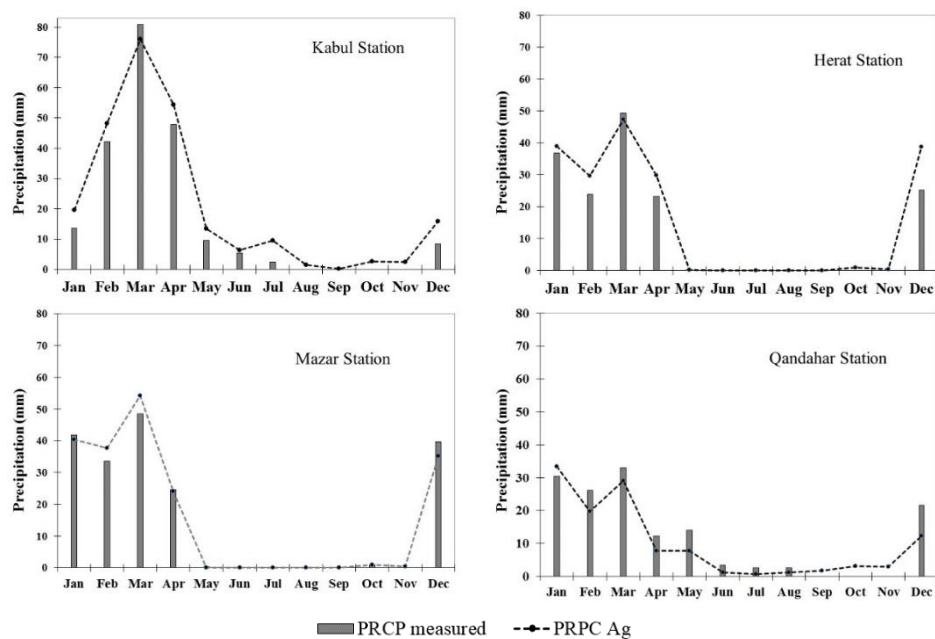
نتیجه‌گیری

برازش R^2 , MBE, d, RMSE و NRMSE و نیز بررسی روندهای روزانه و ماهانه دما و بارش پرداخته است، پایگاه داده AgMERRA از نظر آماری نتایج قابل قبولی را در مقایسه با مقادیر مشاهده شده به دست آورد که حاکی از توانایی بالای آن در تخمین متغیرهای هواشناسی است.

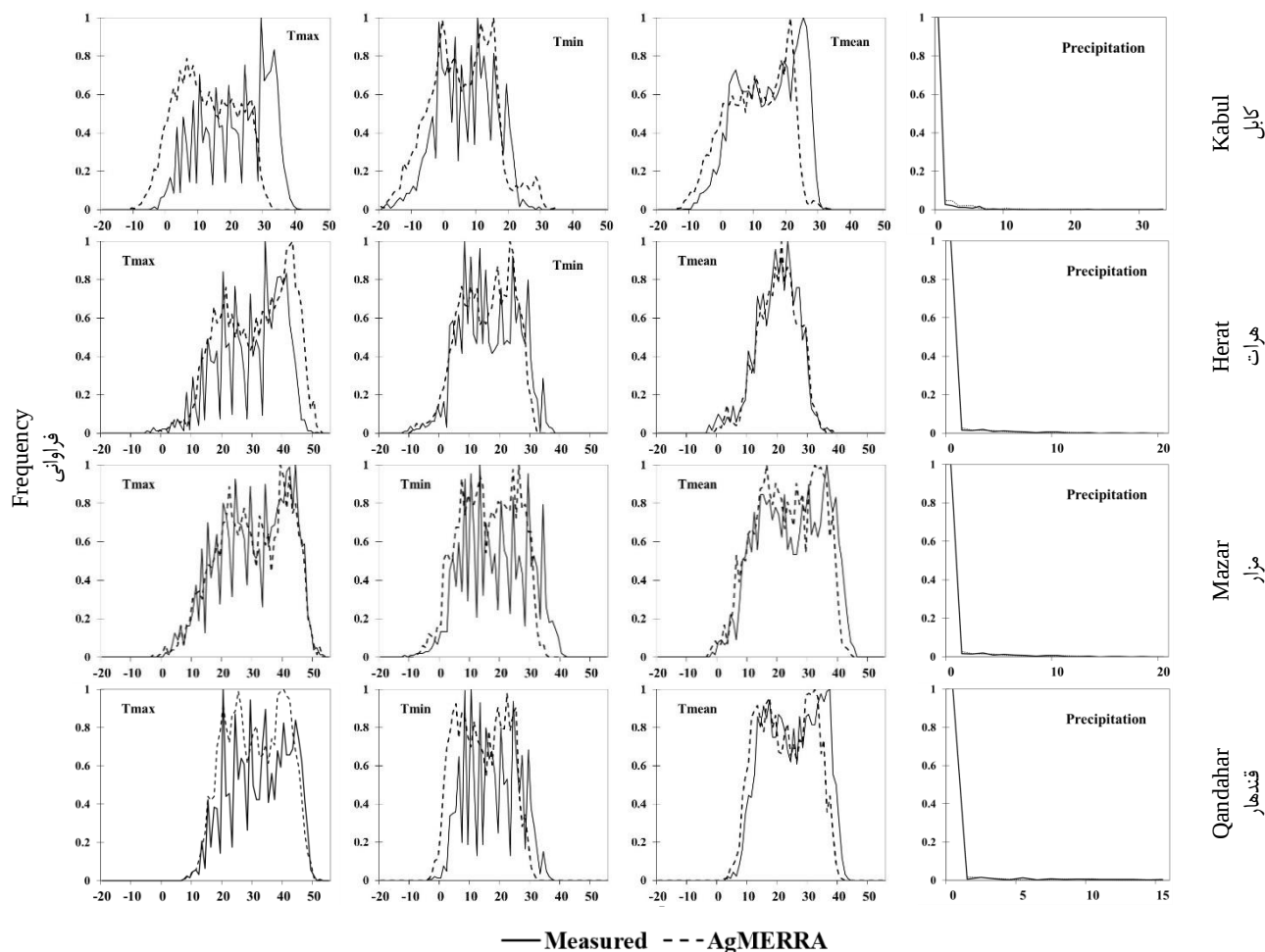
بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه که به بررسی میزان مطابقت داده‌های هواشناسی AgMERRA با داده‌های هواشناسی چهار ایستگاه سینوپتیک کابل، هرات، مزار و قندهار (به ترتیب در شرق، غرب، شمال و جنوب افغانستان) با استفاده از پنج شاخص نکویی



شکل ۷- مقایسه الگوهای دمای حداقل، حداکثر و میانگین بین داده‌های AgMERRA و چهار ایستگاه مورد مطالعه
Figure 7- Comparison of patterns of AgMERRA and in-situ Tmin, Tmax and Tmean in four studied stations



شکل ۸- مقایسه الگوی بارش ماهانه میان داده‌های AgMERRA و داده‌های چهار ایستگاه مورد مطالعه
Figure 8- Comparison of monthly precipitation pattern of AgMERRA and in-situ data



شکل ۹- مقایسه ترکیب تابع توزیع احتمال میان داده‌های AgMERRA و چهار ایستگاه مورد مطالعه
Figure 9- Composition of probability distribution function of in-situ and AgMERRA data

ایستگاه‌های هواشناسی در موقعیت نامناسب، تفاوت در پوشش سطحی و تفاوت ماهیت داده‌های ایستگاهی با داده‌های شبکه‌بندی شده را می‌توان از جمله علل احتمالی بروز این خطا دانست. بررسی الگوی ماهانه متغیرهای سه گانه دما و متغیر بارش نیز نشان داد که AgMERRA اگرچه در برخی ماه‌ها برآوردهای کمتر و بیشتر از مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های مختلف را شبیه‌سازی نموده است، اما این خطای برآورد ناچیز بوده و در متغیرهای مورد بررسی، مطابقت بالایی بین الگوی ماهانه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دیده می‌شود. بر این اساس و با توجه به پوشش ضعیف زمانی-مکانی داده‌های هواشناسی افغانستان، AgMERRA ابزاری مناسب برای تولید سری داده‌های هواشناسی با مقیاس زمانی-مکانی مورد نیاز جهت استفاده در مطالعات مختلف اگروکلیماتیک، تغییرات اقلیمی و مدل‌سازی رشد گیاهان زراعی می‌باشد، البته این امر مستلزم بررسی دقیق، متناسب با ایستگاه‌های مختلف و در صورت نیاز تصحیح مجموعه داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری موجود می‌باشد.

شاخص‌های مختلف نکویی برازش در مورد دماهای حداقل، حداکثر و میانگین، نشان دادند که با افزایش مقیاس زمانی از روزانه به ۱۴ روزه و ماهانه، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته توسط AgMERRA با مقادیر دیده‌بانی شده مطابقت بیشتری پیدا نموده است. با این وجود، مقایسه‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که دمای میانگین روزانه از توانایی بالایی برای پر کردن خلأ داده‌های مشاهداتی برخوردار است. در این بین متغیر بارش به دلیل ماهیت تصادفی^۱ آن دارای ضعیف‌ترین نتایج، به خصوص در مقیاس زمانی روزانه بود، اما در مقیاس‌های ۱۴ روزه و ماهانه نتایج قابل قبولی ارائه کرد. به طور کلی AgMERRA بارش‌های ایستگاه‌های گرم و خشک را بیشتر از حد دیده‌بانی و ایستگاه‌های واقع در مناطق نیمه خشک و نیمه مرطوب را کمتر از مقادیر دیده‌بانی شده شبیه‌سازی نموده است. مطابقت داده‌های ایستگاه کابل تا حدودی نسبت به سه ایستگاه دیگر ضعیف‌تر بود که وجود توپوگرافی پیچیده، قرار گرفتن

جدول ۲- نتایج مقایسه داده‌های ایستگاهی و AgMERRA بر اساس شاخص‌های MBE و d

Table 2- Comparison of AgMERRA and in-situ data using d and MBE indices

ایستگاه Station	متغیر Variable	مقیاس زمانی Temporal Scale	MBE	d
کابل Kabul	T _{max}	Daily	5.1	0.7
		14 days	5.08	0.73
		Monthly	3.94	0.84
	T _{min}	Daily	2.77	0.82
		14 days	3.002	0.87
		Monthly	3.18	0.86
	T _{mean}	Daily	0.14	0.85
		14 days	-2.002	0.97
		Monthly	-3.15	0.98
	Precipitation	Daily	3.608	0.94
		14 days	4.089	0.81
		Monthly	3.66	0.85
هرات Herat	T _{max}	Daily	-1.1	0.94
		14 days	-1.22	0.97
		Monthly	-0.96	0.96
	T _{min}	Daily	1.07	0.89
		14 days	1.3	0.94
		Monthly	1.19	0.94
	T _{mean}	Daily	-0.04	0.85
		14 days	-0.92	0.96
		Monthly	-1.8	0.97
	Precipitation	Daily	-0.29	0.92
		14 days	0.11	0.98
		Monthly	0.07	0.97
مزار شریف Mazar Shrif	T _{max}	Daily	0.69	0.96
		14 days	0.83	0.98
		Monthly	0.58	0.98
	T _{min}	Daily	2.5	0.86
		14 days	0.83	0.98
		Monthly	2.6	0.91
	T _{mean}	Daily	-0.02	0.57
		14 days	-0.24	0.98
		Monthly	-0.47	0.98
	Precipitation	Daily	1.64	0.95
		14 days	1.7	0.96
		Monthly	1.62	0.97
قندهار Qandahar	T _{max}	Daily	1.68	0.88
		14 days	1.72	0.94
		Monthly	1.16	0.92
	T _{min}	Daily	3.39	0.85
		14 days	3.14	0.84
		Monthly	3.17	0.86
	T _{mean}	Daily	0.17	0.91
		14 days	1.68	0.87
		Monthly	2	0.92
	Precipitation	Daily	2.52	0.85
		14 days	2.48	0.9
		Monthly	2.81	0.87

- 1- Allen R.J., and De Gaetano A.T. 2001. Estimating missing daily temperature extremes using an optimized regression approach. *International Journal of Climatology*, 21:1305–1319.
- 2- Bannayan M., Lashkari A., Zare H., Asadi S., and Salehnia N. 2015. Applicability of AgMERRA forcing dataset to fill gaps in historical in-situ meteorological data. In: American Geophysical Union, Fall Meeting 2015. Abstract #GC13D-1180. 2015AGUFMGC13D1180B. Washington DC: American Geophysical Union.
- 3- Burroughs W. 2003. *Climate into the 21st Century*. Cambridge University Press, 240 pp.
- 4- Carson D. J. 1999. Climate modelling: achievements and prospects. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 125:1–28.
- 5- Ceglar A., Toreti A., Balsamo G., and Kobayashi S. 2017. Precipitation over Monsoon Asia: a comparison of reanalyses and observations. *Journal of Climate*, 30(2):465–476.
- 6- Ghafourian H., and Sanaei Nejad H. 2013. Drought monitoring using TRMM dataset in Razavi Khorasan Province. MSc thesis in Agrometeorology, Ferdowsi University of Mashhad.
- 7- Ghazanfari Moghaddam M.S., Alizadeh A., MousaviBaygi S.M., Faridhosseini A.R., and Bannayan M. 2011. Comparison the PERSIANN Model with the Interpolation Method to Estimate Daily Precipitation (A Case Study: North Khorasan). *Journal of Water and Soil*, 25 (1):207-2015. (In Persian with English summary)
- 8- Goovaerts P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*, Oxford University Press, New York, Oxford, Vol. 483.
- 9- Greene A.M., and Allis E.C. 2014. A Stochastic Climate Generator for Agriculture in Southeast Asian Domains, American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract #GC23D-0663.
- 10- Hijmans R.J., Cameron S.E., Para J.L., Jones P.G., and Jarvis A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25:1965–1978.
- 11- Hong Y., Hsu K., Gao X., and Sorooshian S. 2004. Precipitation estimation from remotely sensed imagery using artificial neural network cloud classification system. *Journal of Applied Meteorology*, 43:1834–1853.
- 12- Huffman G. J., Adler R. F., Bolvin D. T., Gu G., Nelkin E. J., Bowman K. P., Hong Y., Stocker E. F., and Wolff D. B. 2007. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. *Journal of Hydrometeorology*, 8:38-55.
- 13- Kessler E., and Neas B. 1994. On correlation, with applications to the radar and raingage measurement of rainfall, *Atmospheric Researches*, 34:217-229.
- 14- Kira O., Nguy-Robertson A.L., Arkebauer T.J., Linker R., and Gitelson A.A. 2017. Toward Generic Models for Green LAI Estimation in Maize and Soybean: Satellite Observations. *Remote Sensing*, 9:318.
- 15- Koocheki A., Nassiri Mahallati M., and Jafari L. 2016. Evaluation of Climate Change Effect on Agricultural Production of Iran: I. Predicting the Future Agroclimatic Conditions. *Iranian Journal of Crop production*, 13(4): 651-664. (In Persian with English summary)
- 16- Lashkari A., Bannayan M., Zare A., Asadi A., and Salehnia N. 2015. Applicability of AgMERRA forcing dataset to fill the gaps in historical in-situ meteorological data, case study: Iran. AGU FALL MEETING, San-Francisco.
- 17- Lashkari A., Bannayan M., Koocheki A., Alizadeh A., Choi Y. S., and Park S. K. 2016. Applicability of AgMERRA forcing dataset for gap-filling of in-situ meteorological observation, Case Study: Mashhad Plain. *Journal of Water and Soil*, 29(6):1749-1758.
- 18- Legates D. R. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1): 33-241.
- 19- Legates D. R., and Davis R. E. 1997. The continuing search for an anthropogenic climate change signal: Limitations of correlation-based approaches, *Geophysical Research Letters*, 24:2319-2322.
- 20- Legates D. R., and McCabe Jr.G.J. 1999. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water and Resources Research*, 35(1):233-241.
- 21- Mohanty M., Sinha N.K., and Patra A.K. 2015. Crop Growth Simulation Models in Agricultural Crop Production: 1-27 in *Crop Growth Simulation Modelling and Climate Change*. Mohanty M., Sinha N. K., Hati K. M., Chaudhary R. S., Patra A.K. (ed.) Scientific Publishers, India.
- 22- Nalder I.A., and Wein R.W. 1998. Spatial interpolation of climatic normal: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92:211–225.
- 23- New M., Hulme M., and Jones P. 1999. Representing twentieth century space-time climate variability. Part I. Development of a 1961–1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, 12:829–856.
- 24- New M., Lister D., Hulme M., and Makin I. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Researches*, 21.
- 25- Reilly J., Tubiello F., McCarl B., Abler D., Darwin R., Fuglie K., Hollinger S., Izaurralde, C., Jagtap S., Jones J., Mearns L., Ojima D., Paul E., Paustian K., Riha S., Rosenberg N., and Rosenzweig C. 2003. Agriculture and climate change: new results. *Climatic Change*, 57: 43–69.

- 26- Rosenzweig C., Elliott J., Deryng D., Ruane A.C., Müller C., Arneth A., Boote K.J., Folberth C., Glotter M., Khabarov N., Neumann K., Pionteke F., Pugh T.A.M., Schmid E., Stehfest E., Yang H., and Jones J.W. 2013. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 111(9):3268–3273.
- 27- Ruane A.C., Goldberg R., and Chryssanthacopoulos J. 2015. Climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200: 233-248.
- 28- Salehnia N., Alizadeh A., Sanaeinejad H., Bannayan M., Zarrin A., and Hoogenboom G. 2017. Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. *Journal of Arid Land*.
- 29- Schneider U., Becker A., Finger P., Meyer-Christoffer A., Rudolf, B., and Ziese M. 2011. GPCC Full Data Reanalysis Version 6.0 at 0.5°: Monthly LandSurface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data.
- 30- Shcherbakov M.V., Brebels A., Shcherbakova N. L., Tyukov A. P., Janovsky T.A., and Kamaev V.A. 2013. A Survey of Forecast Error Measures. *World Applied Sciences Journal*, 24:171-176.
- 31- Steward P.R., Andrew J.D., Christian T., Cameron M.P., Lindsay C.S., Maxwell K., and Gorm E.S. 2018. The adaptive capacity of maize-based conservation agriculture systems to climate stress in tropical and subtropical environments: A meta-regression of yields. *Agriculture, Ecosystem and environment*, 251:195-202.
- 32- Tardivo G., and Berti A. 2012. A Dynamic Method for Gap Filling in Daily Temperature Datasets. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51:1079–1086.
- 33- UNEP. 2009. Afghanistan National Capacity Needs Self-Assessment for Global Environmental Management (NCSA) and National Adaptation Programme of Action for Climate Change (NAPA), 128 pp. Available at: http://www.unep.org/dgef/Portals/43/publications/Afghan_NCSA_and_NAPA_2009.pdf.
- 34- Wallach D., Makowski D., and Jones J.W. 2007. Working with dynamic crop models. Elsevier. In Weedon G. P., Gomes S., Balsamo G., Best M. J., Bellouin N., and Viterbo P. 2012. README file for the “WFDEI” dataset. Version: September 18th, 2013, Available at: www.eu-watch.org/data_availability.
- 35- Wallach D., Makowski D., and Jones J.W. 2006. Working with dynamic crop models: Evaluations, analysis, parameterization and applications (First edition). Elsevier Science.
- 36- Wechsung F., Childers K., Frieler K., and Hoffman P. 2015. Forecasting Moroccan Wheat Yields using Two Statistical Models, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2015*, abstract #A21F-0210.
- 37- Wilby R.L., Charles S., Zorita E., Timbal B., Whetton P., and Mearns L. 2004. Guidelines for use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. IPCC, IPCC Supporting Material, available from the DDC of IPCC TGCIA.
- 38- Willmott C.J. 1981. On the validation of models, *Physical Geography*, 2(2):184–194.
- 39- Willmott C.J., Ackleson S.G., Davis R.E., Feddema J.J., Klink K.M., Legates D.R., O'Donnell J., Rowe C.M. 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models, *Journal of Geophysics Researches*, 90:8995-9005.
- 40- Willmott C.J., and Matsuura K. 1995. Smart interpolation of annually averaged air temperature in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, 34(12):2577–2586.
- 41- Yatagai A., Arakawa O., Kamiguchi K., Kawamoto H., Nodzu M., and Hamada A. 2009. A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 5:137–140.
- 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 American Meteorology Society*, 93:1401–1415.
- 43- Zare H., Fallah M.H., Asadi A., Mojab A., and Bannayan M. 2016. Assessment of DSSAT and WOFOST sensitivity to temperature derived from AgMERRA. *International Crop Modelling Symposium*: 434-435.



Applicability of AgMERRA for Gap-Filling of Afghanistan *in-situ* Temperature and Precipitation Data

A. R. Razavi^{1*}- M. Nassiri Mahallati²- A. Koocheki³- A. Beheshti⁴

Received: 04-12-2017

Accepted: 23-04-2018

Introduction: Climate change (CC) is one of the most important concerns for mankind in the current century. Increasing CO₂ concentration and the proof of the greenhouse effect theory in which the type and composition of atmospheric gases which influence the earth temperature, are among undeniable facts makes the future climate change more possible. Impacts of Global warming on hydrological cycles and precipitation patterns would be more prominent in arid and semi-arid regions of the earth. For the arid and semi-arid nature and the poverty more fraction of Afghanistan suffer from, it is likely that the impacts of CC on the country will be more intense. This is while there is no credible and reliant research addressing the impacts of CC on agriculture and food security sector of Afghanistan. Studying the impacts of CC on agriculture, future changes in agroclimatic indices and application of crop growth simulation models intensively require a precise and adequate sets of meteorological data. Because of many reasons, Afghanistan's historical meteorological data coverage is really weak. In this research the applicability of AgMERRA as a gauge-satellite based dataset for filling the Afghanistan *in-situ* meteorological gaps is evaluated via goodness of fit measures, patterns of seasonal changes and the probability distribution functions.

Materials and Methods: This study is conducted on four major stations of Afghanistan (Kabul, Herat, Mazar Sharif and Qandahar in the east, west, north and south of the country, respectively) (Fig. 1 and table 1) which had the best *in-situ* meteorological data coverage. Observed Maximum (Tmax) and Minimum temperature (Tmin) and precipitation (PRCP) data is collected via Afghanistan Meteorological Authority (AMA) or other sources. AgMERRA database downloaded with .nc4 format and extracted with R statistical software or Panoply ver. 4.8.4, dependently. Then five goodness of fit (GOF) measures (RMSE, NRMSE, MBE, R² and d) are calculated according to the equations 1 to 5. There are different norms and indices to measure the validity of a models, some based on Pearson correlation coefficient (R and R²) which indicate the degree of correlation between observed and predicted data but have some amounts of sensitivity to extreme values (outliers). Although, many other measures are considered to overcome the weaknesses but it is hard to distinguish the best.

Results and Discussion: The results of this research indicated the good potency, effectiveness and ability of AgMERRA for gap-filling of *in-situ* meteorological data and producing spatiotemporal data series. Several studies in this area have almost the same results. It is reported that AgMERRA is the most applicable dataset for reflecting precipitation data comparing with ERA-Interim, ERA-Interim/Land and JRA-55 datasets. Comparisons via NRMSE shows great (>10%) and good (>20%) amounts in all stations and temporal scales. Among other stations, Mazar Shrif showed the best conformity between AgMERRA and observed data, while Kabul station had the weakest, probably due to complex topographic situation of the Kabul airport station. The amounts of R² for predicting temperature (Tmax and Tmin) were more than 0.86 in daily, 14-days and monthly temporal scales. The lowest amount of the coefficient of determination was obtained at Qandahar station for Tmean in daily temporal scale (R²=0.8) and the highest amount obtained for daily Tmax at Mazar Sharif station (R²=0.947). R² for daily PRCP were inadequate, but increasing to adequate amounts in 14-days and monthly temporal scales. The highest spatiotemporal amount of Tmax, Tmin and Tmean was obtained in daily scale and the lowest amount was obtained for Tmean (1.8 and 0.9, respectively). The Index of agreement (d), also had adequate amounts for 14-days and monthly PRCP (>0.87). The amount of MBE for precipitation in Herat, Mazar Sharif and Kabul stations were negative, while it was positive in Qandahar station with a hot and dry climate. AgMERRA could show a good compliance with changes of observed seasonal patterns, however, some amount of over and under-estimates are obvious especially for Kabul station. This compliance with *in-situ* observed patterns was acceptable for daily temporal scale, although AgMERRA was unable to predict some of the fluctuations in probability distribution composition (with the range of 1 °C), especially for Tmax and Tmin, but for Tmean the fluctuations simulated well.

1, 2 and 3- Ph.D. Graduated and Professors of the Agrotechnology Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respectively

(*- Corresponding Author Email: arazavi2005@gmail.com)

4- Associate Professor of Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research Center

Conclusion: According to the results of the study, AgMERRA showed an acceptable potency to simulate the *in-situ* meteorological data in four major studied stations of Afghanistan. According to the stochastic nature of PRCP, the variable showed the weakest results in daily temporal scale but acceptable in 14-days and monthly. Given the weak coverage of *in-situ* meteorological data of Afghanistan, AgMERRA could be a valid dataset for producing well scaled spatiotemporal data series to be used in agroclimatic, CC and crop growth modeling studies.

Keywords: Climate change, Goodness of fit, Kabul, Meteorology, Meteorological data
\\

اثر تغییر اقلیم بر تغییرات جهشی تبخیر - تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: شمال غرب ایران)

یعقوب دین پژوه^{۱*} - معصومه فروغی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۳۰

چکیده

مطالعه تغییرات ناگهانی تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_0) در مدیریت منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش، تغییرات ناگهانی ET_0 در دو مقیاس ماهانه و سالانه در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های ۳۶ ایستگاه هواشناسی همدید (۱۹۸۰-۲۰۱۵) استفاده گردید. میزان ET_0 در هر ماه و ایستگاه با روش فائو - پنمن مانتیث (FAO-PM56) برآورد گردید. برای آزمون تغییر ناگهانی در سری‌های ET_0 و تشخیص تاریخ دقیق تغییر از روش پتیت استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییر ناگهانی معنی‌دار در سری‌های زمانی ET_0 برای اکثر ایستگاه‌ها در سطح ۵ درصد تجربه شده است. در مقیاس ماهانه و سالانه بترتیب ۵۹/۷۲ درصد و ۸۰/۵۵ درصد ایستگاه‌ها جهش رو به بالا داشتند. در ایستگاه سرارود کرمانشاه در اکثر ماه‌ها، ET_0 جهش رو به بالا را تجربه کرده، طوری که در مقیاس ماهانه، بیشترین اختلاف میانگین ET_0 در دو زیر دوره قبل و بعد از سال تغییر در سپتامبر به اندازه ۴۷/۷۵ میلی‌متر در ماه (معادل ۳۵ درصد) مشاهده شد. در مقیاس سالانه، اغلب ایستگاه‌ها تغییرات پرشی را در بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸ تجربه کرده‌اند. بیشترین پرش در ET_0 سالانه مربوط به سرارود کرمانشاه بود که در آن میانگین مقادیر ET_0 در دو زیر دوره (قبل و بعد از سال تغییر) به ترتیب، ۱۴۳۸ و ۱۶۷۳ (میلی‌متر در سال) به دست آمد که اختلاف آن معادل ۲۳۵ میلی‌متر (معادل ۱۶ درصد) بود که به صورت افزایش در ET_0 سالانه در زیر دوره اخیر، نسبت به زیر دوره قبلی تجربه شده است. مدیریت خردمندان آب قابل دسترس در منطقه مورد مطالعه برای ادامه فعالیت‌های کشاورزی و مرتبط با آب حیاتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پتیت، پنمن - مانتیث، تغییر ناگهانی، شمال غرب ایران

مقدمه

رودخانه‌ها و نشست زمین در برخی از دشت‌ها (به دلیل استخراج بی رویه و ناپایدار آب‌های زیرزمینی) بوده است. با توجه به اینکه عمده مصرف آب، هم در این منطقه و هم در کل کشور، متعلق به بخش کشاورزی است، لازم است تا حد ممکن جلوی تلفات آب کشاورزی گرفته شود. این کار نیازمند تخمین آب مورد نیاز هر یک از گیاهان زراعی و باغی در هر منطقه است. اولین گام در برآورد آب مورد نیاز، تخمین دقیق تبخیر - تعرق پتانسیل^۳ (ET_0) در آن منطقه می‌باشد. تخمین دقیق این پارامتر و بررسی جنبه‌های مختلف آن مورد توجه هیدرولوژیست‌ها قرار گرفته است. در سال‌های اخیر روند تغییرات ET_0 (هم تدریجی یا یکنواخت و هم ناگهانی) مورد توجه دانشمندان مختلف جهان واقع شده است. مثلاً در جمهوری مولداوی، پیتیکار و همکاران (۲۷)، در هند باندیوپادایای و همکاران (۲)، در چین هائو و همکاران (۸) و در ایران دین‌پژوه و همکاران (۵) روند تغییرات ET_0 را مطالعه کردند. استفاده از روش فائو - پنمن - مانتیث (FAO-PM56)

یکی از مؤلفه‌های مهم چرخه آب در طبیعت تبخیر - تعرق می‌باشد. در سال‌های اخیر، افزایش درجه حرارت هوا، کاهش میزان بارش، افت شدید آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های مختلف، خشک شدن تالاب‌ها، کاهش رواناب رودها، شرایط سختی را پدید آورده و انتظار می‌رود با توجه به افزایش جمعیت، ارتقای سطح بهداشت، تمرکز جمعیت در شهرهای بزرگ این قبیل مسائل با شدت بیشتر در آینده جلوه کند. بخش‌های غرب و شمال غرب ایران، همواره یکی از مناطق مهم تولید محصولات کشاورزی در ایران بوده است. این ناحیه، در سال‌های گذشته دستخوش چالش‌های مهمی مانند خشک شدن دریاچه ارومیه، افت شدید تراز آب زیرزمینی، جریان

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(Email: dinpashoh@yahoo.com)

(*) نویسنده مسئول:

۲- دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.71351

برای تخمین میزان ET_0 مورد توجه محققین مختلف واقع شده است. مثلاً لی و همکاران (۱۶) در چین، جارجاریا و همکاران (۹) در هند، ژانگ و لیو (۳۱) در چین، جیانگ و همکاران (۱۰) در چین، روش FAO-PM56 را برای تخمین ET_0 انتخاب کردند. روش ناپارامتری پتیت که توسط پتیت (۲۵) ابداع شده است، برای تعیین نقطه دقیق تغییر (گاهی نقطه شکست و نقطه جهش نیز می‌نامند) در میانگین یک سری زمانی به کار می‌رود. کاندزویچ و رابسون (۱۵) انواع روش های تشخیص جهش/شکست ناگهانی را در سری های زمانی هیدرولوژیکی معرفی و تأکید کردند که روش های ناپارامتری برای سری هایی که چولگی دارند، مناسب هستند. روش های مختلف برای تشخیص نقطه تغییر ناگهانی در سری های زمانی وجود دارد. به عنوان نمونه روش کرامر که نوسط ژانگ و همکاران (۳۱) استفاده شده، یکی از روش های پارامتری است که در تشخیص نقطه تغییر ناگهانی کاربرد دارد و در آن از فن مقایسه میانگین سری در یک زیربازه ای از سری زمانی با مقدار میانگین نظیر در کل دوره آماری بهره گرفته می شود.

در سال های اخیر، استفاده از روش ناپارامتری پتیت برای تشخیص و آزمون نقطه تغییر مورد توجه هیدرولوژیست ها قرار گرفته است. مثلاً کایلی (۱۳) این روش را برای تعیین نقطه شکست در سری شدت بارش در ایرلند بکار برد. همچنین کایلی و همکاران (۱۴) از این روش برای تعیین نقطه شکست در سری زمانی بارش های فصلی و سالانه بهره گرفتند. قارابورک و همکاران (۱۱) برای آزمون همگنی داده های بارش های سالانه ترکیه از آزمون همگنی نرمال استاندارد^۱ (SNHT) استفاده کردند. ایشان اظهار داشتند که روش SNHT به نقاط جهش ناگهانی در ابتدا یا انتهای سری زمانی حساس می باشد در حالی که روش پتیت به نقاطی که جهش در بخش های میانی سری زمانی روی می دهد حساس است. روش SNHT روش پارامتری بوده و نیاز است سری زمانی مورد آزمون از توزیع نرمال تبعیت کند. در حالی که این فرض در روش پتیت الزامی نیست.

لی و همکاران (۱۶) از روش پتیت برای تعیین تاریخ تغییر میزان دبی پایه بر اثر تغییر در پوشش جنگلی حوضه ای واقع در کانادا و ایالات متحده بهره گرفتند. پینگاله و همکاران (۲۶) نقطه تغییر ناگهانی را در مقادیر سری زمانی ET_0 در منطقه اجمیر^۲ راجستان هند مورد آزمون قرار دادند. لو و همکاران (۱۹) از روش پتیت برای تعیین نقطه جهش یا تغییر در سری زمانی ET_0 در منطقه ای موسوم به "مخزن تری گرگز" (TGR) بهره بردند. ما و همکاران (۲۰) نیز از آن برای آزمون وجود نقطه تغییر در سری های مربوط به شاخص های جریان رودخانه در حوضه های چین استفاده کردند. لیو و همکاران

(۱۷) از روش پتیت برای تعیین نقطه شکست در سری های زمانی مرتبط با اقلیم مانند بارش، دامنه تغییرات درجه حرارت هوای روزانه، ساعات آفتابی و رطوبت هوا در چین استفاده کردند. معماریان و همکاران (۲۱) از آزمون پتیت برای تعیین نقطه تغییر ناگهانی در روند سری های زمانی جریان و بار بستر رسوب در سه ایستگاه آب سنجی واقع در سلانگور مالزی استفاده کردند. استفانسکو و همکاران (۲۹) از روش پتیت برای تشخیص سال تغییر در سری های زمانی بارش در رومانی استفاده کردند. اخیراً هادی و تومبال (۷) از روش پتیت برای مطالعه تغییر ناگهانی در سری های زمانی بارش و دمای ۸۱ شبکه گرهی نقاط در ترکیه (۲۰۱۴-۱۹۰۱) استفاده کردند. آن ها نتیجه گرفتند که گرچه در بارش های سالانه ترکیه جهش ناگهانی دیده نشد ولی یک تغییر ناگهانی و رو به بالا در دمای هوا در سال ۱۹۹۳ در ترکیه روی داده است. باسیانی و اوکای (۳) از روش ناپارامتری پتیت در تشخیص تاریخ تغییر ناگهانی در دبی پایه رودخانه ها (۲۰۰۸-۱۹۱۳) در ۱۹ ایستگاه واقع در مجمع الجزایر هاوایی استفاده نمود. بنا به گزارش ایشان، در سال ۱۹۴۳ دبی پایه ۱۰۱ ایستگاه هیدرومتری از کل ۱۶۳ ایستگاه در ناحیه مذکور به طور ناگهانی کاهش یافته است. برس و همکاران (۴) برای آزمون نقطه تغییر در سری های زمانی مرتبط با محیط مانند دمای سطح آب دریا، شوری آب دریا، مواد معلق در آب دریا و کلروفیل نوع آلفا در ناحیه ای در قطب شمال موسوم به جزایر کینگ جورج از روش های ناپارامتری (مانند پتیت و بوشاند) بهره جستند.

در ایران نیز تعیین نقطه شکست در سری های زمانی هیدرومتئورولوژیکی تاحدودی توجه محققین را به خود جلب کرده است. قاسمی (۶) در مطالعه ای ارزشمند ایستگاه های هواشناسی را در سطح کشور با روش تجزیه خوشه ای پهنه بندی نمود و سپس با بهره گیری از روش پتیت نشان داد که در همه خوشه ها میانگین دمای سالانه در ایران یک تغییر ناگهانی رو به بالا و معنی دار را در سال ۱۹۹۷ تجربه کرده است. ایشان گزارش نمود که روش پتیت در تشخیص نقطه تغییر و آزمایش جهش ناگهانی در سری های زمانی مرتبط با اقلیم مفید می باشد. احمدی و همکاران (۱) تغییر ناگهانی در سری های زمانی دمای هوای ۳۴ ایستگاه همدید را در ایران در خلال دوره آماری (۲۰۱۰-۱۹۶۱) با روش پتیت بررسی نمودند. خسروی و همکاران (۱۲) تغییرات ناگهانی را در سری های زمانی بارش در ۲۲ ایستگاه استان فارس با روش های پتیت، دامنه بوشاند^۳ (BR) و نسبت فون نیومن^۴ استفاده کردند. همچنین ناظری تهرودی و همکاران (۲۲) از روش پتیت برای تشخیص نقطه شکست در سری های زمانی بارش در ۴۲ ایستگاه واقع در حوضه دریاچه ارومیه

3- Buishand Range

4- Von Neuman Ratio

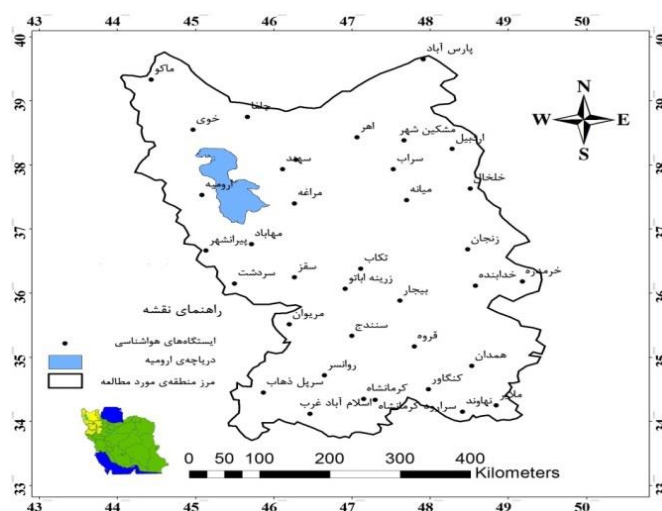
1 -Standad Normal Homogeneity Test

2 -Ajmer District

(۱۳۹۲-۱۳۶۳) بهره گرفتند. بنظر می‌رسد که با وجود مطالعات مختلف مرتبط با ET_0 ، تاکنون مطالعه جامع پیرامون تشخیص نقطه تغییر (تغییرات ناگهانی) سری‌های زمانی ET_0 در منطقه شمال غرب کشور انجام نشده است. در یک مطالعه جدید، چنین گزارش شده است که روش‌های BR و پتیت از جمله روش‌هایی محسوب می‌شوند که نقطه تغییر ناگهانی را در بخش‌های میانی سری زمانی مورد آزمون به‌خوبی تشخیص می‌دهد (۲۴). با این حال، چون روش BR نیاز به تبعیت داده‌ها از توزیع آماری نرمال دارد، بنابراین استفاده از روش پتیت (نسبت به روش BR) از ارجحیت نسبی برخوردار است (۲۴). به‌نظر می‌رسد، چون شمال غرب ایران یکی از قطب‌های تولید غلات در ایران محسوب می‌شود در نتیجه، انجام این مطالعه و یافته‌های آن بتواند درک صحیحی از تغییرات تقاضا برای آب در کشور داده و تا حدودی در حل احتمالی مسائل مربوط به مدیریت منابع آب منطقه مفید واقع شود، ضروری می‌نماید. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، بررسی تغییرات ناگهانی ET_0 در شمال غرب ایران با استفاده از روش پتیت در دو مقیاس ماهانه و سالانه می‌باشد.

منطقه مورد مطالعه، شمال غرب ایران (شامل استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، زنجان، کردستان، کرمانشاه و همدان) می‌باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در این مطالعه، اثر تغییر اقلیم بر تغییرات ناگهانی ET_0 ایستگاه‌های منتخب در شمال غرب ایران با توجه به روش پتیت انجام شد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های منتخب در شمال غرب ایران

گرفته شد و مقدار ارزش P آن بدست آمد. اگر این مقدار کمتر از سطح معنی داری مفروض (0.05) در این مطالعه) می بود، تغییر ناگهانی در نقطه جهش / شکست مورد آزمون، معنی دار تلقی شده و تاریخ نظیر آن (با توجه به هویت سال آغازین دوره آماری و مقدار t نظیر بیشترین U_t) به عنوان تاریخ جهش / شکست شناخته می شود. مثلاً اگر تاریخ شروع سری زمانی سال ۱۹۵۶ و بیشترین U_t محاسبه شده برای حالتی باشد که در آن سری زمانی دارای دو زیر سری، بشرح ۱۴ مشاهده در زیرسری اول و بقیه در زیرسری دوم باشد، در این حالت $t=14$ بوده و در نتیجه، تاریخ تغییر ناگهانی سری متعلق به سال ۱۹۷۰ (یعنی ۱۹۵۶+۱۴) می باشد. ضمناً بطوری که قبلاً اشاره گردید، اگر بیشترین U_t محاسباتی مثبت باشد، آنگاه جهت تغییر ناگهانی رو به بالا و در غیر این صورت جهت تغییر رو به پایین فرض شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ مقادیر آماره های k_t و P -value (مربوط به آزمون پتیت) را بترتیب، در شش ماهه اول سال، در ایستگاه های مورد مطالعه نشان می دهد. بطوری که از این جدول می توان استنباط کرد، در یک سری زمانی با افزایش k_t ، مقدار P -value کاهش می یابد. حدود $59/72$ درصد از سری های زمانی ET_0 در مقیاس ماهانه دارای تغییرات ناگهانی می باشد. از بین ایستگاه های مورد مطالعه، ایستگاه ارومیه با مقدار P -value خیلی نزدیک به صفر در همه ماه های سال، تغییر جهشی ناگهانی در ET_0 ماهانه (معنی دار در سطح ۵ درصد) نشان داد. در مقیاس سالانه (برای رعایت اختصار نتایج مقیاس سالانه و شش ماهه دوم نشان داده نشده)، حدود $80/55$ درصد سری ها مانند ایستگاه های اسلام آباد غرب (2002)، ارومیه (1995)، تبریز (1995)، خوی (1998)، زنجان (1996)، سراب (1998)، سرارود کرمانشاه (1989)، سقز (1998)، سنندج (1995)، کنگاور (2001)، کرمانشاه (1994)، مراغه (1999)، مهاباد (1998) و همدان (1997) تغییرات ناگهانی داشته اند (لازم به اشاره است که اعداد داخل پرانتز سال مربوط به تغییر جهشی می باشند). جهت تغییرات جهشی در همه آنها رو به بالا بود.

جدول ۲ خلاصه نتایج آزمون پتیت را در ایستگاه های مورد مطالعه نشان می دهد. این نتایج شامل تعداد ایستگاه های همراه با تغییر ناگهانی، درصد ایستگاه ها، نام ایستگاه با بیشترین جهش در ET_0 ، هویت سال تغییر می باشند. مقادیر میانگین زیر سری ET_0 قبل و بعد از تغییر جهشی (تغییر ناگهانی) نیز در جدول آورده شده است. براساس جدول مذکور، در ماه مارس تعداد ۳۱ ایستگاه از کل ۳۶ ایستگاه (معادل $86/11$ درصد ایستگاه ها) تغییرات ناگهانی در ET_0 داشتند.

$$\operatorname{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

آنگاه مقادیر آماره های U_t (به ازای t های از یک تا $n-1$) از رابطه زیر حساب شد:

$$U_t = \sum_{i=1}^t \sum_{j=i+1}^n D_{ij} \quad (3)$$

در آزمون پتیت برای یک آزمایش دو دامنه ای از آماره زیر استفاده شد:

$$k_t = \max_{1 \leq t < n} [\operatorname{absolute}(U_t)] \quad (4)$$

اگر همه اعضای مجموعه مقادیر U_t در نظر گرفته شود آنگاه:

$$k_t^+ = \max_{1 \leq t < n} U_t \quad (5)$$

نشان دهنده جهت تغییر ناگهانی سری رو به بالا و در نقطه t

می باشد و نیز:

$$k_t^- = -\min_{1 \leq t < n} U_t \quad (6)$$

نشان دهنده جهت تغییر ناگهانی سری به سمت پایین و در نقطه

t می باشد.

واضح است که در یک سری زمانی ممکن است یک یا چند نقطه تغییر موجود باشد و البته برخی از آنها ممکن است رو به بالا و برخی رو به پایین باشند. از طرفی، ممکن است هیچ نقطه تغییر معنی دار در سری زمانی نباشد. در تحلیل نقطه تغییر، هدف یافتن نقطه ای است که قدر مطلق آماره U_t در آن نقطه، بیشتر از همه نقاط دیگر می باشد. سطح معنی داری هر یک از مقادیر k_t^+ یا k_t^- از رابطه زیر (با جایگذاری هر کدام از آنها به جای آماره k_t) به دست آمد:

$$P = 2 \exp\left(\frac{-6k_t^2}{n^3 + n^2}\right) \quad (7)$$

در این آزمون، هرچه P به عدد صفر نزدیکتر باشد، تغییر ناگهانی در نقطه مورد آزمون بیشتر معنی دار می شود. اگر مقدار P محاسبه شده، کوچکتر از α یا مقدار سطح معنی داری مفروض (در این مطالعه 0.05) شود، وجود نقطه تغییر ناگهانی (پرش یا شکست) در سری، از نظر آماری معنی دار تلقی می گردد. در غیر این صورت، فرض صفر رد و فرض مخالف مورد تأیید واقع می شود. P محاسبه شده، را می توان مقدار ریسک اشتباه در تصمیم گیری (پذیرش یا رد فرض H_0) دانست. برای درک بهتر مطلب، می توان اظهار داشت که برای تعیین سال یا تاریخ تغییر ناگهانی در سری زمانی مورد آزمون، ابتدا همه گزینه های ممکن برای t ، که در آن بتوان توالی یک سری زمانی (با اندازه n) را به دو قسمت تفکیک نمود، در نظر گرفته شد. برای هر یک از گزینه های ممکن، مقدار آماره U_t حساب شد. از بین آنها، فقط یکی که بیشترین مقدار آماره U_t (از نظر قدر مطلق) را داشت، در نظر

جدول ۱- مقادیر k_t و P-value آزمون پتیت در سری‌های ET_0 ماهانه در شش ماهه اول سال در ایستگاه‌های منتخب

 Table 1- The values of the k_t and P of the Pettitt test in monthly ET_0 series for the first six months at the selected stations

ردیف Row	ایستگاه Station	ژانویه Jan		فوریه Feb		مارس March		آوریل Apr		می May		ژوئن June	
		k_t	P-value	k_t	P-value	k_t	P-value	k_t	P-value	k_t	P-value	k_t	P-value
1	اردبیل Ardebil	122	0.057	132	0.031	155	0.007	56	0.794	82	0.374	68	0.592
2	اسلام‌آباد غرب EslamabadGharb	138	0.007	120	0.027	186	0.000	108	0.064	98	0.117	150	0.002
3	ارومیه Urmia	272	0.000	293	0.000	314	0.000	283	0.000	282	0.000	298	0.000
4	اهر Ahar	82	0.324	147	0.006	165	0.001	61	0.658	82	0.326	112	0.078
5	بیجار Bijar	87	0.165	112	0.035	169	0.000	106	0.052	67	0.432	106	0.050
6	پارس‌آباد Parsabad	116	0.058	81	0.343	100	0.141	93	0.196	80	0.345	94	0.202
7	پیرانشهر Piranshahr	104	0.081	144	0.003	190	0.000	112	0.051	92	0.157	136	0.010
8	تبریز Tabriz	250	0.000	284	0.000	312	0.000	243	0.000	252	0.000	282	0.000
9	تکاب Takab	128	0.030	155	0.003	189	0.000	70	0.513	86	0.283	62	0.653
10	جلفا Jolfa	86	0.270	95	0.183	160	0.002	107	0.097	96	0.173	98	0.161
11	خلخال Khalkhal	154	0.002	174	0.000	182	0.000	140	0.007	148	0.003	144	0.004
12	خدابنده Khodabandeh	50	0.250	34	0.680	52	0.216	34	0.674	36	0.614	58	0.130
13	خرمدره Khorramdareh	0.81	0.338	129	0.025	183	0.000	89	0.247	63	0.640	69	0.527
14	خوی Khoy	112	0.101	150	0.009	224	0.000	202	0.000	176	0.001	226	0.000
15	روانسر Ravansar	70	0.318	70	0.315	140	0.001	48	0.742	58	0.521	70	0.309
16	زرینه‌آباتو Zarineabato	106	0.022	113	0.0۱۱	131	0.001	80	0.145	74	0.205	126	0.003
17	زنجان Zanjan	149	0.038	189	0.003	249	0.000	187	0.003	185	0.003	169	0.012
18	سراب Sarab	82	0.264	136	0.007	170	0.000	104	0.084	104	0.084	146	0.004
19	سرارود کرمانشاه Sararud Kermanshah	289	0.000	241	0.000	273	0.000	199	0.004	231	0.001	259	0.000
20	سرپل ذهاب SarpolZohab	158	0.002	149	0.004	187	0.000	160	0.002	101	0.131	115	0.059
21	سردشت Sardasht	57	0.098	73	0.012	57	0.095	38	0.479	26	0.863	35	0.582
22	سقز Saghez	143	0.024	189	0.001	247	0.000	171	0.002	133	0.043	228	0.000
23	سنندج Sanandaj	192	0.003	196	0.002	283	0.000	186	0.005	168	0.011	266	0.000
24	سهند Sahand	31	0.711	31	0.713	49	0.212	40	0.425	40	0.414	61	0.064

25	قروه Ghorveh	56	0.506	75	0.194	137	0.000	84	0.112	69	0.274	28	0.988
26	کنگاور Kangavar	82	0.262	116	0.039	188	0.000	98	0.117	84	0.245	108	0.070
27	کرمانشاه Kermanshah	246	0.000	233	0.001	295	0.000	178	0.017	202	0.004	272	0.000
28	ماکو Makoo	73	0.460	152	0.003	190	0.000	82	0.324	68	0.545	148	0.006
29	مراغه Maragheh	174	0.003	203	0.000	249	0.000	204	0.000	217	0.000	240	0.000
30	مریوان Marivan	49	0.515	75	0.110	107	0.004	76	0.096	60	0.280	59	0.303
31	مشکین شهر Meshkinshahr	66	0.033	45	0.284	51	0.170	36	0.540	64	0.041	58	0.087
32	ملایر Malayer	59	0.315	51	0.468	108	0.003	77	0.089	81	0.063	87	0.036
33	مهاباد Mahabad	118	0.069	174	0.001	230	0.000	216	0.000	120	0.063	186	0.001
34	میانه Mianeh	72	0.401	114	0.041	170	0.001	86	0.218	50	0.803	128	0.016
35	نهایوند Nahavand	44	0.321	41	0.392	63	0.049	56	0.107	52	0.163	67	0.028
36	همدان Hamedan	145	0.085	213	0.002	297	0.000	221	0.001	201	0.004	293	0.000

ماه ژوئن در سرارود کرمانشاه مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که نقطه پرش در ایستگاه سرارود کرمانشاه در ماه ژانویه (۱۹۹۴) و در ماه‌های فوریه، مارس و ژوئن در سال ۱۹۹۸، در ماه سپتامبر (۲۰۰۲) و در ماه دسامبر (۱۹۹۹) اتفاق افتاده است، همچنین نقطه پرش ناگهانی در ماه می در ایستگاه تبریز (سال ۱۹۹۵) و در ایستگاه مراغه در ماه آوریل (۱۹۹۸)، در ماه‌های ژوئیه و اوت (۲۰۰۱) و ماه نوامبر (۲۰۰۰) و در ایستگاه کرمانشاه نقطه تغییر در ماه اکتبر (در سال ۱۹۹۴) اتفاق افتاده است. این نتیجه با یافته‌های قاسمی (۶) که در آن افزایش ناگهانی در میانگین دمای هوای ایران را با روش پتیت گزارش نموده همسو می‌باشد. افزایش ناگهانی در ET_0 ایستگاه‌های منتخب در مطالعه فعلی با تحقیق قاسمی (۶) که در آن افزایش دمای هوا را در ایران در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۶۱ حدود ۰/۱ تا ۰/۴ درجه سلسیوس گزارش کرده، مطابقت می‌کند.

در مقیاس سالانه نیز وضعیت مشابهی حاکم بود. شکل ۴ نمودار تغییرات جهشی را در مقیاس سالانه برای ET_0 ایستگاه‌های ارومیه، اسلام‌آباد غرب، تبریز، خلخال، خوی و سرارود کرمانشاه نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، از کل ۳۶ ایستگاه تعداد ۲۹ ایستگاه (معادل ۸۰/۵۵ درصد) تغییر ناگهانی معنی‌دار در سطح ۵ درصد در سری مقادیر ET_0 داشتند و به‌طوری‌که قبلاً اشاره شد، از ایستگاه‌های مذکور، بیشترین تغییر ناگهانی مربوط به سرارود کرمانشاه بود که میانگین مقادیر ET_0 قبل و بعد از تاریخ تغییر (۱۹۹۹) به‌ترتیب، ۱۴۳۸ و ۱۶۷۳ میلی‌متر در سال بود که اختلافی معادل ۲۳۵ میلی‌متر در سال (۱۶ درصد) را در بر دارد.

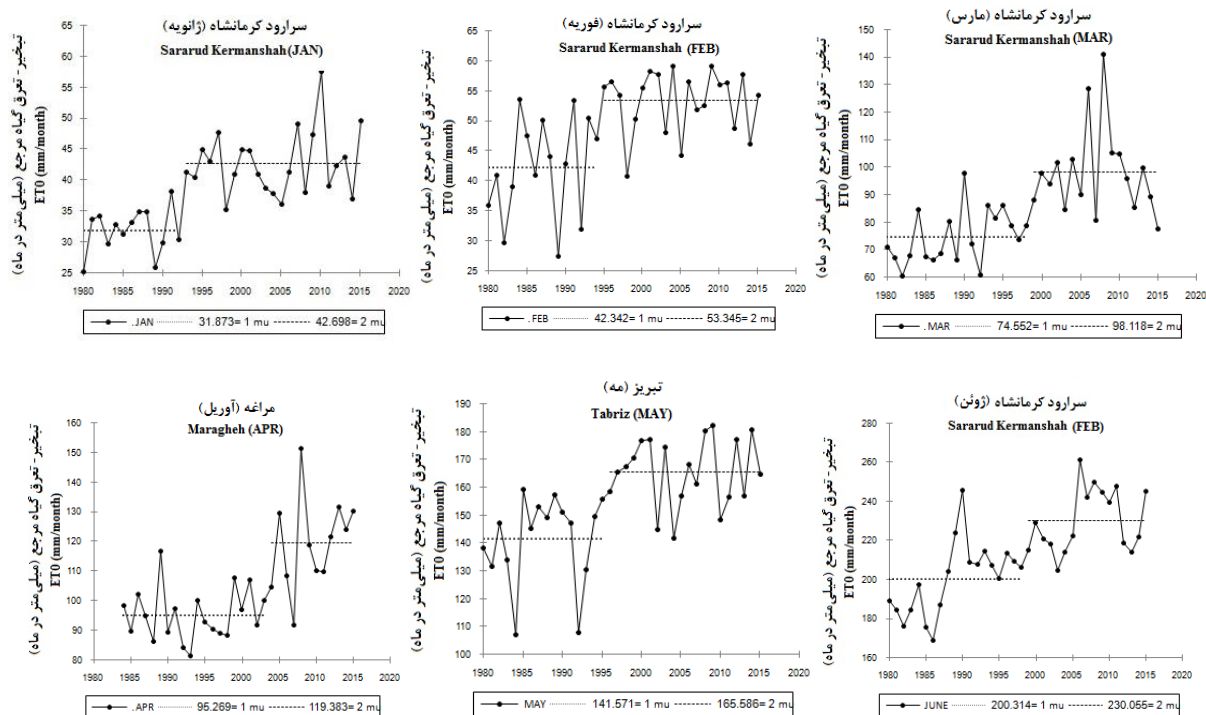
پس از آن بیشترین تعداد ایستگاه با تغییر ناگهانی به ماه اوت تعلق داشت. در اوت، تعداد ۲۸ ایستگاه (معادل ۷۷/۷۷ درصد) تغییرات ناگهانی در ET_0 داشتند، که شدیدترین آن در مراغه مشاهده شد. در مراغه اختلاف میانگین ET_0 قبل و بعد از سال تغییر، معادل ۴۴/۹۱ میلی‌متر بود. همچنین بیشترین اختلاف میانگین ET_0 قبل و بعد از سال تغییر متعلق به ماه سپتامبر بوده که معادل ۴۷/۷۵ میلی‌متر (ایستگاه سرارود کرمانشاه) به‌دست آمد. از طرف دیگر، همانگونه که از جدول ۳ قابل مشاهده است، ایستگاه سرارود کرمانشاه در اکثر ماه‌های سال بیشترین میزان جهش ناگهانی را تجربه کرده است.

در مقیاس سالانه، تعداد زیادی از ایستگاه‌ها (۲۹ ایستگاه) در سال ۱۹۹۸ و تعدادی نیز در سال ۱۹۹۵ جهش ناگهانی در ET_0 داشتند (جدول ۲). بیشترین جهش در بین سری‌ها از آن سرارود کرمانشاه بود. میانگین ET_0 در این ایستگاه قبل از سال ۱۹۹۹ معادل ۱۴۳۸ میلی‌متر و بعد از این سال حدود ۱۶۷۳ میلی‌متر بود. به عبارت بهتر، در سال مذکور ۲۳۵ میلی‌متر به مقدار ET_0 سالانه در ایستگاه مذکور اضافه شده است. دلیل این کار، ممکن است به افزایش درجه حرارت هوا و/یا افزایش سرعت باد یا ترکیبی از آن‌ها در ایستگاه نسبت داده شود.

شکل‌های ۲ و ۳ نمودار تغییرات سری ماهانه برخی از ایستگاه‌هایی که بیشترین افزایش ناگهانی ET_0 ماهانه را داشته‌اند، نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل‌ها می‌توان دریافت در همه ایستگاه‌ها، تغییرات پرشی رو به بالا است و بیشترین میزان ET_0 در ماه ژوئیه در ایستگاه مراغه، پس از آن در ماه اوت در همان ایستگاه و سپس در

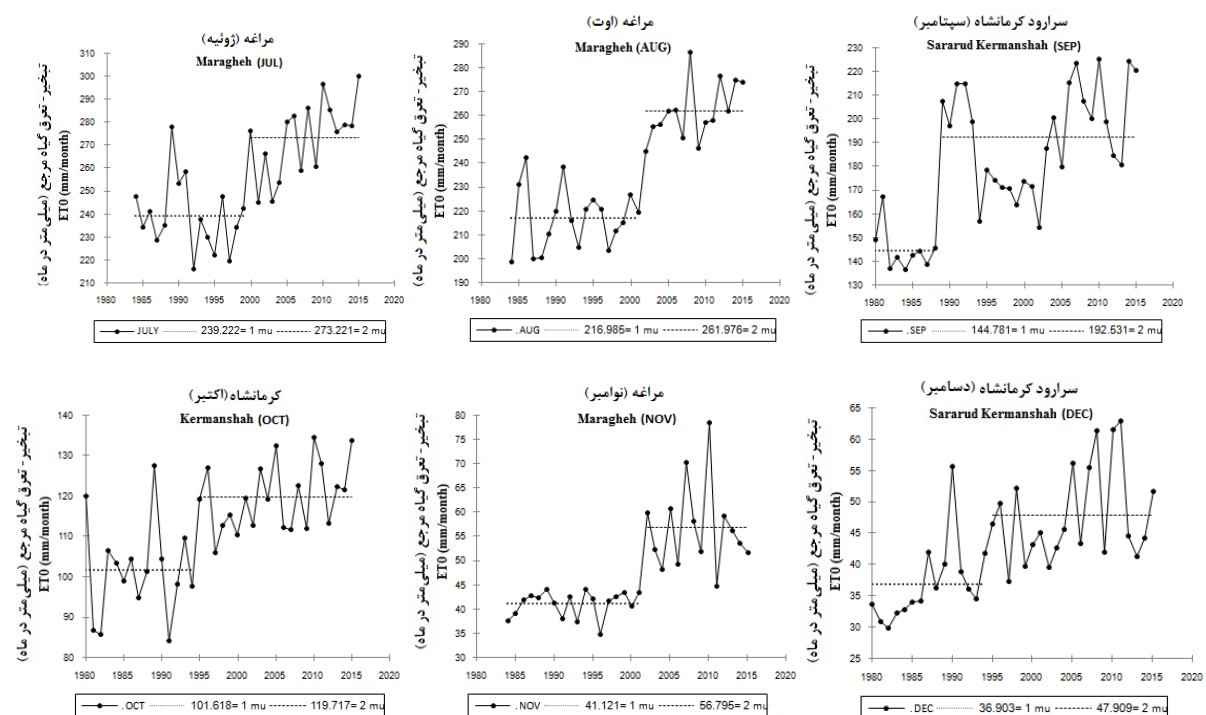
جدول ۲- خلاصه نتایج آزمون پتیت، سال تغییر و میانگین زیر سری های ET_0 ماهانه قبل و بعد از تغییر ناگهانی
 Table 2- Summaries of the Pettitt test output, change point, and the means of monthly ET_0 subseries prior and after the sudden change date

ماه Month	تعداد ایستگاه های با تغییر ناگهانی Number of stations with sudden change	درصد Percent	ایستگاه با بیشترین تغییر Station with highest change	سال تغییر The year of change	میانگین ET_0 قبل از تغییر (میلی متر در ماه) Mean ET_0 before change (mm/month)	میانگین ET_0 بعد از تغییر (میلی متر در ماه) Mean ET_0 after change (mm/month)	اختلاف میانگین ET_0 قبل و بعد از تغییر (میلی متر) Difference of ET_0 before and after change (mm/month)
ژانویه Jan.	14	38.88	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1992	31.873	42.698	10.825
فوریه Feb.	26	72.22	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1994	42.342	53.345	11.003
مارس Mar.	31	86.11	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1998	74.552	98.118	23.566
آوریل Apr.	13	36.11	مراغه Maragheh	2003	95.269	119.383	24.114
می May	12	33.33	مراغه Maragheh	1998	136.686	164.645	27.959
ژوئن June	21	58.33	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1998	200.314	230.65	30.336
ژوئیه July	20	55.55	مراغه Maragheh	1999	239.222	273.221	33.999
اوت Aug.	28	77.77	مراغه Maragheh	2001	216.985	261.976	44.991
سپتامبر Sep.	24	66.66	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1988	144.781	192.531	47.75
اکتبر Oct.	19	52.77	کرمانشاه Kermanshah	1994	101.618	119.717	18.099
نوامبر Nov.	8	22.22	مراغه Maragheh	2001	41.121	56.795	15.674
دسامبر Dec.	13	36.11	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1994	36.903	47.909	11.006
سالانه Yearly	29	80.55	سرارود کرمانشاه Saraud Kermanshah	1999	1438	1673	235



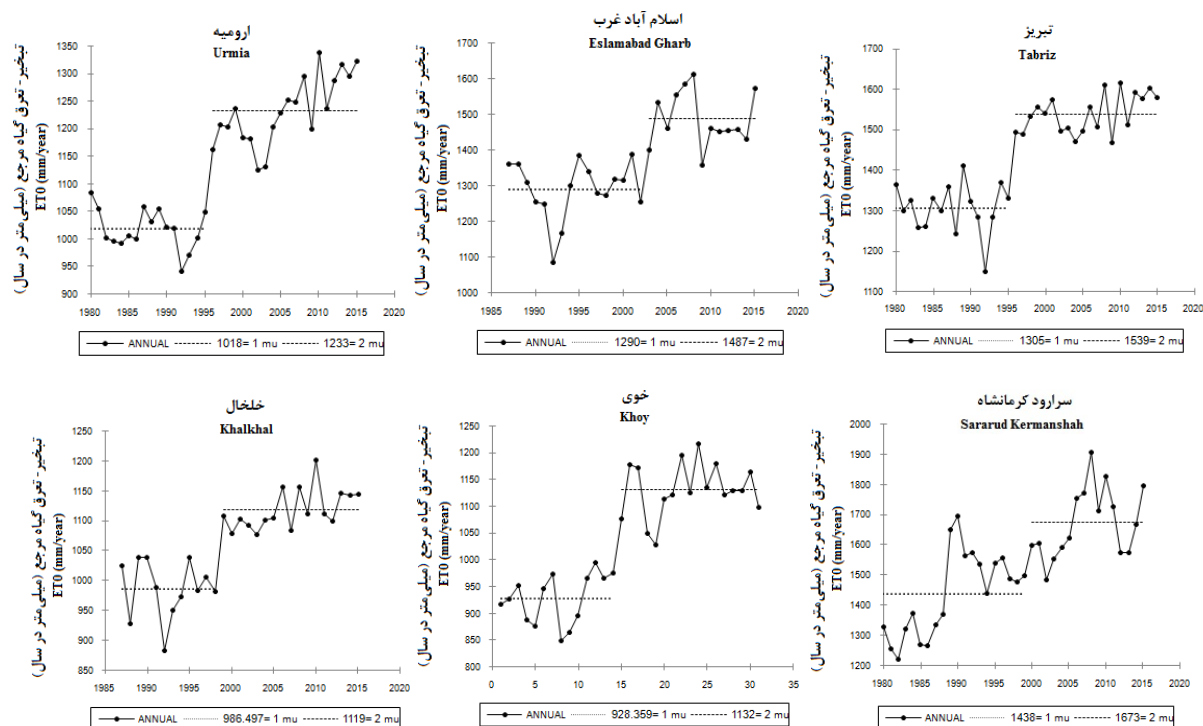
شکل ۲- جهش ناگهانی در ET₀ ماهانه در سرارود کرمانشاه (ژانویه، فوریه، مارس و ژوئن)، مراغه (آوریل) و تبریز (می)

Figure 2- Sudden jump in monthly ET₀ in Sararoude-Kermanshah (January, February, March and June), Maragheh (April) and Tabriz (May)



شکل ۳- جهش ناگهانی ET₀ ماهانه در مراغه (ماه‌های اوت، ژوئیه و نوامبر) و سرارود کرمانشاه (دسامبر)

Figure 3- Sudden jump in monthly ET₀ in Maragheh (August, July and November) and Sararoud-Kermanshah (December)



شکل ۴- جهش ناگهانی در ET₀ سالانه ایستگاه‌های ارومیه، اسلام‌آبادغرب، تبریز، خلخال، خوی و سرارودکرمانشاه
Figure 4- Sudden jump in annual ET₀ in the stations Urmia, Eslamabad-Gharb, Tabriz, Khalkhal, Khoy, and Sararoud-Kermanshah

همزمان عوامل متعدد هواشناسی (مانند دمای هوا، کمبود فشار بخار اشباع، سرعت باد) است با این حال کاهش سرعت باد موجب زیاد شدن میزان مقاومت سطحی انتشار بخار آب روی روزنه‌های برگ های گیاه شده و در نتیجه سبب کاهش شدت تبخیر و ترقی می‌شود. در جدول ۳ هویت سال تغییر دقیق جهش ناگهانی برای مقادیر ET₀ (در دو مقیاس ماهانه و سالانه) در ایستگاه‌های مورد مطالعه (در سطح ۵ درصد) نیز نشان داده شده است. در مقیاس ماهانه، نتایج نشان داد که تعداد زیادی از ایستگاه‌ها در سال ۱۹۹۵ جهش ناگهانی در ET₀ داشتند. در فوریه و می، اکثر ایستگاه‌ها در سال ۱۹۹۸، جهش در ET₀ داشتند. در آوریل، تعدادی از ایستگاه‌ها در سال ۱۹۹۶ و برخی در سال ۱۹۹۸، تغییر ناگهانی داشتند. در ماه‌های ژوئن، اوت و سپتامبر سال تغییر ۱۹۹۵ بود. همچنین، در ماه اکتبر سال ۲۰۰۰ شناخته شد و در دو ماه نوامبر و دسامبر جهش ناگهانی در سال ۱۹۹۴ تجربه شده است. مقایسه نتایج تغییر ناگهانی در ET₀ ایستگاه‌های شمال غرب ایران گرچه با یافته‌های محققین دیگر در اکثر نقاط دیگر جهان همخوانی دارد، ولی در برخی نقاط جهان تغییرات ET₀ و/یا تبخیر از تحت تبخیر کاهش گزارش شده که با روند افزایشی دما مطابقت ندارد. در مطالعه فعلی نیز معلوم شد که سری‌های زمانی ET₀ در دو ایستگاه سهند و پارس‌آباد تغییرات ناگهانی رو به پایین داشتند که با جهت تغییر در سایر ایستگاه‌های منتخب در منطقه

شکل ۵ نیز نمودار تغییرات جهشی را در مقیاس سالانه برای ET₀ ایستگاه‌های سقز، سنندج، کنگاور، کرمانشاه، مراغه و مهاباد نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، همه ایستگاه‌ها (بجز سهند و پارس‌آباد) تغییر ناگهانی (پرش به بالا) معنی‌دار داشتند. این نشان‌دهنده حقیقتی است که در آن میزان ET₀ سالانه در منطقه شمال غرب کشور به‌طور ناگهانی افزایش داشته است. از ۳۶ ایستگاه مورد مطالعه در ۲۹ مورد، این تغییر در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و در شش مورد دیگر (با اینکه افزایش در جهت رو به بالا بوده) تغییر ناگهانی در ET₀ سالانه در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود.

همانگونه که اشاره شد، در دو ایستگاه سهند و پارس‌آباد تغییر ناگهانی در سری ET₀ متفاوت با سایر ایستگاه‌ها بود و در دو ایستگاه ذکر شده تغییرات ET₀ در دوره دوم با حالت کاهشی همراه بوده که در شکل ۶ نشان داده شده است. برای بررسی علت آن نمودار سری زمانی هر یک از پارامترهای مؤثر بر ET₀ رسم شد و مشخص شد که در این دو ایستگاه، نمودار سرعت باد از روند کاهشی برخوردار بود. شکل ۷ روند تغییرات پارامتر سرعت باد را در دو ایستگاه سهند (شکل ۷ سمت راست) و پارس‌آباد (شکل ۷ سمت چپ) نشان می‌دهد. به طوری که از این شکل می‌توان مشاهده کرد، علی‌رغم نوسانات سرعت باد در هر دو ایستگاه خط روند این متغیر سیر نزولی را نشان می‌دهد. بنظر می‌رسد، کاهش ET₀ در این دو ایستگاه، گرچه معلول اثر

ایستگاه‌های منتخب در نیمه غربی ایران روند صعودی را با روش مان-کندال گزارش کردند، تطبیق می‌کند. در تحقیق لیو و همکاران (۱۷) تغییر ناگهانی در ۶۳ درصد ایستگاه‌های منتخب در چین مابین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۲ اتفاق افتاده است، که گرچه جهش ناگهانی در سری‌های زمانی ET_0 چین نیز تایید شده است، ولی سال نظیر تغییرات جهشی با یافته‌های مطالعه حاضر در تناقض می‌باشد.

همسو نبود. بنظر می‌رسد علت آن مربوط به شرایط محلی مانند توپوگرافی محل یا عوامل انسانی مانند تغییر در کاربری زمین‌ها، گسترش شهرسازی و توسعه کارخانجات باشد. با این حال، مطالعه گسترده‌تر دیگری لازم است تا دلیل اصلی این موضوع روشن شود. تناقض افزایش دمای هوا، همزمان با کاهش مقدار تبخیر، در گزارش جاجاریا و همکاران (۹) در هند نیز دیده شده است. همچنین نتایج مطالعه حاضر، با یافته‌های طبری و همکاران (۳۰) که برای ۷۰ درصد



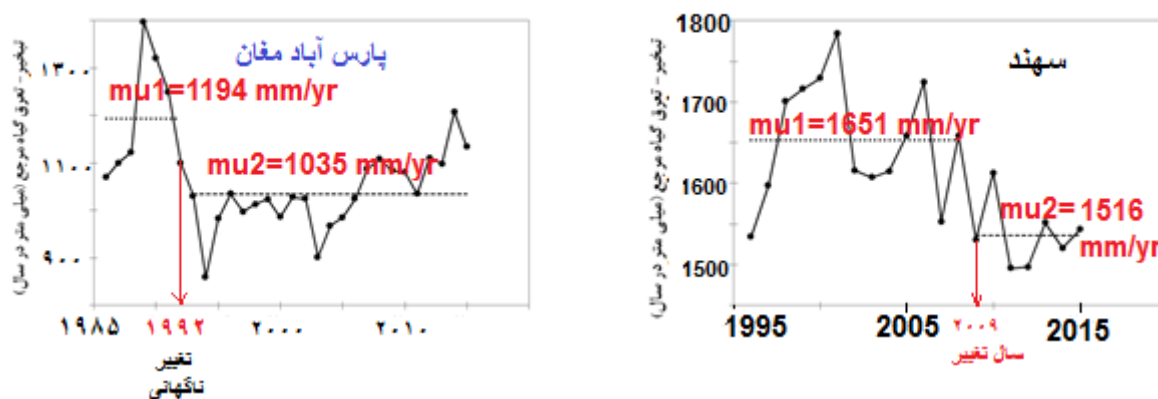
شکل ۵- جهش ناگهانی در ET_0 سالانه ایستگاه‌های سقز، سنندج، کنگاور، کرمانشاه، مراغه و مهاباد

Figure 5- Sudden jump in annual ET_0 in the stations Sagez, Sanandaj, Kangavar, Kermanshah, Maragheh and Mahabad

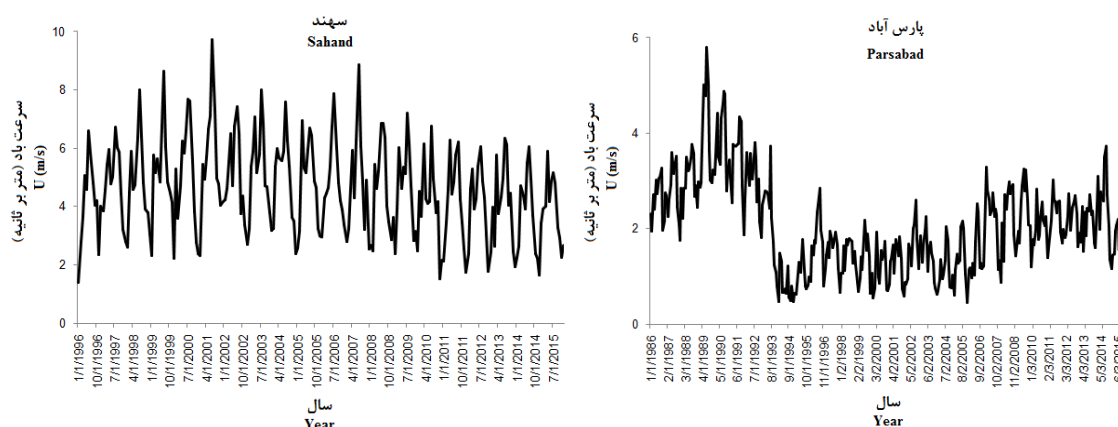
جدول ۳- هویت سال تغییر ناگهانی در ET₀ ماهانه و سالانه ایستگاه‌های منتخب در شمال غرب ایران

 Table 3- The identity of the year that sudden change occurred in its monthly and annual ET₀ in the selected stations in NW of Iran

ایستگاه Station	ژانویه January	فوریه February	مارس March	آوریل April	می May	ژوئن June	ژوئیه July	اوت August	سپتامبر September	اکتبر October	نوامبر November	دسامبر December	سالانه Yearly
اردبیل Ardebil	-	1998	1997	-	-	-	-	1997	-	-	-	-	1996
اسلام‌آباد غرب Eslamabad Gharb	2005	2000	1999	-	-	2000	2002	2002	2002	2002	-	2003	2002
ارومیه Urmia	1995	1996	1997	1996	1995	1995	1996	1995	1995	1995	1994	1994	1995
اهر Ahar	-	1997	1996	-	-	-	-	1995	-	-	-	-	1998
بیجار Bijar	-	1993	1998	-	-	1995	-	1994	-	-	-	-	1995
پارس‌آباد Parsabad	-	-	-	-	-	-	-	-	1991	-	-	-	1992
پیرانشهر Piranshahr	-	1998	1998	-	-	2000	2003	1999	-	-	-	-	1998
تبریز Tabriz	1995	1993	1997	1996	1995	1995	1995	1995	1995	1994	1994	1994	1995
تکاب Takab	1995	1998	1998	-	-	-	1992	-	-	-	-	-	-
جلفا Jolfa	-	-	1997	-	-	-	-	-	2002	-	2001	-	2005
خلخال Khalkhal	1999	1998	1998	1998	1998	1998	1999	2002	2000	2000	-	-	1998
خدابنده Khodabandeh	-	-	-	-	-	-	-	2004	2006	-	-	-	-
خرمدره Khorramdareh	-	1996	1998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
خوی Khoy	-	1998	1997	1999	1998	1998	1998	1998	1998	1994	1997	1997	1998
روانسر Ravansar	-	-	1998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
زرینه اباتو Zarineabato	1996	1996	1998	-	-	1997	1996	1996	1996	1996	-	-	1997
زنجان Zanjan	1994	1998	1998	1996	1996	1996	-	1994	1995	1994	-	1993	1996
سراب Sarab	-	1998	2000	-	-	1998	2004	1994	1996	-	-	-	1998
سرارود کرمانشاه SararudKermanshah	1992	1994	1998	1998	1998	1998	1988	1988	1988	2002	1987	1994	1999
سرپل ذهاب SarpolZohab	2000	2000	2000	2003	-	-	-	2000	2000	2000	-	2004	2005
سردشت Sardasht	-	2008	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
سقز Saghez	1994	1998	1998	1996	1998	1995	1998	1998	1995	1995	-	1994	1998
سنندج Sanandaj	1995	1995	1998	1997	1995	1995	1995	1995	1995	1995	-	1995	1995
سهند Sahand	-	-	-	-	-	-	-	2008	2007	2005	2010	2010	2008
قروه Ghorveh	-	-	1998	-	-	-	-	-	2000	-	-	-	-
کنگاور Kangavar	-	1998	1999	-	-	-	2001	2001	2001	2000	-	-	2001
کرمانشاه Kermanshah	1993	1994	1998	1995	1995	1995	1994	1994	1994	1994	1994	1993	1994
ماکو Makoo	1997	1997	-	-	-	1995	2004	1995	1995	1996	-	-	1996
مراغه Maragheh	1995	2000	2000	2003	1998	1999	1999	2001	2001	2000	2001	2000	1999
مریوان Marivan	-	-	1998	-	-	-	-	-	-	-	-	1997	-
مشکین‌شهر Meshkinshahr	2001	-	-	-	2007	-	-	2005	-	-	-	-	2005
ملایر Malayer	-	-	1999	-	-	2006	2006	2006	-	-	-	-	2006
مهاباد Mahabad	-	1998	1998	1998	-	2004	2005	1999	2000	2000	-	-	1998
میانه Mianeh	-	1993	1998	-	-	1995	2005	1993	-	-	-	-	1994
نهادوند Nahavand	-	-	2000	-	-	2000	-	1999	1999	1999	-	-	1999
همدان Hamedan	-	1996	1998	1998	1998	1998	1997	1998	1997	1998	-	-	1997



شکل ۶- جهش ناگهانی در ET_0 سالانه ایستگاه‌های سهند (سمت راست) و پارس‌آباد (سمت چپ)
Figure 6- Sudden jump in annual ET_0 in the stations Sahand (right) and Parsabad (left)



شکل ۷- سری زمانی نظیر سرعت باد در ایستگاه‌های سهند (سمت راست) و پارس‌آباد (سمت چپ)
Figure 7- Time series of wind speed in the stations Sahand(right) and Parsabad (left)

پس از آن متعلق به مراغه و کرمانشاه بود. سال تغییر ناگهانی ET_0 (در قریب به اتفاق ایستگاه‌ها) متعلق به دهه ۱۹۹۰ بود. بیشترین فراوانی تغییر ناگهانی ET_0 برای ماه ژانویه در سال ۱۹۹۵ مشاهده شد. این تغییر در ماه فوریه در سال ۱۹۹۸، ماه آوریل در سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۸، ماه می در سال ۱۹۹۸، ماه ژوئن در سال ۱۹۹۵ (و در برخی ایستگاه‌ها در سال ۱۹۹۸) اتفاق افتاده است. جهش ناگهانی در ET_0 ماه اوت در سال ۱۹۹۵، ماه سپتامبر در سال ۱۹۹۵، ماه اکتبر در سال ۲۰۰۰، ماه نوامبر در سال ۱۹۹۴، ماه دسامبر در سال ۱۹۹۴ تجربه شده است. در مقیاس سالانه، اکثر ایستگاه‌ها تغییر ناگهانی رو به بالا را در سال ۱۹۹۸ و برخی دیگر در سال ۱۹۹۵ داشتند.

در حالت کلی، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار پارامتر ET_0 در شمال غرب کشور افزایش ناگهانی داشته است. پر واضح است که این جهش ناگهانی در ET_0 موجب افزایش تقاضا در آب مصرفی گیاهان می‌گردد. بنابراین، می‌توان اظهار داشت که اثر تغییر اقلیم در شمال غرب ایران بصورت جهش رو به بالا در ET_0 متجلی شده است. یعنی

شاید بتوان علت این عدم همخوانی را فاصله زیاد بین دو منطقه مورد مطالعه عنوان کرد. بنا به گزارش لئو و ژانگ (۱۸)، گرچه مقدار سالانه ET_0 در اکثر ایستگاه‌های واقع در شمال شرق چین از ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۳ با روند کاهشی همراه بوده است، ولی از سال ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۰ ET_0 روند افزایشی داشته است. در حالی که در مطالعه حاضر، ET_0 در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایش ناگهانی داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمون تغییر ناگهانی (زمان پرش ناگهانی در سری زمانی) ET_0 با روش پتیت نشان داد که هم در مقیاس سالانه و هم در مقیاس ماهانه غالب ایستگاه‌ها یک افزایش ناگهانی در ET_0 داشته‌اند. در ایستگاه ارومیه، جهش ناگهانی در ET_0 همه ماه‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. جهت پرش این پارامتر در همه ماه‌ها و سال رو به بالا بوده است. همچنین، بیشترین میزان جهش ناگهانی پارامتر مذکور (در اکثر ماه‌ها) متعلق به ایستگاه سرارود کرمانشاه و

دشت‌های منطقه شمال غرب ایران محدود گردد. زیرا، این منابع باید در دوره‌های خشکسالی و زمان‌های بحرانی، که آب‌های سطحی کفاف نیازهای ضروری را نمی‌کند، مصرف گردد و برعکس، در سال‌هایی که بارش کافی یا بیش از حد نرمال ۳۰ ساله (دراز مدت) نازل می‌شود، مازاد آب مورد نیاز صرف تغذیه مصنوعی (یا طبیعی) سفره-های آب زیرزمینی (بمنظور جبران مصارف در خشکسالی قبلی) شود در غیر این صورت، ممکن است طبیعت گوشمالی استفاده غیرعقلانی از آب را طوری دهد که باغات سرسبز (با درختان کهنسال فعلی) که برای به بار نشستن آن‌ها چندین نسل زحمت کشیده‌اند، با شتاب بیشتر خشک شده و به وسعت بیابان‌های کشور افزوده می‌شود. بدون تردید، تاوان اشتباه در مدیریت آب، منجر به ایجاد مسائل پیچیده اجتماعی و اقتصادی می‌گردد. بنابراین، لازم است مدیران و تصمیم‌گیران صنعت آب منطقه، به زودی برنامه‌ریزی صحیح برای استفاده پایدار از منابع آب منطقه را عملی کنند، تا شاید بتوان تا حدودی از بروز این قبیل مشکلات جلوگیری کرد.

سیاسگزاری

از سازمان هواشناسی کل کشور که داده‌های مورد نیاز این مطالعه را در اختیار قرار دادند، تشکر می‌شود. ضمناً از داوران محترم که نکات سازنده‌ای در جهت بهبود کیفیت این مقاله ارائه کردند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

نیاز آبی همه گیاهان (اعم از زراعی یا باغی، درختان مثمره یا غیرمثمره) زیاد شده و بنابراین، لازم است سطح زیرکشت گیاهان آبدوست (مانند برنج، یونجه، چمن‌کاری، هندوانه و امثال آن‌ها) با اتخاذ تدابیر عملی کم شده و محدودیت‌های عملی برای کاهش مصرف آب (به‌ویژه برای گیاهان با نیاز آبی بیشتر) اعمال گردد. بنظر می‌رسد که امروزه احداث باغات جدید یا افزایش سطح زیرکشت گیاهان مختلف (آبی) در منطقه غیرقابل توجیه است. در این مقطع زمانی حساس، که بارش‌های منطقه روند کاهشی دارند و رواناب‌های سطحی نیز به‌طور آشکار کم شده است، کشاورزان و باغداران برای تأمین آب بیشتر (به‌دلیل ارزان بودن قیمت آن) باهمدیگر به رقابت برخاسته‌اند. این امر در سال‌های اخیر، موجب افت شدید تراز آب زیر زمینی در اکثر دشت‌های کشور (ازجمله در غرب ایران) شده است. حتی در برخی دشت‌ها این امر منجر به نشست زمین و در نتیجه از بین رفتن سفره آب زیرزمینی شده است. در سال‌های اخیر، بخش زیادی از اراضی ملی با کاشت نهال‌های جوان و قرار دادن تانکرهای آب در سطح زمین مورد تملک سودجویان (زمین‌خواران) به‌صورت قانونی (یا غیرقانونی) شده است. در ایران، تغییر در برخی قوانین مرتبط با کاربری اراضی که منجر به هرچه بیشتر شدن مصرف آب شده کاملاً ضروری است. امروزه تغییر کاربری زمین‌های مرتعی و جنگلی (اراضی ملی) توسط افراد حقیقی یا حقوقی به‌دلیل مختلف ازجمله کمبود آب، افزایش جمعیت، افزایش شدت تبخیر فاقد هرگونه توجیه علمی است. توصیه می‌شود که پمپاژ آب زیرزمینی عملاً در

منابع

- 1- Ahmadi F., Nazeri Tahroudi M., Mirabbasi R., Khalili K., and Jhajharia D. 2017. Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. *Meteorological Applications*.
- 2- Bandyopadhyay A., Bhadra A., Raghuwanshi N.S., and Singh R. 2009. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(5): 508-515.
- 3- Bassiouni M., and Oki D.S. 2012. Trends and shifts in streamflow in Hawai'i, 1913–2008. *Hydrological Processes*.
- 4- Bers A.V., Momo F., Schloss I.R., and Abele D. 2013. Analysis of trends and sudden changes in long-term environmental data from King George Island (Antarctica): relationships between global climatic oscillations and local system response. *Climate Change*, 116: 789-803.
- 5- Dinpashoh Y., Jhajharia D., Fakheri-Fard A., Singh V.P., and Kahya E. 2011. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. *Journal of Hydrology*, 399: 422 – 433.
- 6- Ghasemi A.R. 2015. Changes and trends in maximum, minimum and mean temperature series in Iran. *Atmospheric Science Letters*, 16: 366-372.
- 7- Hadi S.J., and Tombul M. 2018. Long-term spatiotemporal trend analysis of precipitation and temperature over Turkey. *Meteorological Applications*.
- 8- Huo Z., Dai X., Feng S., Kang S., and Huang G. 2013. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *Journal of Hydrology*, 492: 24–34.
- 9- Jhajharia D., Dinpashoh Y., Kahya E., Singh V.P., and Fakheri-Fard A. 2012. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. *Hydrological Processes*, 26: 421- 435.
- 10- Jiang C., Nie Z., Mu X., Wang F., and Liu W. 2016. Potential evapotranspiration change and its attribution in the Qinling Mountains and surrounding area, China, during 1960–2012. *Journal of Water and Climate Change*, 7(3): 526-541.
- 11- Karabörk M.C., Kahya E., and Kömüscü Ü. Analysis of Turkish precipitation data: homogeneity and the Southern Oscillation forcings on frequency distributions. *Hydrological Processes*, 21: 3203-3210.

- 12- Khosravi H., Sajedi-Hosseini F., Nasrollahi M., and Gharechaei H.R. 2017. Trend analysis and detection of precipitation fluctuations in arid and semi-arid regions. *Desert* 22(1): 77-84.
- 13- Kiely G. 1999. Climate change in Ireland from precipitation and streamflows observations. *Advances in Water Resources*, 23:141-151.
- 14- Kiely G., Albertson J.D., and Parlange M.B. 1998. Recent trends in diurnal variation of precipitation at Valencia on the west coast of Ireland. *Journal of Hydrology*, 207: 270-279.
- 15- Kundzewicz Z.W., and Robson A.J. 2004. Change detection in hydrological records - a review of the methodology. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1): 7-19.
- 16- Li Q., Wei X., Zhang M., Liu W., Giles-Hansen K., and Wang Y. 2018. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed. *Journal of Hydrology*, (Accepted).
- 17- Liu L., Xu Z.X., and Huang J.X. 2012. Spatio-temporal variation and abrupt changes for major climate variables in the Taihu Basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 26: 777-791.
- 18- Liu X., and Zhang D. 2013. Trend analysis of reference evapotranspiration in Northwest China: The roles of changing wind speed and surface air temperature. *Hydrological Processes*, 27: 3941-3948.
- 19- Lv M.Q., Chen J.L., Mirza Z.A., Chen C.D., Wen Z.F., Jiang Y., Ma M.H., and Wu S.J. 2016. Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in the Three Gorges Reservoir area during 1960-2013. *International Journal of Climatology*, 36: 4497-4511.
- 20- Ma X., Zhang L., Mc Vicar T., Chille B., and Gao P. 2007. Analysis of the impact of conservation measures on stream flow regime in catchments of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 21: 2124-2134.
- 21- Memarian H., Balasundram S., Talib J., Sood A., and Abbaspour K. 2012. Trend analysis of water discharge and sediment load during the past three decades of development in the Langat basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 57(6): 1207-1222.
- 22- Nazeri Tahroudi M., Ahmadi F., and Khalili K. 2017. Evaluation the Trend and Trend Change Point of Urmia Lake Basin Precipitation. *Journal of Water and Soil*, 31(2): 664-659. (In Farsi with English Extended Abstract)
- 23- Nouri M., Homaei M., and Bannayan M. 2017. Quantitative trend, sensitivity and contribution analyses of reference evapotranspiration in some arid environments under climate change. *Water Resources Management*, 31: 2207-2224.
- 24- Pandey B.K., and Khare D. 2018. Identification of trend in long term precipitation and reference evapotranspiration over Narmada river basin (India). *Global and Planetary Change*, 161: 172-182.
- 25- Pettitt A.N. 1979. A non-parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28: 126-135.
- 26- Pingale S.M., Khare D., Jat M.K., and Adamowski J. 2016. Trend analysis of climatic variables in an arid and semi-arid region of the Ajmer District, Rajasthan, India. *Journal of Water and Land Development*, 28: 3-18.
- 27- Piticar A., Mihaila D., Lazurca L., Bistricean P., Putuntica A., and Briciu A. 2016. Spatiotemporal distribution of reference evapotranspiration in the Republic of Moldova. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(3-4):1133-1144.
- 28- Shi Z., Xu L., Yang X., Guo H., Dong L., Song A., Zhang X., and Shan N. 2017. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31:257-273.
- 29- Stefanescu V., Stefan S., and Georgescu F. 2014. Spatial distribution of heavy precipitation events in Romania between 1980 and 2009. *Meteorological Applications*, 21(3): 684-694.
- 30- Tabari H., Marofi S., Amini A., Hosseinzadeh P., and Mohammadi K. 2010. Trend analysis of reference evapotranspiration in the western half of Iran. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151:128-136.
- 31- Zhang D., Liu X., and Hong H. 2013. Assessing the effect of climate change on reference evapotranspiration in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(8): 1871-1881.



Impact of Climate Change on Sudden Changes in Potential Evapotranspiration Time Series (Case Study: NW of Iran)

Y. Dinpashoh^{1*} - M. Foroughi²

Received: 12-03-2018

Accepted: 20-06-2018

Introduction: Evapotranspiration is one of the key elements of hydrological cycle. This parameter plays a crucial role in different water related studies such as agricultural water management, environmental energy budget, water balance of watersheds, water reservoirs and water conveyance structures (such as channels, dams, barriers and so on). Increasing greenhouse gases has led to increased atmosphere temperature. Such changes in air temperature and other atmospheric parameters caused some natural hazards in many regions. One of the important parameter impacted by climate change is potential evapotranspiration. Different studies conducted in the recent decade to detect the monotonic trends and abrupt changes in meteorological parameters. Most of them are on trend analysis of meteorological and hydrological parameters. In the recent years, monotonic trend analysis of reference crop evapotranspiration (ET₀) has interested many investigators around the globe. Many investigators attempted to find the possible reasons of trends in ET₀. In many cases, this is accomplished by sensitivity analysis of ET₀ to different meteorological parameters. Other investigators attempted to model ET₀ using the hydrologic time series modeling. Detection of sudden change point in different time series including ET₀ is very important in changing climate. However, in spite of tremendous studies on monotonic trend analysis, it seems that no serious work has been conducted to detect abrupt changes in ET₀ in Iran, especially in west and northwest of Iran. This region has fertile soils and produce an important portion of cereal yields of Iran, thus providing water to agricultural section is crucial under climate change. Therefore, the main objectives of this study were i) estimation of ET₀ values in the selected stations in west and northwest of Iran using the FAO-Penman Monteith method, and ii) detection of significant change points in ET₀ time series using the nonparametric Pettitt test.

Materials and Methods: The 32 synoptic stations were selected in this area for analysis. Data needed for this study were gathered from IRIMO. Meteorological parameters were daily records of maximum air temperature, minimum air temperature, sunshine hour duration, wind speed, and relative humidity. The ET₀ values were estimated using FAO-56 Penman-Monteith model. In order to detect the significant change point the non-parametric, Pettitt test was used. Both monthly and annual time scales were used in analysis. The null hypothesis of test is there is no sudden change point in the time series. We calculated the p-values for time series under test and compared it with significance level (5%). If the calculated p-value was less than the significance level (0.05), then the null hypothesis is rejected, and the alternate hypothesis (i.e. there is a significant sudden change point in the time series) will be accepted.

Results and Discussion: The results showed that around 60% of the monthly time series had significant sudden change points. For instance, Urmia showed significant abrupt changes in ET₀ for all months. Specifically, more than 86 and 78 % of the stations experienced sudden change in ET₀ in March and August, respectively. The strongest abrupt change observed at Maragheh, in which the difference in monthly ET₀ before and after the change point date reached to about 45 mm. It is worth to mention that all detected sudden changes had upward direction. In annual time scale, more than 80 % of the stations showed significant abrupt changes in ET₀. Among all stations, Sararoud- Kermanshah showed a large difference in mean annual ET₀ for the subseries of before and after the change point date which was approximately 235 mm. In annual scale, all sites (except Sahand and Parsabad) experienced upward ET₀ abrupt changes. In order to inspect the reason this change, we plotted different meteorological parameters time series. The results indicated that the wind speed showed negative trends (except for two stations) leading to ET₀ increase. Furthermore, it was found that almost all stations exhibited increasing trends in air temperature. These changes caused an increase in ET₀. The most prominent abrupt change date in ET₀ time series was found for the years from 1995 to 1998. For example, in February, April, May, and June, monthly ET₀ time series suddenly increased in 1998, which were statistically significant ($p < 0.05$). Following the year of 1998, some other monthly ET₀ series showed abrupt change point in 1995 ($p < 0.05$).

1- Associate Professor of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Iran

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

2- Ph.D. Student in Climatology, University of Tabriz, Iran

Conclusions: The sudden change in ET0 was confirmed in west and northwest of Iran. According to the results, ET0 time series (in monthly or annual time scales) exhibited upward sudden changes. Such changes in ET0 time series ring the alarms and decision makers should be, therefore, cautious in management of water resources.

Keywords: Climate Change, Fao-56-PM-Montith, Pettitt Test, West and northwest of Iran



پیش‌بینی رواناب سالانه سد زاینده‌رود و دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شبکه‌های بیزین

پریسا نوره^۱ - عباس روزبهانی^{۲*} - حمید کاردان مقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۱۳

چکیده

در طی چند دهه اخیر در کشور، روند کاهش رواناب مشاهده می‌شود بطوری که بسیاری از مخازن سدها در دوره‌های نرمال نیز با بحران تأمین آب مواجه هستند که عمدتاً به دلیل برداشت‌های بی‌رویه، عدم مدیریت عرضه و تقاضا و خشکسالی می‌باشد. در این پژوهش جهت پیش‌بینی رواناب ورودی به سد زاینده‌رود با رویکرد احتمالاتی شبکه‌ی بیزین ۵ سناریوی کلی طرح‌ریزی شده که براساس آن، رواناب بصورت صریح عددی (یک سناریو)، بازه‌ای (یک سناریو) و پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی (سه سناریو) پیش‌بینی شده است. بدین منظور پارامترهای بارش، رواناب، برف و حجم آب انتقالی از تونل‌های انتقال آب به‌عنوان ورودی به مدل و رواناب ورودی به سد زاینده‌رود به عنوان پیش‌بینی شونده لحاظ شده‌اند که جهت یافتن بهترین ساختار شبکه در این سناریوها الگوهای مختلفی برای ورود این پارامترها به مدل تعریف شده. نتایج مدلسازی شبکه بیزین نشان داد که سناریوی تعریف شده برای پیش‌بینی رواناب ورودی به صورت صریح عددی توانایی خوبی در پیش‌بینی داشته بطوری که در الگوی منتخب ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده ۰/۷۸ بوده است. همچنین از بین سناریوهای پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی هیدرولوژیکی که در آن تقسیم‌بندی رواناب براساس شاخص SDI و میانگین درازمدت و تقسیم‌بندی سایر پارامترها با خوشه‌بندی انجام شده است، در الگوی برتر قادر به پیش‌بینی با دقت ۷۵ درصد می‌باشد اما مدل پیش‌بینی بازه‌ای رواناب دقت خوبی در پیش‌بینی نداشته است. بهره‌گیری از این نتایج امکان برنامه‌ریزی منابع آب را جهت تخصیص بهینه توسط متولیان آب این منطقه فراهم خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی رواناب، خوشه‌بندی، سد زاینده‌رود، شاخص SDI، شبکه‌ی بیزین

مقدمه

ها به دلیل پویایی سیستم‌های هیدرولوژیکی، تصادفی بودن متغیرهای ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، وقوع فرآیندهای حدی و غیره معمولاً با پاسخ غیرخطی در سیستم جهت پیش‌بینی همراه است (۲۰). با مرور سوابق تحقیقاتی مشاهده می‌شود روش‌های مختلفی برای مدلسازی و پیش‌بینی جریان بکار رفته است. آداموفسکی و سان (۲۰۱۰) مدلی تلفیقی از تبدیل موجک و شبکه عصبی را در چند رودخانه غیردائمی در قبرس بکار بردند تا با استفاده از داده‌های میانگین جریان، جریان روزانه را پیش‌بینی کنند که نتایج حاکی از عملکرد خوب مدل تلفیقی مذکور می‌باشد (۳). وان و کنیا (۲۰۱۵) از یک روش هیدرولوژیکی ساده‌ی و یکپارچه به نام "LinRes" برای پیش‌بینی رواناب روزانه در حوضه‌های ساحلی فاقد اندازه‌گیری در جنوب فلوریدا استفاده کردند. نتایج نشان داد که این روش ابزار خوبی برای پیش‌بینی‌های سریع است (۲۶). ولی‌پور (۲۰۱۵) عملکرد مدل‌های سری زمانی ساریما^۴ و آریما^۵ را در پیش‌بینی بلندمدت

با توجه به رشد روزافزون جمعیت و محدودیت منابع آب سطحی در کشور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب از اهمیت برخوردار است. پیش‌بینی‌های بلندمدت و کوتاه مدت جریان رودخانه‌ها مؤلفه‌ی مهمی در مدیریت منابع آب سطحی می‌باشد که می‌تواند در بهینه‌سازی سیستم‌های منابع آب هم چنین برنامه‌ریزی جهت توسعه و یا احیای سیستم به شیوه‌ای پایدار، نقش اساسی را ایفا کند. پیش‌بینی‌های دقیق و قابل اطمینان بخصوص در حوضه‌های نیمه خشک به دلیل ماهیت متناوب بودن جریان‌ها و کمبود آب اهمیت می‌یابد، چرا که با استفاده از آن، با اطمینان از تأمین حقابه‌های زیست محیطی، تخصیص بهینه منابع آب برای بخش‌های مختلف نظیر کشاورزی، شرب، برقایی و... می‌تواند صورت گیرد. پیش‌بینی جریان در رودخانه-

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و دانش آموخته دکترای گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران
(Email: roozbahany@ut.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.v32i3.72084

4- SARIMA
5- ARIMA

ی زاینده‌رود می‌باشد که تدوین یک مدل، جهت برآورد رواناب ورودی با لحاظ عدم قطعیت‌ها حائز اهمیت است. تاکنون مطالعات متعددی جهت پیش‌بینی رواناب ورودی به سد زاینده‌رود انجام شده است که از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعات عراقی نژاد و کارآموز (۱۳۸۴)، ابریشمچی و همکاران (۲۰۰۶) و (۲۰۰۸)، نقدی و موسوی (۱۳۹۲) اشاره نمود (۶، ۱، ۲ و ۱۸).

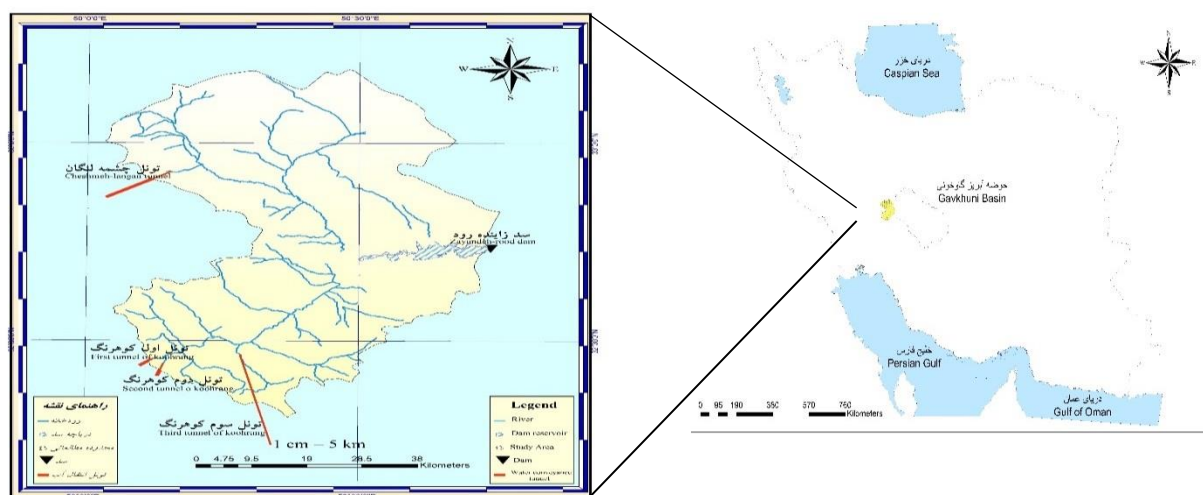
در این پژوهش با استفاده از این رویکرد، پیش‌بینی رواناب ورودی به سد زاینده‌رود به صورت عددی و بازه‌ای و همچنین پیش‌بینی دوره‌ی ترسالی و خشکسالی صورت گرفت. پیش‌بینی دوره‌ی ترسالی و خشکسالی در برنامه‌ریزی بهتر منابع آب جهت بهره‌برداری مطلوب مؤثر خواهد بود بطوری‌که در دوره‌ای که انتظار وقوع خشکسالی محرز شده، اطلاع رسانی به بهره‌برداران محلی انجام شده تا با در نظر داشتن این امر، اتخاذات لازم را در جهت تخفیف اثرات احتمالی ناشی از خشکسالی را در نظر گیرند. همچنین پیش‌بینی این دوره‌ها در برنامه‌ریزی بهتر جهت تأمین حقابه‌های زیست محیطی مؤثر خواهد بود. علاوه بر پیش‌بینی عددی میزان آبدهی ورودی، می‌توان احتمال وقوع دبی را در بازه‌های مختلف جهت مدیریت منابع آبی پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از این تحقیق کمک شایانی به تحلیل و اصلاح سیاست یا منحنی فرمان بهره‌برداری از سد زاینده‌رود جهت تخصیص مناسب به اراضی پایین دست در مقیاس زمانی سالانه خواهد داشت. استفاده از شبکه‌ی بیزین در قالب پیش‌بینی عددی، دوره‌های ترسالی و خشکسالی رواناب در مقیاس سالانه با وجود تعدد پارامترهای پیش‌بینی کننده‌ها، هم چنین تحلیل و استفاده از شاخص‌های خشکسالی جهت پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی به عنوان اصلی‌ترین نوآوری های این پژوهش در مقایسه با سایر مطالعات انجام شده می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

سد چند منظوره زاینده‌رود که در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان بر روی رودخانه زاینده‌رود احداث شده است با اهداف اصلی تولید انرژی برق آبی، کنترل سیلاب‌های فصلی، تنظیم آب کشاورزی مورد نیاز برای اراضی پایین دست و تأمین آب مورد نیاز صنایع مستقر و آب شرب منطقه تأسیس شده است. حوضه‌ی بالادست سد زاینده‌رود با مساحت ۴۲۶۵ کیلومتر مربع بین عرض‌های جغرافیایی ۱۸' و ۳۳° تا ۱۰' و ۳۳° شمالی و ۰۳' و ۵۰° تا ۴۰' و ۵۰° طول جغرافیایی شرقی قرار دارد. این حوضه از شمال به حوضه آبخیز رودخانه گلپایگان، از جنوب به حوضه آبخیز رودخانه کارون، از شرق به حوضه آبخیز رودخانه مرغاب و از غرب به حوضه آبخیز رودخانه دز محدود می‌شود. شکل ۱ حوضه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

رواناب در ایالات متحده آمریکا مقایسه نمود که نتایج حاکی از برتری مدل ساریما نسبت به آریما در پیش‌بینی جریان می‌باشد (۲۵). نوری و کالین (۲۰۱۶) از مدل شبکه عصبی مصنوعی و SWAT به منظور پیش‌بینی روزانه جریان رودخانه در ۲۹ حوضه آبخیز آتالانتا در جنوب شرقی ایالات متحده استفاده کردند که نتایج نشان داد هر دو مدل عملکرد خوبی در پیش‌بینی جریان رودخانه داشتند (۱۹). با توجه به بحث عدم قطعیت بالای متغیرها در فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده از ابزارهایی که در کاهش عدم قطعیت مؤثر باشد کارایی زیادی داشته و بسیاری از بهره‌برداران به سمت این مدل‌ها سوق داده شده‌اند. مدل‌های گرافیکی، که تلفیقی از نظریه گراف و تئوری ریاضی (احتمالاتی) هستند از پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های موجود در مسائل ریاضیات و مهندسی می‌کاهند. مدل‌های گرافیکی جهت‌دار بیشتر در مباحث یادگیری ماشینی کارایی دارند که از جمله مهم‌ترین این مدل‌ها، شبکه‌های بیزین^۱ می‌باشد که بر مبنای تئوری بیز^۲ است (۱۷). استفاده از رویکرد شبکه‌های بیزین در پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی مورد توجه محققین قرار گرفته و کارایی خود را بخوبی در این مسائل نشان داده است. ملارمضانی و تابش (۱۳۹۳) دو مدل پیش‌بینی بلندمدت مصرف آب با استفاده از شبکه‌ی بیزین ارائه دادند تا با استفاده از آن با لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها میزان مصرف آب شهر نیشابور را پیش‌بینی نمود (۱۵). کاردان مقدم و روزبهانی (۱۳۹۵) پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی آبخوان بیرجند را تحت دو سناریوی خوشه‌بندی و صریح انجام دادند که نتایج حاکی از عملکرد خوب مدل در پیش‌بینی می‌باشد (۱۳). سیکوراسکا و سیریت (۲۰۱۶) برای بررسی عملکرد سه پایگاه داده‌ی بارش برای پیش‌بینی سیل در حوضه‌ی آلف از مدل شبکه‌ی بیزین بهره گرفتند (۲۴). شینو همکاران (۲۰۱۶) از مدل بیزین، جهت پیش‌بینی خشکسالی آینده نزدیک با لحاظ عدم قطعیت بهره گرفتند. نتایج نشان داد که علاوه بر سازگاری قابل توجه بین اطلاعات مشاهده شده و پیش‌بینی شده، مدل در چارچوب ارائه چشم‌انداز، نتایج قابل اطمینانی را ارائه می‌کند (۲۳). استفاده از شبکه‌های بیزین جهت پیش‌بینی رواناب نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. احمدی و همکاران (۱۳۹۴) بمنظور پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای از دو روش ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های بیزین استفاده نمودند (۴). هامفری و همکاران (۲۰۱۶) از روش تلفیقی بیزین- شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی ماهانه‌ی جریان رودخانه در جنوب شرقی استرالیا استفاده کردند که نتایج بیانگر این است که مدل ترکیبی توسعه یافته بهتر از مدل‌ها بصورت منحصر بفرد عمل می‌کند (۱۲). سد زاینده‌رود منبع اصلی تأمین آب در اراضی پائین دست حوضه



شکل ۱- منطقه‌ی مطالعاتی

Figure 1- Study area

شبکه‌ی بیزین

به هر گره یک تابع احتمالاتی نسبت داده می‌شود که براساس آن احتمالات مربوط به قرارگیری هر متغیر در هر دسته مشخص می‌شود. جداول احتمال شرطی^۱ منعکس‌کننده‌ی تأثیرات یک متغیر بر روی متغیر دیگر است که برای هر گره با توجه به والدین آن تعیین می‌شود (۱۴). شبکه‌های بیزین بر مبنای استفاده از احتمالات شرطی و تئوری بیز توسعه داده شده‌اند. اگر F و E دو رویداد مفروض باشند به گونه‌ای که $P(E) \neq 0$ و $P(F) \neq 0$ ، آنگاه داریم:

$$P(E | F) = \frac{P(F|E) P(E)}{P(F)} \quad (۱)$$

رابطه‌ی (۱) نتیجه‌ای است که بعنوان تئوری بیز شناخته می‌شود که در آن $P(E|F)$ احتمال رخداد E به شرط F یا همان احتمال پسین^۲، $P(F|E)$ احتمال رخداد F به شرط E و $P(E)$ احتمال مشاهده E یا احتمال پیشین^۳ و $P(F)$ احتمال مشاهده F است. توزیع احتمالاتی توأم مجموعه‌ای از متغیرهای (با فرض مستقل بودن از یکدیگر)، از حاصل ضرب توزیع احتمالات شرطی آن‌ها بدست می‌آید (۵).

از جمله مزیت‌های شبکه‌های بیزین می‌توان به امکان توسعه شبکه حتی در صورت وجود سری داده‌های ناقص، امکان و سهولت به‌روزرسانی پارامترها و احتمالات شرطی بین پارامترهای مختلف اشاره نمود (۱۰). علاوه بر این شبکه‌های بیزین امکان محاسبات رو به جلو و رو به عقب را برای تحلیل‌گر ایجاد می‌کند یعنی نه تنها می

توان از وضعیت پارامترهای علت به معلول رسید بلکه در این روش با در اختیار داشتن وضعیت معلول یا همان پارامتر پیش‌بینی شده با یک فرآیند بازگشت به عقب امکان محاسبه وضعیت عوامل وجود دارد (۲۲). ورود متغیرها به شبکه‌ی بیزین به صورت صریح و دسته‌بندی شده صورت می‌گیرد. در حالت صریح از تابع توزیع احتمال داده‌ها طی بازه زمانی مدل‌سازی استفاده می‌شود و با توجه به احتمال رخداد فرآیند، مقدار عددی مورد نظر پیش‌بینی می‌شود. در حالت دسته‌بندی هر عامل به چندین دسته تقسیم‌بندی (خوشه‌بندی) می‌شود و دریافت خروجی از شبکه بصورت احتمال قرارگیری هر متغیر در هر دسته انجام می‌شود.

خوشه‌بندی^۴

خوشه‌بندی فرآیندی بدون نظارت است که در طی آن اشیاء به گروه‌های مختلف دسته‌بندی شده بطوری که اشیای موجود در یک خوشه، بیشترین شباهت را با یکدیگر دارند. روش K - میانگین^۵، یکی از کاربردی‌ترین روش‌های خوشه‌بندی داده‌ها است. در این روش، ابتدا اشیاء به صورت تصادفی به K خوشه تقسیم می‌شوند. در گام بعد، فاصله هر یک از اشیاء از میانگین خوشه خود محاسبه می‌شود. در صورتی که فاصله شی مورد نظر از میانگین خوشه خود زیاد و به خوشه دیگری نزدیک‌تر باشد، این شی به خوشه‌ای که نزدیک‌تر است اختصاص می‌یابد. این کار آن قدر تکرار می‌شود تا تابع خطا حداقل شود، و یا اعضای خوشه‌ها تغییر نیابد (۱۶). جهت دسته

4- Clustering
5- K-means

1- Conditional Probability
2- Posterior Probability
3- Prior Probability

بندی داده برای پیش‌بینی دوره‌های تر و خشک از این روش استفاده شده است.

شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه

شاخص‌های اعتبارسنجی خوشه‌ها، برای یافتن تعداد خوشه‌های بهینه از مجموعه داده مورد استفاده قرار می‌گیرد (۹). دو شاخص دیویس بولدین و عرض سیلوت شاخص‌هایی جهت ارزیابی تعداد مناسب خوشه می‌باشند. شاخص دیویس بولدین تابعی از پراکنش درون خوشه‌ای و پراکنش بین خوشه‌ای است. این شاخص بصورت رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$DB = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \max_{j \neq k} \left[\frac{S_{k,q} + S_{j,q}}{d_{jk,t}} \right] \quad (2)$$

که K تعداد خوشه‌ها، $S_{k,q}$ پراکندگی در خوشه‌ی k ام از مرتبه‌ی q ، $S_{j,q}$ پراکندگی در خوشه‌ی j ام از مرتبه‌ی q ، $d_{jk,t}$ فاصله‌ی مینکوفسکی^۱ از مرتبه t بین مرکز خوشه‌ی z و k ، می‌باشد (۲۱). شاخص عرض سیلوت برای هر پارامتر معیاری مقایسه‌ای است که نشان می‌دهد که آیا بهتر است که این پارامتر در خوشه‌ای که در آن قرار دارد بماند یا اینکه به خوشه‌ی دیگری منتقل شود. عرض سیلوت برای پارامتر i ام در خوشه‌ی k ام بصورت رابطه (۳) است.

$$SW_i = \frac{O_i - I_i}{\max [I_i, O_i]} \quad (3)$$

که در آن I_i متوسط فاصله‌ی ایستگاه i ام تا تمامی ایستگاه‌های خوشه k ام و O_i حداقل فاصله بین ایستگاه i ام تا سایر خوشه‌ها است. فاصله‌ی هر ایستگاه تا خوشه‌ای که به آن تعلق ندارد متوسط فاصله‌ی آن ایستگاه تا تمامی ایستگاه‌های آن خوشه است. از این رو مقدار SW_i بین -1 تا $+1$ خواهد بود. هر چه مقدار به -1 نزدیکتر باشد نشان دهنده‌ی درستی تعلق ایستگاه i ام به خوشه‌ای است که در آن قرار دارد (۱۳).

شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی SDI

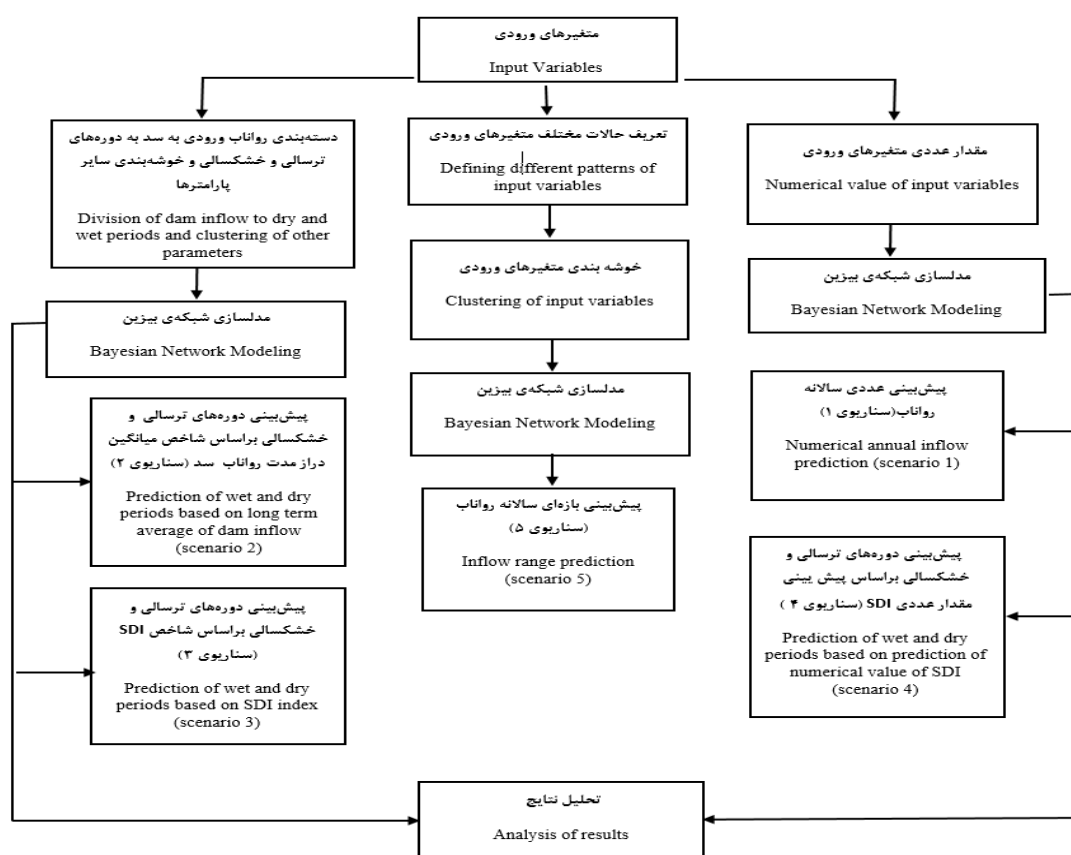
اصول محاسباتی شاخص SDI بدین صورت است که مقادیر دبی ماهانه هر ایستگاه هیدرومتری بر توزیع آماری مناسبی برازش داده می‌شود. لذا مقادیر دبی ماهانه بر توزیع گاما برازش داده می‌شود و احتمال تجمعی توزیع گاما محاسبه و سپس تغییر شکل هم احتمال تجمعی توزیع گاما به توزیع نرمال صورت می‌گیرد و مقدار دبی هر ایستگاه در سطوح هم احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال استخراج می‌شود (۸).

معرفی سناریوهای موجود

شناسایی پارامترهای مؤثر بر رواناب ورودی در حوضه و نقش آنها در میزان رواناب ورودی سالانه به سد زاینده‌رود حائز اهمیت است. در این پژوهش با توجه به آمار و اطلاعات موجود، از متغیرهای آبدی انتقالی به حوضه توسط تونل‌های انتقال اول و دوم کوهرنگ (Q_1, Q_2)، آبدی تونل چشمه لنگان (Q_3)، جریان طبیعی رودخانه زاینده‌رود (Q_4)، آبدی ایستگاه قلعه‌شاهرخ و اسکندری (Q_5, Q_6)، بارش (R)، برف (S) و رواناب ورودی به سد (Q_{dam}) با تأخیر زمانی سالانه به عنوان پیش‌بینی کننده‌های مدل استفاده شد. شایان ذکر است تونل سوم کوهرنگ نیز در این حوضه راه‌اندازی شده است، اما تنها در یک بازه‌ی کوتاه انتقال آب انجام شده است که بنا به عدم وجود آمار مستند از حجم جریان انتقالی از آن صرف نظر شده است. جهت پیش‌بینی رواناب سالانه ورودی به سد ۵ سناریو براساس متغیرهای ورودی و خروجی تعریف شد. یک سناریو جهت پیش‌بینی مقادیر عددی رواناب سالانه ورودی به سد (سناریوی ۱)، ۳ سناریو جهت پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی رواناب سالانه ورودی به سد با هدف ارائه مدل جهت پیش‌بینی ترسالی، خشکسالی و نرمال (سناریوی ۲، ۳ و ۴) و یک سناریو جهت پیش‌بینی بازه‌ای سالانه رواناب (سناریوی ۵) طرح‌ریزی شده است.

آموزش و صحت‌سنجی مدل شبکه‌ی بیزین در سناریوی ۱ بر اساس داده‌های صریح رواناب سالانه و متغیرهای صریح پیش‌بینی کننده متناظر آنها انجام شده و مقادیر عددی رواناب ورودی به سد پیش‌بینی شده است. در سناریوی ۲ آموزش مدل و صحت‌سنجی آن بر اساس تقسیم‌بندی رواناب به دوره‌های تر و خشک براساس میانگین درازمدت و در سناریوی ۳ براساس تقسیم‌بندی رواناب ورودی به سد براساس شاخص SDI به سه دسته‌ی ترسالی، نرمال و خشکسالی انجام گرفت. در این دو سناریو متغیرهای پیش‌بینی کننده با روش خوشه‌بندی K - میانگین به بازه‌های مناسب تقسیم‌بندی شده اند. در سناریوی ۴ مقدار عددی شاخص SDI برای تعیین دوره‌های تر و خشک پیش‌بینی شده و تحلیل نتایج براین اساس انجام گرفته که آیا داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی در یک بازه از نظر ترسالی، خشکسالی و یا نرمال بودن قرار دارند یا خیر. در سناریوی ۵ با تقسیم‌بندی داده‌های سالانه رواناب ورودی به سد و سایر متغیرها به بازه‌های مناسب با استفاده از خوشه‌بندی، پیش‌بینی بازه‌ای سالانه رواناب ورودی به سد انجام گرفته است. شکل ۲ فلوچارت مراحل مدل‌سازی تحت ۵ سناریوی موجود را نشان می‌دهد.

جهت شناسایی بهترین ساختار آموزشی، الگوهای مختلف ساختار شبکه‌ی بیزین برای ورود اطلاعات برای مدل تعریف شده. بر این اساس ۲۶ الگوی برای ورود پارامترهای مدل‌سازی طرح گردید. الگوهای مختلف تعریف شده در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۲-فلوچارت پژوهش و سناریوهای پیش‌بینی
Figure 2- Research flowchart and prediction scenarios

قابلیت پشتیبانی از گره‌های گسسته و پیوسته را دارا می‌باشد. آموزش ساختار در این نرم‌افزار از طریق آزمون‌های آماری و بدست آوردن وابستگی یا عدم وابستگی با استفاده از آزمون‌های آماری و استفاده از الگوریتم‌های متعددی نظیر NPC^1 انجام می‌شود. روش آموزش پارامترهای براساس الگوریتم آموزشی EM^2 صورت می‌گیرد. در این پژوهش به دلیل مزایا و سهولت کار از این نرم‌افزار جهت مدلسازی شبکه‌ی بیزین بهره گرفته شده است (۱۱).

بر این اساس از سه رویکرد استفاده شده است. در رویکرد اول (۱۵ الگو اول)، از متغیرهای بارش، برف، آبدهی تونل‌های انتقال آب اول و دوم کوهرنگ، تونل چشمه لنگان و جریان طبیعی رودخانه زاینده‌رود (با کسر آبدهی تونل‌های انتقال آب از جریان رودخانه زاینده‌رود)، پیش‌بینی رواناب سالانه ورودی به سد زاینده‌رود صورت گرفته است. در رویکرد دوم (۹ الگوی دوم) از متغیرهای بارش، آبدهی تونل‌های انتقال آب اول و دوم کوهرنگ، تونل چشمه لنگان، جریان طبیعی در ایستگاه قلعه‌شاه‌رخ که از طرف جنوب و ایستگاه اسکندری که از طرف شمال حوضه، آب را به طرف مخزن سد منتقل می‌کند، استفاده شده است. در این دو رویکرد از داده‌های سال آبی قبل جهت پیش‌بینی وضعیت رواناب ورودی به سد در سال آبی فعلی استفاده شده است. در رویکرد سوم نیز صرفاً سری زمانی جریان ورودی به سد در سال قبل و دو سال قبل به عنوان پیش‌بینی کننده‌های ورودی به مدل معرفی شده‌اند.

نرم‌افزار تجاری Hugin Lite v8.5 یکی از نرم‌افزارهای موجود در زمینه‌ی مدلسازی شبکه‌های بیزین است. این نرم‌افزار یک رابط گرافیکی بسیار خوب برای کاربران فراهم می‌کند و علاوه بر این

1- Necessary Path Condition
2- expectation-maximization

جدول ۱- الگوهای تعریف شده ساختار شبکه‌ی بیزین جهت ورود متغیرها
Table 1- Defined patterns of Bayesian Network structure for predictors

Q dam (t-2)	Qdam (t-1)	S	R	Q6	Q5	Q4	Q3	Q2	Q1	الگوهای تعریف شده (Defined patterns)	
X	✓	X	✓	X	X	X	✓	✓	✓	1	
X	✓	X	✓	X	X	X	X	✓	✓	2	
X	✓	X	✓	X	X	X	✓	X	✓	3	
X	X	X	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	4	
X	X	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	✓	5	
X	X	X	✓	X	X	✓	X	✓	✓	6	
X	✓	X	✓	X	X	✓	X	✓	✓	7	
X	X	✓	✓	X	X	✓	X	✓	✓	8	
X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	✓	✓	9	
X	X	X	✓	X	X	✓	✓	X	✓	10	
X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	X	✓	11	
X	X	X	✓	X	X	✓	X	X	✓	12	
X	✓	X	✓	X	X	✓	X	X	✓	13	
X	X	✓	✓	X	X	✓	X	X	✓	14	
X	✓	✓	✓	X	X	✓	X	X	✓	15	
X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	✓	✓	16	
X	✓	X	✓	X	✓	X	X	✓	✓	17	
X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	X	✓	18	
X	✓	X	✓	✓	X	X	✓	✓	✓	19	
X	✓	X	✓	✓	X	X	X	✓	✓	20	
X	✓	X	✓	✓	X	X	✓	X	✓	21	
X	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	✓	✓	22	
X	✓	X	✓	✓	✓	X	X	✓	✓	23	
X	✓	X	✓	✓	✓	X	✓	X	✓	24	
X	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	25	
✓	✓	X	X	X	X	X	X	X	X	26	

متفاوت است. جهت سنجش دقت دوره‌های تر و خشک هیدرولوژیکی و پیش‌بینی بازه‌ای از شاخص درصدگیری استفاده می‌شود. چرا که در این سناریوها احتمال قرارگیری در دسته تر، خشک و نرمال رو محاسبه شده و دسته‌ای که بالاترین احتمال به آن تعلق دارد بعنوان نتیجه انتخاب و با وضعیت واقعی و مشاهداتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

الگوریتم کلی روش ارائه شده جهت مدلسازی رواناب سالانه ورودی به سد زاینده‌رود، دارای ۴ گام اصلی آماده‌سازی ورودی‌های مدل، آموزش شبکه‌ی بیزین، صحت‌سنجی مدل و دریافت خروجی از

شاخص‌های ارزیابی مدل

پس از مراحل آموزش شبکه، جهت بررسی دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل، از شاخص‌های درصدگیری، ضریب همبستگی پیرسون^۱، ضریب نش ساتکلیف^۲، میانگین خطای مطلق^۳ یا همان خطای نسبی، مجموعه مربعات خطا^۴ و ضریب جرم باقیمانده^۵ بهره گرفته شده. برحسب نوع پیش‌بینی، استفاده از شاخص‌های ارزیابی

- 1- Pearson correlation coefficient
- 2- Nash-Sutcliffe coefficient
- 3- The mean absolute percentage error
- 4- Root mean square error
- 5- Coefficient of Residual Mass

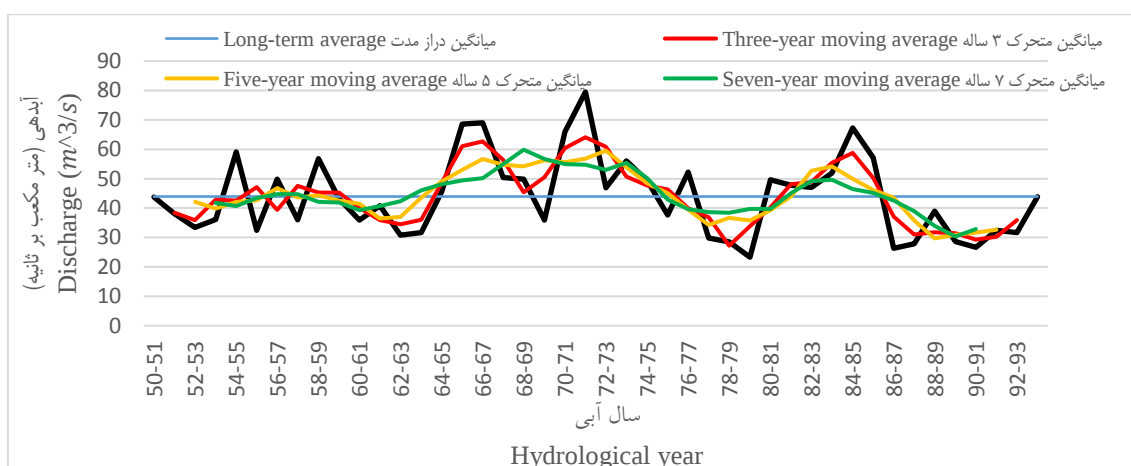
مدل می‌باشد. که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

آماده‌سازی ورودی‌های مدل

تحلیل سری زمانی جهت تعیین دوره صحت‌سنجی مدل نشان می‌دهد که ۲۰ درصد انتهای سری زمانی در دوره‌ی خشک قرار داشته و جهت صحت‌سنجی مناسب نمی‌باشد. بدین منظور جهت تعیین دوره‌ی صحت‌سنجی با استفاده از میانگین متحرک جریان ورودی به سد دوره‌ی آماری ۸ ساله منتهی به سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ به عنوان دوره صحت‌سنجی انتخاب شد. شکل ۳ سری زمانی آبدی ورودی به سد را در دوره مورد بررسی نشان می‌دهد.

دسته‌بندی داده‌ها

خوشه‌بندی داده‌ها با استفاده از روش K- میانگین انجام و به منظور اعتبارسنجی تعداد خوشه‌ها از دو شاخص دیویس بولدین و عرض سیلپهوت استفاده شد. لازم به ذکر است کدنویسی روش‌های ذکر شده در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفت. نتایج تحلیل تعداد



شکل ۳- سری زمانی ورودی به سد زاینده‌رود

Figure 3- Time series of Zayandeh Rud Dam inflow

جدول ۲- تعداد خوشه بهینه براساس دو شاخص عرض سیلپهوت و دیویس بولدین

Table 2- The optimum number of clusters based on Silhouette width and Davies Bouldin indexes

تعداد خوشه‌ی بهینه			تعداد خوشه‌ی بهینه		
Number of optimum clusters		متغیر	Number of optimum clusters		متغیر
دیویس بولدین	عرض سیلپهوت		دیویس بولدین	عرض سیلپهوت	
Davies Bouldin	Silhouette width	Variable	Davies Bouldin	Silhouette width	Variable
3	3	Q6s	3	2	Q1
2	2	R	3	3	Q2
2	2	S	3	3	Q3
3	3	Q _{dam}	3	3	Q4
			3	3	Q5

جدول ۳- نتایج صحت‌سنجی در سناریوی ۱
Table 3- Results of validation of scenario 1

الگوها						الگوها					
R	CRM	RMSE (m ³ /s)	NS	MAPE	Patterns	R	CRM	RMSE (m ³ /s)	NS	MAPE	Patterns
0.45	0.09	13.25	0.13	0.21	14	0.27	-0.04	15.17	-0.14	0.31	1
0.36	0	13.83	0.05	0.26	15	0.44	0	12.82	0.18	0.27	2
0.01	-0.1	21.22	-1.23	0.46	16	0.15	0.02	15.31	-0.16	0.32	3
0.13	-0.04	16.74	-0.39	0.35	17	0.27	-0.04	15.19	-0.14	0.31	4
-0.14	-0.11	25.6	-2.25	0.56	18	0.26	-0.02	14.74	-0.08	0.29	5
0.24	-0.05	15.76	-0.23	0.33	19	0.46	0.01	12.66	0.2	0.26	6
0.45	0	12.78	0.19	0.27	20	0.08	-0.04	16.84	-0.41	0.35	7
0.14	-0.06	17.44	-0.51	0.37	21	0.45	0.03	12.74	0.2	0.25	8
-0.07	-0.15	25.92	-2.33	0.57	22	0.29	-0.02	14.59	-0.06	0.29	9
0.12	-0.03	16.7	-0.38	0.36	23	<u>0.56</u>	<u>0.07</u>	<u>12.21</u>	<u>0.26</u>	<u>0.21</u>	<u>10</u>
-0.08	-0.15	26.71	-2.54	0.59	24	0.29	-0.04	15.04	-0.12	0.31	11
0.5	-0.04	12.65	0.21	0.28	25	0.5	0.06	12.54	0.22	0.22	12
0.46	-0.05	12.88	0.18	0.29	26	0.3	-0.04	14.82	-0.09	0.31	13

آموزش شبکه‌ی بیزین

آموزش مدل بیزین شامل دو مرحله‌ی آموزش ساختار شبکه و آموزش پارامترها است. آموزش ساختار به معنای یافتن روابط علت و معلولی بین متغیرهاست. دو الگوریتم PC و NPC^۱ از معروف‌ترین الگوریتم‌های مورد استفاده برای این منظور می‌باشند (۱۹). در این پژوهش به دلیل مشخص بودن ساختار شبکه از قبل از این الگوریتم‌ها استفاده نشده و بصورت مستقیم به مدل آموزش داده شده‌اند. اما آموزش پارامترها به معنی ساختن احتمالات شرطی بین هر دو گره است که از الگوریتم EM^۲ جهت آموزش پارامترهای شبکه استفاده شده است.

صحت‌سنجی و دریافت خروجی از مدل

پس از انجام آموزش مدل، بررسی دقت و صحت پیش‌بینی‌های مدل در هر سناریو انجام گرفته است. در سناریوی شماره ۱ به منظور پیش‌بینی مقدار رواناب عددی سالانه با استفاده از شبکه‌ی بیزین، در کلیه الگوهای تعریف شده جهت ورود متغیرها، پیش‌بینی‌کننده‌ها بصورت مقادیر صریح عددی وارد شبکه‌ی بیزین شده‌اند. تحلیل و ارزیابی نتایج صحت‌سنجی براساس شاخص‌های مختلف آماری نشان می‌دهد که براساس شاخص کمترین خطای نسبی، حالت ۱۰ و ۱۴ می‌بایست بعنوان بهترین سناریوها انتخاب شوند. نکته‌ی قابل توجه در هر دو سناریو وجود سه پارامتر پیش‌بینی‌کننده‌ی دبی طبیعی زاینده رود، آبدی تونل اول کوهرنگ و بارش است. از طرفی براساس شاخص‌های آماری ضریب نش، همبستگی و RMSE حالت ۱۰ نه

تنها نسبت به سناریوی ۱۴، بلکه در بین کلیه‌ی حالات، بهترین نتایج را دارا می‌باشد. تحلیل کلی نتایج نشان می‌دهد با توجه به بالاتر بودن ضریب همبستگی در حالت ۱۰ که مقدار آن ۰/۵۶ است و کمترین خطای نسبی و RMSE بین حالات مختلف و هم چنین پایین بودن ضریب آماری CRM، این حالت به عنوان حالت منتخب پیش‌بینی‌کننده‌های جهت مدلسازی شبکه بیزین انتخاب می‌شود. ساختار شبکه در حالت منتخب شامل پارامترهای آبدی تونل اول کوهرنگ، آبدی چشمه لنگان، آبدی طبیعی زاینده رود و بارش می‌باشد.

پس از شبیه‌سازی اولیه مدل شبکه‌ی بیزین در حالات پیش‌بینی عددی سالانه، یک الگوی خاص تعریف شده است. در الگوی شماره ۲۷ پیش‌بینی‌کننده‌ها مشابه الگوی ۱۰ می‌باشند با این تفاوت که مقادیر آن‌ها در ۲ سال قبل بعنوان پیش‌بینی‌کننده رواناب در سال مورد نظر است. در نهایت مشاهده شد که نتایج صحت‌سنجی این الگو نزدیک به الگوی ۱۰ می‌باشد اما به دلیل بالاتر بودن ضریب همبستگی در الگوی ۲۷، می‌توان این الگو را بعنوان الگوی برتر سناریوی ۱ معرفی نمود (جدول ۴) که امکان پیش‌بینی از دو سال قبل را فراهم می‌کند.

در گام بعدی ۳ سناریو (سناریوی ۳، ۲ و ۴) به منظور پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی تعریف شده‌اند. در سناریوی ۲ متغیرهای ورودی به شبکه‌ی بیزین خوشه‌بندی و داده‌های آبدی ورودی به سد براساس میانگین درازمدت به دو دسته تر و خشک تقسیم شدند. براساس نتایج استخراجی از صحت‌سنجی در الگوهای مختلف که در جدول ۵ نشان داده شده است، مشخص شد بیشترین دقت در پیش‌بینی مربوط به الگوی ۲۵ است که با دقت ۷۵٪ قادر است در ۶ سال از مجموع ۸ سال دوره‌ی آماری صحت‌سنجی بصورت صحیح پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی را انجام

- 1- Necessary Path Condition
- 2- Expectation-maximization

دهد.

جدول ۴- نتایج صحت‌سنجی سناریوی ۱ تحت الگوهای خاص

تعریف شده

Table 4- Validation Results of special patterns for scenario 1

الگو	MAPE	N.S	RMSE (m ³ /s)	CRM	R
Pattern					
27	0.21	0.46	10.36	0.12	0.78

در این الگو، ساختار شبکه تنها شامل یک پیش‌بینی کننده می باشد. در واقع در این الگو پیش‌بینی رواناب ورودی به سد در سال مورد نظر با استفاده از اطلاعات رواناب یک سال قبل آن صورت گرفته است. علاوه بر این نتایج حاصل شده از الگوی ۲۶ نشان می دهد که با اضافه کردن پارامتر رواناب ورودی دو سال قبل به ساختار شبکه‌ی الگوی برتر، از دقت مدل کاسته و به همبستگی ۶۳٪ می-رسد. در سناریوی ۳ که تعیین دوره‌های تر و خشک براساس شاخص SDI را نشان می‌دهد، ارزیابی مدل حاکی از دقت نامناسب جهت پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی است. جدول ۶ نتایج استخراجی را در این سناریو نشان می‌دهد. بیشترین میزان دقت در الگوهای ۳، ۱۸، ۲۴، ۲۵، ۲۶ مشاهده شده که مقدار آن ۵۰٪ است. رواناب ورودی به سد با تأخیر زمانی یکساله، پارامتر مشترک در ساختار شبکه‌ی این ۵ الگو و آبدهی تونل اول کوهرنگ، آبدهی چشمه لنگان، بارش و رواناب ورودی به سد با تأخیر یکساله پارامترهای مشترک موجود در سه الگوی ۲۴ و ۱۸، ۳ می‌باشد. یکی از علل اصلی در پائین بودن مقدار دقت پیش‌بینی در این سناریو قرار

داشتن طیف بزرگ مقداری شاخص SDI در محدوده‌ی نرمال (۱+ تا ۱-) است. آن چه در این سناریو قابل توجه است که الگوی ۲۵ که بعنوان الگوی برتر سناریوی ۲ انتخاب گردید، در بین الگوهای برتر منتخب سناریوی ۳ نیز قرار دارد. در سناریوی ۴ الگوهای ۱۰ تا ۱۵ با دقت ۶۳٪ برترین الگوها هستند. آبدهی تونل ۱ کوهرنگ، آبدهی تونل چشمه لنگان و آبدهی طبیعی زاینده‌رود به عنوان پیش‌بینی کننده‌های اصلی در این ۶ الگو بوده که مجموعاً در ۵ سال از ۸ سال دوره‌ی صحت‌سنجی نتایج مناسبی برآورد شده (جدول ۷). با مقایسه ی نتایج این سه سناریو، مشاهده می‌شود سناریوی ۲ در الگوی ۲۵ توانایی بهتری در پیش‌بینی دوره‌های ترسالی و خشکسالی داشته است. سناریوی ۵ که با خوشه‌بندی داده‌ها جهت پیش‌بینی بازه ای جریان تعریف شده است الگوهای ۱، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۲ و ۲۵ بهترین دقت را در پیش‌بینی بازه‌ای سالانه آبدهی ورودی به سد دارا هستند (جدول ۸). آبدهی تونل انتقال آب شماره‌ی یک کوهرنگ، بارش و جریان طبیعی رودخانه زاینده‌رود در ساختار شبکه‌ی هر چهار الگو ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تکرار شده است.

بطور کلی نتایج حاصل از پنج سناریوی موجود نشان می‌دهد که بیشترین حساسیت مدل نسبت به پارامترهای پیش‌بینی کننده‌ی آبدهی تونل اول کوهرنگ و رواناب ورودی به سد با تأخیر یکساله می باشد.

براساس نتایج بدست آمده، الگوی ۲۷ در سناریوی اول مدل برتر جهت پیش‌بینی عددی رواناب سالانه ورودی به سد می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است. پیش‌بینی کننده‌های این مدل آبدهی تونل اول، آبدهی تونل چشمه‌لنگان، آبدهی طبیعی زاینده‌رود و بارش با دو سال تأخیر می‌باشد.

جدول ۶- نتایج صحت‌سنجی در سناریوی ۳

Table 6- Validation Results of scenario 3

الگوها	P(%)	الگوها	P(%)	الگوها	P(%)
Patterns		Patterns		Patterns	
13%	19	38%	10	25%	1
13%	20	38%	11	25%	2
38%	21	38%	12	50%	3
25%	22	25%	13	25%	4
0%	23	38%	14	38%	5
50%	24	25%	15	25%	6
50%	25	25%	16	25%	7
50%	26	0%	17	25%	8
		50%	18	13%	9

جدول ۵- نتایج صحت‌سنجی در سناریوی ۲

Table 5- Validation Results of scenario 2

الگوها	P(%)	الگوها	P(%)	الگوها	P(%)
Patterns		Patterns		Patterns	
38%	19	50%	10	63%	1
38%	20	38%	11	63%	2
25%	21	63%	12	38%	3
38%	22	50%	13	13%	4
25%	23	63%	14	50%	5
38%	24	50%	15	50%	6
75%	25	50%	16	38%	7
63%	26	38%	17	38%	8
		50%	18	25%	9

جدول ۸- نتایج صحت‌سنجی در سناریوی ۵

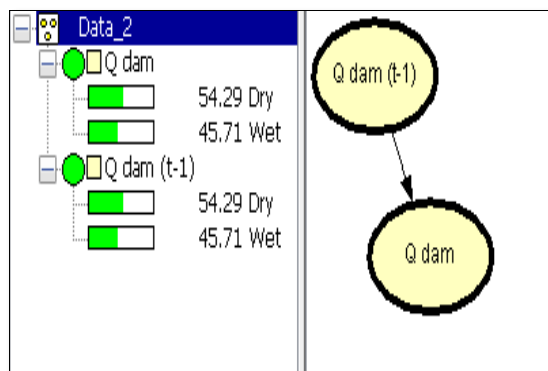
Table 8- Validation Results of scenario 5

P(%)	الگوها Patterns	P(%)	الگوها Patterns	P(%)	الگوها Patterns
25%	19	50%	10	50%	1
25%	20	50%	11	50%	2
25%	21	63%	12	50%	3
13%	22	63%	13	38%	4
13%	23	63%	14	38%	5
13%	24	63%	15	38%	6
63%	25	37%	16	50%	7
25%	26	25%	17	38%	8
		38%	18	38%	9

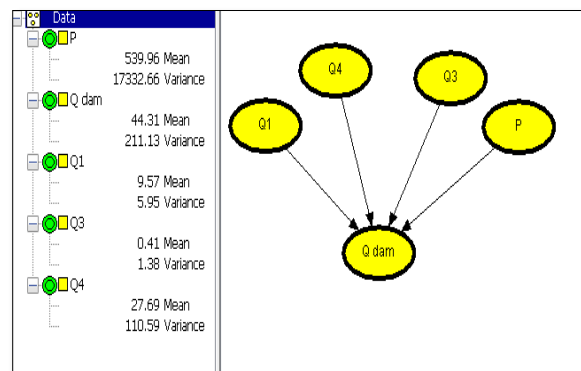
جدول ۷- نتایج صحت‌سنجی در سناریوی ۴

Table 7- Validation Results of scenario 4

P(%)	الگوها Patterns	P(%)	الگوها Patterns	P(%)	الگوها Patterns
38%	19	63%	10	50%	1
50%	20	63%	11	50%	2
50%	21	63%	12	38%	3
38%	22	63%	13	50%	4
38%	23	63%	14	50%	5
38%	24	63%	15	50%	6
50%	25	25%	16	50%	7
50%	26	38%	17	50%	8
		38%	18	50%	9



(ب)



(الف)

شکل ۴- ساختار شبکه‌ی بیزین پیشنهادی جهت پیش‌بینی (الف) مقدار رواناب ورودی به سد (ب) دوره‌های ترسالی و خشکسالی
Figure 4- The proposed Bayesian Network structure for prediction of (a) Dam inflow (b) wet and dry periods

شبکه انجام گرفت. طرح‌ریزی این سناریوها براساس متغیرهای ورودی به شبکه‌ی بیزین صورت گرفته است. در سناریوی اول پیش‌بینی عددی سالانه رواناب بر اساس داده‌های صریح رواناب سالانه و متغیرهای پیش‌بینی کننده متناظر آنها انجام شده. نتایج در این سناریو نشان داد که پیش‌بینی کننده‌های آینده‌ی تونل اول کوه‌رنگ، آینده‌ی تونل چشمه‌لنگان، آینده‌ی طبیعی زاینده‌رود و بارش (همگی با تأخیر زمانی دو ساله) با ضریب همبستگی ۰/۷۸ بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی شده و خطای نسبی ۰/۲۱ رواناب عددی ورودی به سد را پیش‌بینی کند. از بین سناریوهای طراحی شده جهت پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیکی از لحاظ ترسالی و خشکسالی، الگوی شماره‌ی ۲۵ در سناریوی دوم که در آن وضعیت ترسالی و خشکسالی رواناب ورودی به سد در سال قبل، پیش‌بینی کننده‌ی وضعیت ترسالی و خشکسالی رواناب ورودی به سد در سال فعلی می‌باشد و دقت بدست آمده از آن ۷۵٪ است، برترین الگو می‌باشد. نتایج کلی نشان داد که مدل شبکه‌ی بیزین به‌خوبی توانایی پیش‌بینی سالانه رواناب داشته‌است. پیش‌بینی دوره‌ی ترسالی و خشکسالی در برنامه‌ریزی بهتر منابع آب جهت بهره‌برداری مطلوب مؤثر خواهد بود تا اتخاذات لازم را در جهت تخفیف اثرات احتمالی ناشی از خشکسالی را در نظر گیرند.

همچنین براساس نتایج، می‌توان الگوی ۲۵ در سناریوی دوم را به عنوان ساختار برتر جهت پیش‌بینی نوع سال آبی از لحاظ ترسالی و خشکسالی معرفی نمود (شکل ۴) که در آن رواناب ورودی به سد در سال قبل، پیش‌بینی کننده‌ی رواناب ورودی به سد در سال فعلی می‌باشد. این پیش‌بینی با دقت ۷۵٪ انجام شده است.

نتیجه‌گیری

در طی چند دهه اخیر در کشور و بویژه حوضه‌های پر مصرف نظیر حوضه‌ی زاینده‌رود روند کاهش رواناب مشاهده می‌شود تا جایی که بسیاری از مخازن سدها در یک دوره درازمدت پر نمی‌شوند. این روند کاهشی عمدتاً به دلیل خشکسالی، برداشت‌های بی‌رویه و گاهی تغییر اقلیم می‌باشد. سد زاینده‌رود به عنوان یکی از کلیدی‌ترین سازه‌های آبی موجود در سیستم حوضه‌ی زاینده‌رود و نقش آن در تأمین نیازهای متنوع پایین دست، نیازمند بکارگیری یک مدل مناسب پیش‌بینی احتمالاتی با لحاظ عدم قطعیت‌ها است. در این پژوهش پیش‌بینی سالانه‌ی رواناب ورودی به سد زاینده‌رود با رویکرد نوین احتمالاتی شبکه‌ی بیزین در ۵ سناریو تحت الگوهای مختلف ساختار

خواهد گرفت.

سپاسگزاری

بدین وسیله از پشتیبانی شرکت آب منطقه‌ای اصفهان در قالب طرح پژوهشی با عنوان "پیش‌بینی کوتاه مدت و بلند مدت آبدهی ورودی به سد زاینده‌رود با رویکرد نوین احتمالاتی شبکه‌های بی‌زین" به شماره قرارداد ۹۵/۱۸۵ صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

همچنین پیش‌بینی این دوره‌ها در برنامه‌ریزی بهتر جهت تأمین حقابه‌های زیست محیطی مؤثر خواهد بود. بطور کلی نتایج بدست آمده از مدل امکان برنامه‌ریزی منابع آب جهت تخصیص بهینه توسط بهره‌برداران را فراهم آورده که کمک شایانی به تحلیل و اصلاح سیاست یا منحنی فرمان بهره‌برداری از سد زاینده رود جهت تخصیص به پایین دست بویژه در بخش کشاورزی و محیط زیست خواهد نمود. لازم به ذکر است در قالب ادامه مطالعات فعلی پیش‌بینی در مقیاس‌های زمانی فصلی و ماهانه با استفاده از این روش انجام

منابع

- 1- Abrishamchi A., Jamali S., Mariño M. A., and Tajrishy M. 2006. Stream flow forecasting and reservoir operation models using fuzzy inference systems. P. 373-382 Operations Management Conference 9-12 May. 2006, California, USA.
- 2- Abrishamchi A., Tajrishy M., Tafarojnoruz A., Chehrenegar B., and Shadzaad, Sh. 2008. Using satellite data to improve the accuracy of river flow forecasting models a case study of Zayande-rood river basin, Iran. AWRA 2008 SPRING SPECIALTY CONFERENCE 17-19 March. 2008, San Mateo, California.
- 3- Adamowski J., and Sun K. 2010. Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. Journal of Hydrology, 390: 85-91.
- 4- Ahmadi F., Radmanesh F., and Mirabbasi Najafabadi R. 2016. Comparing the performance of Support Vector Machines Bayesian networks in predictiong daily river flow (Case study: Baranduz Chai River). Journal of Water and Soil Condervation, 22(6):171-186 (In Persian with English abstract).
- 5- Anbari M. J., Tabesh M., and Roozbahani A. 2017. Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks. Journal of Environmental Management, 190: 91-101.
- 6- Araghinejad S., and Karamouz M. 2005. Long-Lead Streamflow Forecasting using Artificial Neural Networks and Fuzzy Inference System. Journal of Iran-Water Resources Research, 1(2): 29-41 (In persian with English abstract).
- 7- Bayes Server. 2017. Bayes Server researcher user guide, verion 7.25.
- 8- Eghtedar Nezhad M., Bazrafshan O., and Sadeghi Lari A. 2017. Adaptive Evaluation of SPI, RDI and SDI Indices in Analyzing the Meteorological and Hydrological Drought Characteristics (Case Study: Bam Plain). Journal of Water and Soil Science , 26(4.2): 61-81 (In Persian with English abstract).
- 9- Halkidi M., Batistakis Y., and Vazirgiannis. M. 2001. on clustering validation techniques. J. Intel. Infor. Sys, 17: 107-145.
- 10- Heckman J. J., and Snyder Jr J. M. 1996. Linear probability models of the demand for attributes with an empirical application to estimating the preferences of legislators (No. w5785). National bureau of economic research.
- 11- Hugin Expert. 2017. Hugin researcher user guide, version 8.5.
- 12- Humphrey G. B., Gibbs M. S., Dandy G. C., and Maier H. R. 2016. A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. Journal of Hydrology, 540: 623-640.
- 13- Kardan moghadam H. and Roozbahani A. 2015. Assessment of Byesian Network Models in Monthly Predecion of Groundwater Level (Case study: Birjand aquifer). Journal of Water and Irrigation Management, 5(2): 139-151 (In Persian with English abstract).
- 14- Liedloff A.C., Woodward E.L., Harrington G.A., and Jackson S. 2013. Integrating indige-nous ecological and scientific hydro-geological knowledge using a BayesianNetwork in the context of water resource development. Journal of Hydrology, 499: 177-187.
- 15- Mollaramezani M., and Tabesh M. 2014. Long-term forecasting of urban water demand using Bayesian networks, 8th national congress of Civil engineering , Noshirvani university of technology, Babol, Iran (In Persian).
- 16- Momeni M. 2011. Clustering of data (Cluster analysis)" Moalef publication (1): 130 (In Persian)
- 17- Murphy K. 2001. An introduction to graphical models. Rap. tech: 19-1.
- 18- Naqdi Bansole K., and Musavi J. 2014. Prediction of Zayandehrood dam reservoir inflow using the K-Nearest Neighbors algorithm (KNN). 5th National Conference on water Resources Management. 2014, Tehran, Iran.
- 19- Noori N., and Latif K. 2016. Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. Journal of Hydrology, 533: 141-151.
- 20- Noori R., Karbassi A.R., Moghaddamnia A., Han D., Zokaei-Ashtiani M. H., Farokhnia A., and Gousheh, M. G.

2011. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. *Journal of Hydrology*, 401(3): 177-189.
- 21- Rao A.R., and Srinivas V.V. 2008. Regionalization of Watersheds: an Approach Based on Cluster Analysis, vol. 58. Springer Science & Business Media.
- 22- Roozbahani A. 2011. Risk Based Decision Making Model of Urban Water Systems Management, PhD thesis, College of engineering , university of Tehran , Tehran, Iran.
- 23- Shin J. Y., Ajmal M., Yoo J., and Kim T. W. 2016. A Bayesian network-based probabilistic framework for drought forecasting and outlook. *Advances in Meteorology* 2016.
- 24- Sikorska A. E., and Seibert J. 2016. Value of different precipitation data for flood prediction in an alpine catchment: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 556: 961-971.
- 25- Valipour M. 2015. Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States, *Meteorological Applications*, 22(3): 592-598.
- 26- Wan Y., and Konyha K. 2015. A simple hydrologic model for rapid prediction of runoff from ungauged coastal catchments, *Journal of Hydrology*, 528: 571-583.



Prediction of Zayandeh Rood Dam Inflow and Hydrological Wet and Dry Periods Using Bayesian Networks

P. Noorbeh¹- A. Roozbahani^{2*}- H. Kardan Moghaddam³

Received: 23-04-2018

Accepted: 03-06-2018

Introduction: During the last decades, runoff decreasing is observed in our country as many dam reservoirs face water supply crisis even in normal periods. This decreasing trend is mainly due to the uncontrolled withdrawals, lack of supply and demand management as well as droughts. Using different flow prediction methods for surface water resources state analysis is important in water resources planning aspects. These methods can provide the possibility of planning for proper operation by using different factors to meet the needs of the region. Due to the stochastic nature of the hydrological processes, various models are used for prediction. Among these models, Bayesian Networks (BNs) probabilistic model has been considered by many researchers in recent years and it has shown the efficiency on these issues. Due to the growth of demand in different sectors and crises caused by drought of the water supply system that has put the basin under water stress, the water shortage has appeared in different sectors. Regarding to the strategic situation of Zayandeh Rood Dam in providing water resources for tap water, industry, agriculture and environmental water rights in Gavkhooni basin, this research presents the development of a model for prediction of Zayandeh Rood Dam annual inflow and hydrological wet and dry periods. Since the uncertainty of the predictions increase when the prediction horizon increases, this factor is the most important challenge of long-term prediction. Using Bayesian Network with reducing this uncertainty, provides the possibility of planning for water resources management, especially for optimal water allocation.

Materials and Methods: In this study for prediction of zayandeh Rood dam inflow five scenarios were defined by applying Bayesian Network Probabilistic approach. According to this, prediction of numerical annual dam inflow (scenario1), annual wet and dry hydrological periods (scenario 2, 3, 4) and range of annual inflow (scenario 5) were performed. For this purpose rainfall, runoff, snow, and discharge of transferred water to the basin from the first and the second tunnel of koohrang and Cheshmeh Langan tunnel were considered as predictor variables and the amount of Zayandeh Rood Dam inflow was selected as predictant for modeling and different conditions of input variable's learning have been analyzed considering different patterns. Calibration and validation of the model have been done based on observed annual inflow data and the relevant predictors in scenario 1, by using SDI Hydrological drought index and long-term average of inflow to classify the runoff and clustering the other parameters in scenario 2, 3 and 4 and with classification of annual inflow data and other parameters by using clustering in scenario 5. To achieve this target, K-means method has been used for clustering and Davies-Bouldin and Silhouette Width has been used to determine optimal number of clusters.

Results and Discussion: The results of Bayesian Network modeling showed that the scenario 1 has a good potential to predict the dam inflow so that the best pattern of this scenario (considering discharge of first tunnel of Koohrang and Cheshmeh Langan tunnel, Zayandeh Rood natural inflow and rainfall with two years lag time as predictor variables), has had a correlation coefficient of 0.78 between observed and predicted dam inflow and relative error of 0.21 which shows an acceptable accuracy in prediction. Among scenarios 2, 3 and 4 for prediction of wet and dry hydrological periods, scenario 2 in which classification of runoff has been based on the long-term average, in the best pattern (with dam inflow with one-year lag predictor), is able to be predicted up to 75% accuracy. The analysis of the results showed that the scenario 5 is not very accurate in prediction of dam inflow's range.

Conclusions: The results showed that the Bayesian Network model has a good efficiency to predict annual dam inflow numerically as well as hydrological dry and wet periods. Obtained results from prediction of hydrological dry and wet periods will be effective in better planning of water resources in order to considering

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Ph.D. Graduate, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburairhan Campus, University of Tehran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: roozbahany@ut.ac.ir)

possible ways of drought effect reduction. The overall results provide the possibility of water resources planning for the water authorities of this region. Systematic planning leads to optimal use of water and soil resources and helps considerably to analyze and modify the policy or rule *curve of this dam for allocating water to downstream especially for agriculture and environment and industry sectors*.

Keywords: Bayesian Networks, Clustering, Runoff Prediction, SDI index, Zayandeh Rood Dam

Contents

Simulation of Stream Flow and Sediment Yield in Fariman Dam Watershed Using SWAT Model and Genetic Algorithm	462
F. Naseri- M. Azari- M.T. Dastoorani	
Validation of Aquacrop Model for Simulating Wheat Yield in Different Irrigation Events	473
M. R. Emdad -A. Tafteh- S. Ghalebi	
Study of Salinity Changes in Soil Profile of Four Agricultural Crops in Qazvin Plain under Drip-Tape Irrigation with AquaCrop Model	487
H. Ramezani Etedali- M. Pashazadeh- B. Nazari- A. Sotoudehnia- A. Kaviani	
Evaluation the Effects of the Irrigation Water Salinity and Water Stress on Yield Components of Cherry Tomato	500
J. Ramezani Moghaddam- Y. Hosseini- M. R. Nikpour- A. Abdoli	
Investigating the Effect of Partial Root Zone Drying (PRD) Deficit Irrigation at Different Irrigation Intervals on Water Use Efficiency and Growth Parameters of Sunflower Plant	516
M. Cheraghizade- A. Shahnazari- M. Kh. Ziatabar Ahmadi	
Effect of Cadmium on Vegetative Traits, Physiological and Biochemical Indexes of Radish (<i>Raphanus sativus</i> L.)	529
K. Dalvand Gomari- S.A. Eftekhari	
Evaluation Biosorption of Cadmium (II) from Aqueous Solution by Modified <i>Ceratophyllum demersum</i> L.	545
H. Shokripour- M. Golabi- H. Moazed- N. Jaafarzadeh Haghighi Fard	
Application Effects of Organic Acids on Growth of Forage Corn and Concentration of Nutritional Elements in Shoots and Roots	558
A. Hassani- M. Etemadian- M. Nourzadeh Haddad- M. Hanifei	
Inoculation of Plant Growth Promoting Bacteria on Yield, Stomatal Conductance and Chlorophyll Index of Corn under Potassium Deficiency	572
M. Leylasi Marand- M.R. Sarikhani	
Effects of Treated Wastewater Irrigation on Heavy Metals Concentration, Distribution and Contamination of Soil	585
B. Atashpaz- S. Rezapour- N. Ghaemian	
Effect of Land Use Change on some Physicochemical and Biological Properties of the Soils of Servak Plain, Yasouj Region	599
F. Mehmandoost- H.R. Owliaie- E. Adhami- R. Naghiha	
Applicability of AgMERRA for Gap-Filling of Afghanistan <i>in-situ</i> Temperature and Precipitation Data	616
A. R. Razavi- M. Nassiri Mahallati- A. Koocheki- A. Beheshti	
Impact of Climate Change on Sudden Changes in Potential Evapotranspiration Time Series (Case Study: NW of Iran)	632
Y. Dinpashoh- M. Foroughi	
Prediction of Zayandeh Rood Dam Inflow and Hydrological Wet and Dry Periods Using Bayesian Networks	646
P. Noorbeh- A. Roozbahani- H. Kardan Moghaddam	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 32

No. 2

2018

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Astaraei, A. R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghaemi, A.A.	Irrigation and Drainage	Assoc. Prof., Shiraz University
Kamali, Gh.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Islamic Azad University, Tehran
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Kiani, A.R.	Irrigation and Drainage	Prof., Agricultural and Natural Resources Res. Center of Golestan Province
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mahdian, M.H.	Irrigation and Drainage	Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Assoc. Prof., Tabrzi University
Sanaei-Nejad, S.H.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Printed by: Ferdowsi University of Mashhad, Press.

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 511 8787430

E-Mail: jsa3@um.ac.ir

Web Site: <http://jm.um.ac.ir>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).