

پیامد بایوجار و باکتری <i>آزوسپرلیوم لیپوفرورم</i> بر عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آب در برنج رقم طارم هاشمی در دو رژیم آبیاری غرقابی و تناوبی ۱۰۰۳	محمد کاوه - محمد علی اسماعیلی - همت اله پیردشتی - محمدرضا اردکانی
تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشانی و کشت مستقیم بذر ۱۰۱۹	مریم کریمی‌فرد - مهدی ذاکری‌نیا - علیرضا کیانی - محمدتقی فیض‌بخش
پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی (حوزه آبخیز قلعه گرگ شوشتر) ۱۰۳۳	محمدرضا انصاری - فریدون سلیمانی - علیرضا احمدی
تأثیر سوبه‌های برتر <i>باسیلوس</i> و <i>استافیلوکوکوس</i> جداسازی شده از دیم‌زارها بر شاخص‌های کمی و کیفی گندم در شرایط تنش ۱۰۴۷	ابراهیم شیرمحمدی - حسینعلی علیخانی - احمدعلی پوریبائی - حسن اعتصامی
معرفی کی‌لیت‌های اسید آمینه و کیتوسان آهن به عنوان منبع قابل دسترس آهن در محلول غذایی برای گیاهان با استراتژی I و II ۱۰۶۱	آتنا میربلوک - میر حسن رسولی صدقیانی - ابراهیم سپهر - امیر لکزیان - محمد حکیمی
مقایسه دو سامانه آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵) در رده‌بندی خاک‌های مناطق ایران‌شهر و دلتگان، استان سیستان و بلوچستان ۱۰۸۱	صالح سنجرى - محمد هادی فرپور - مجید محمودآبادی - سعید برخوردی
بررسی مقایسه‌ای اثر تیمارهای آبی، زیستی و اسیدزا بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی در یک خاک آهکی ۱۰۹۳	شبنم حقیقی - زاهد شریفی
بررسی تأثیر بایوجارهای مهندسی شده بر سینتیک و جذب سرب در خاک آهکی آلوده ۱۱۰۹	زهرا دیانت مهارلوئی - مجید فکری - مجید محمود آبادی - اسما سلجوقی - مجید حجازی مهریزی
بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای گندم آبی در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز ۱۱۲۵	رسول میرخانی - علی‌رضا واعظی - حامد رضایی
الگوهای کاربردی جدید برآورد میانگین دمای روزانه در نواحی مختلف اقلیمی ایران ۱۱۴۱	بهاره میرکاماندار - سید حسین ثنائی نژاد - حجت رضائی پزند - محبوبه فرزندی
تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هوشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم با رویکرد کاپولا در استان فارس ۱۱۵۷	سیدمعین فرمان‌آراء - بهرام بختیاری - نسرین سیاری
آشکارسازی چگونگی واکنش خطی-غیرخطی و ترکیبی تبخیر پتانسیل به متغیرهای هواشناسی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز) ۱۱۷۵	حمید میرهاشمی
واکاوی روند تغییرات بلند مدت تراز فشار و ردايست بر روی جو ایران در فصول گرم و سرد ۱۱۸۹	حسین عساکره - سید ابوالفضل مسعودیان - محمد دارند - سوما زندکریمی

Effect of Biochar and <i>Azospirillum lipoferum</i> bacteria on Yield and Water Use Efficiency Indices of Tarom Hashemi Rice Cultivar under Flooded and Alternation Irrigation Regimes..... 1018	M. Kaveh- M.A. Esmacili- H. Pirdashti- M.R. Ardakani
The Effect of Trickle and Sprinkler Irrigation Systems on Yield and Water Productivity of Rice in Transplanting and Direct Cultivation Methods 1032	M. Karimi Fard - M. Zakerinia - A.R. Kiani - M.T. Feyz Bakhsh
Evaluation and Zonation of Sensitive Areas to Gully Erosion Using Fuzzy Logic (Case Study: Ghaleh Gorg Watershed- Shushtar)..... 1045	M.R. Ansari - F. Soleimani - A.R. Ahmadi
Effect of Super Strains of <i>Bacillus</i> and <i>Staphylococcus</i> Isolated from Dryland Farming on Quantitative and Qualitative Indices of Wheat under Stress Condition 1059	E. Shirmohammadi - H.A. Alikhani- A.A. Pourbabae- H. Etesami
Introducing Amino Acid and Chitosan Iron Chelates as Available Sources of Iron in Nutrient Solutions by Strategy I and II Plants 1079	A. Mirbolook - M.H. Rasouli Sadaghiani - E. Sepehr- A. Lakzian- M. Hakimi
Comparison of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in Classification of Soils in Iranshahr and Dalghan Regions, Sistan and Baloochestan Province..... 1091	S. Sanjari - M.H. Farpoor- M. Mahmoodabadi- S. Barkhori
Comparative Survey of Organic Matter, Biological and Acid-causing Treatments Effects on Availability of Nutrient Elements in a Calcareous Soil 1107	Sh. Haghighi - Z. Sharifi
Investigating the Effect of Engineered Biochars on Lead Desorption Kinetics in Contaminated Calcareous Soils 1124	Z. Dianat Maharluei - M. Fekri- M. Mahmoodabadi- A. Saljooqi- M. Hejazi
Investigation of the Soil Quality Indices in Irrigated Wheat Farms of Nazarabad Region in West of Alborz Province..... 1139	R. Mirkhani- A.R. Vaezi- H. Rezaei
Regression Patterns of Diurnal Temperature in Different Climatic Regions of Iran 1156	B. Mirkamandr- H. Sanaeinejad- H. Rezaee-Pazhand - M. Farzandi
Meteorological Drought Characteristics Analysis under Climate Change Effect Using Copula in Fars Province..... 1173	S.M. Farmanara - B. Bakhtiari- N. Sayari
Linear, Nonlinear and Hybrid Response of Potential Evaporation to Meteorological Variables (Case Study: Tabriz Synoptic Station) 1188	H. Mirhashemi
Evaluating the Long Term Trend Effects of Wordist Height on Barley in Warm and Cold Season Across Iran..... 1202	H. Asakereh - S.A. Masodian - M. Darand - S. Zandkarimi

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 34 شماره 5 آذر - دی سال 1399

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)	اوستان، شاهین
استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)	تقوایان، صالح
استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)	خرمالی، فرهاد
استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)	علیزاده، امین
استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	فتوت، امیر
استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)	قدیری، حسین
دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)	کمالی، غلامعلی
استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	لکزیان، امیر
استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)	لیاقت، عبدالمجید
استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)	مساعدی، ابوالفضل
استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)	موسوی بایگی، محمد

ناشر: انتشارات 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 (شش شماره در سال) منتشر می شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 1003 پیامد بایوجار و باکتری آروسپرلیوم لیوفروم بر عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آب در برنج رقم طارم هاشمی در دو رژیم آبیاری
غرقابی و تناوبی
محمد کاوه - محمد علی اسماعیلی - همت اله پیردشتی - محمدرضا اردکانی
- 1019 تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشائی و کشت مستقیم بذر
مریم کریمی فرد - مهدی ذاکری نیا - علیرضا کیانی - محمدتقی فیض‌بخش
- 1033 پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی (حوزه آبخیز قلعه گرگ شوستر)
محمدرضا انصاری - فریدون سلیمانی - علیرضا احمدی
- 1047 تأثیر سویه‌های برتر باسیلوس و استافیلوکوکوس جداسازی شده از دیم‌زارها بر شاخص‌های کمی و کیفی گندم در شرایط تنش
ابراهیم شیرمحمدی - حسینعلی علیخانی - احمدعلی پوربابائی - حسن اعتصامی
- 1061 معرفی کی‌لیت‌های اسید آمینه و کیتوسان آهن به عنوان منبع قابل دسترس آهن در محلول غذایی برای گیاهان با استراتژی I و II
آتنا میربلوک - میر حسن رسولی صدقیانی - ابراهیم سپهر - امیر لکزیان - محمد حکیمی
- 1081 مقایسه دو سامانه آمریکایی (2014) و جهانی (2015) در رده‌بندی خاک‌های مناطق ایران‌شهر و دلگان، استان سیستان و بلوچستان
صالح سنجرى - محمد هادی فرپور - مجید محمودآبادی - سعید برخوردار
- 1093 بررسی مقایسه‌ای اثر تیمارهای آلی، زیستی و اسیدزا بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی در یک خاک آهکی
شنو حقیقی - زاهد شریفی
- 1109 بررسی تأثیر بایوجارهای مهندسی شده بر سینتیک و جذب سرب در خاک آهکی آلوده
زهره دیانت مهارلویی - مجید فکری - مجید محمود آبادی - اسما سلجوقی - مجید حجازی مهریزی
- 1125 بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای گندم آبی در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز
رسول میرخانی - علی‌رضا واعظی - حامد رضایی
- 1141 الگوهای کاربردی جدید برآورد میانگین دمای روزانه در نواحی مختلف اقلیمی ایران
بهاره میرکماندار - سید حسین ثنائی نژاد - حجت رضائی پزند - محبوبه فرزندی
- 1157 تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم با رویکرد کاپولا در استان فارس
سیدمعین فرمان‌آراء - بهرام بختیاری - نسرین سیاری
- 1175 آشکارسازی چگونگی واکنش خطی - غیر خطی و ترکیبی تبخیر پتانسیل به متغیرهای هواشناختی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)
حمید میرهاشمی
- 1189 واکاوی روند تغییرات بلند مدت تراز فشار وردایست بر روی جو ایران در فصول گرم و سرد
حسین عساکره - سید ابوالفضل مسعودیان - محمد دارند - سوما زندکریمی

مقاله علمی-پژوهشی

پیامد بایوجار و باکتری آروسپریلیوم لیوفروم بر عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آب در برنج رقم طارم هاشمی در دو رژیم آبیاری غرقابی و تناوبی

محمد کاوه^۱ - محمد علی اسماعیلی^{۲*} - همت اله پیردشتی^۳ - محمدرضا اردکانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

چکیده

به منظور بررسی پیامد بایوجار به همراه کود نیتروژن، باکتری آروسپریلیوم لیوفروم و روش‌های مدیریت آبیاری بر عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آب در زراعت برنج، پژوهشی در دو سال زراعی ۱۳۹۶ و ۹۷ در مزرعه‌ی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، به صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. عامل اصلی، شیوه آبیاری در دو سطح آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی و عامل فرعی تیمار کودی در نه سطح، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیتروژن به همراه ۲۰، ۱۰ و صفر تن بایوجار در هکتار و عامل فرعی - فرعی جدایه خالص باکتری آروسپریلیوم لیوفروم در دو سطح بدون مایه‌زنی و مایه‌زنی نشا در ۳ تکرار انجام شد. نتایج نشان داد که تیمارهای کودی بایوجار + نیتروژن، باکتری و شیوه آبیاری بر عملکرد شلتوک، میزان مصرف آب و شاخص‌های بهره‌وری آب اثر معنی‌داری داشت. در بررسی برهم‌کنش فاکتورها مشخص گردید که تیمار کودی ۷۵ درصد نیتروژن به همراه ۲۰ تن بایوجار در آبیاری غرقاب با باکتری و در آبیاری تناوبی بدون مصرف باکتری موجب بدست آوردن بیشترین میزان عملکرد شلتوک و شاخص‌های CPD و BPD با اختلاف معنی‌داری شده و در شاخص NBPD در حالت غرقاب بیشترین میزان مربوط به ۷۵ درصد نیتروژن و ۲۰ تن بایوجار، به همراه باکتری و در آبیاری تناوبی مربوط به ۵۰ درصد نیتروژن به همراه ۲۰ تن بایوجار و بدون باکتری بوده است، که البته میزان این تاثیر گذاری در آبیاری تناوبی به مراتب چشم‌گیر تر بود. گمان می‌رود می‌توان با اعمال ترکیب کودی ۷۵ درصد نیتروژن به همراه ۲۰ تن بایوجار در آبیاری تناوبی، کاهش عملکرد حاصل از کم شدن مصرف آب را تا حد زیادی جبران نمود.

واژه‌های کلیدی: آروسپریلیوم لیوفروم، بایوجار، برنج، شاخص بهره‌وری آب

مقدمه

شده، نشان از این دارد که بیش از ۳۱ درصد از حجم آبی که در کشور مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای تولید در کشاورزی است و بیشترین حجم هدررفت آب نیز مربوط به همین بخش است (۳). به طوری که ۶۲ درصد آن به علت شیوه‌های نادرست آبیاری هدر می‌رود (۲۴). بنابراین برای رفع مشکل کنونی، چاره‌ای جز افزایش بهره‌وری و همچنین استفاده بهینه از آب وجود ندارد.

بومان و همکاران (۱۰) گزارش کردند برنج بیشترین مقدار مصرف آب را در بین محصولات کشاورزی دارا بوده و حدود ۸۰ درصد کل منابع آب شیرین مصرفی آسیا را شامل می‌شود. عربزاده (۴) گزارش کرد که یکی از مهم‌ترین مسائل و مشکلات در آبیاری در بخش

کشاورزی به عنوان یکی از بخش‌های حیاتی نقش بسیار حساسی در برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی دارد. در این میان کشت برنج دارای ارزش و اهمیت ویژه‌ای بوده و پس از گندم، غذای اصلی مردم جهان را تشکیل می‌دهد (۳۱ و ۳۲). روند تغییرات سطح زیرکشت آبی در جهان نشان می‌دهد که برخلاف گذشته سرعت افزایش این روش کاشت سال به سال رو به کاهش است، زیرا زمین مناسب کشت آبی که دارای آب کافی و مناسب باشد، تقریباً نایاب گردیده است (۹). بخش کشاورزی، بیش‌ترین مصرف‌کننده منابع آب کشور است و ارقامی که در گزارش‌های گوناگون در این زمینه ارائه

۴- استاد گروه زراعت، دانشگاه آزاد، واحد کرج

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81493

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری فیزیولوژی گیاهان زراعی و دانشیار، گروه

زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

(*)- نویسنده مسئول: (Email: esmaeilim550@gmail.com)

۳- استاد گروه زراعت، پژوهش‌شده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان،

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

در پژوهشی نشان داده شد که بایوچار سبب افزایش گنجایش نگه داری آب در خاک می‌شود (۳۰). افزایش آب قابل دسترس در خاک در پی افزودن بایوچار به آن، به دلیل سطح ویژه بالای بایوچار و نقشی است که این ماده در بهبود توزیع اندازه ذرات خاک و تخلخل خاک ایجاد می‌کند (۳۹). در همین راستا گلب و همکاران (۱۷) در یک آزمایش گلخانه‌ای با افزودن مقدار ۴ درصد وزنی بایوچار ساقه گندم به یک خاک ماسه‌ای، به ترتیب افزایش ۶/۶۵ درصدی رطوبت در حد گنجایش زراعی، ۶/۵۹ رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس را گزارش کردند (۲۸).

بایوچار در برابر تجزیه توسط ریزجانداران خاک بسیار مقاوم است و در نتیجه در درازمدت هم روی کیفیت خاک تأثیر دارد. در این راستا، لمان (۲۷) اظهار داشت که کاربرد بایوچار یک رویکرد موفق در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است و منجر به افزایش تولید محصول می‌شود. سطح ذرات خاک، پارامتر فیزیکی مهمی است که تهویه و فعالیت میکروبی خاک را کنترل می‌کند (۱۲). بایوچار فعالیت انواع مختلف میکروب‌های خاک را که از نظر کشاورزی مهم هستند، تحریک می‌نماید (۶). وجود خلل و فرج در بایوچار با حفاظت میکروب‌ها در مقابل شکار شدن و خشکی و هم چنین تأمین نیاز کربنی، انرژی و عناصر معدنی محل مناسبی را برای زیستن ریزجانداران فراهم می‌آورد (۴۵).

آزوسپیریوم^۵ یکی از شناخته شده‌ترین ریزجاندارانی است که می‌تواند در رایزوسفر غلات و پیرامون ریشه آن‌ها کلونی تشکیل دهد. گروهی از باکتری‌های مفید خاک‌زی که سبب افزایش رشد گیاه می‌شوند اصطلاحاً تحت عنوان باکتری‌های افزایش‌دهنده رشد گیاه (PGPR)^۶ نامیده می‌شوند و در حال حاضر به صورت یکی از مهم‌ترین انواع کودهای زیستی به کار برده می‌شوند (۴۸). نتایج بسیاری از پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بودن باکتری‌های سودمند در رایزوسفر و اندورایزوسفر گیاه میزبان، پیامدهای چشم‌گیری در بهبود شاخص‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه و در نتیجه افزایش محصول پدید می‌آورد. به گونه‌ای که می‌توان رابطه متقابل برنج با *آزوسپیریوم* را از جهت آثار مفید باکتری بر رشد گیاه، قابل قیاس با همزیستی گیاهان لگوم و باکتری‌های *رایزوبیوم*^۷ دانست (۱۵).

مصرف بی‌رویه آب در آبیاری غرقاب بیانگر نیاز مبرم به سایر روش‌های مدیریتی در کشاورزی برنج اعم از تغییر روش آبیاری و استفاده از کودهای زیستی است. استفاده از کود بایوچار به همراه باکتری‌های تثبیت کننده نیتروژن در آبیاری تناوبی برنج، می‌تواند

کشاورزی ایران، پایین بودن بازده آبیاری است. از دیگر عواملی که موجب پایین آمدن بازده آبیاری و هدررفت بالای آب می‌شود، می‌توان به سنتی بودن روش‌های آبیاری و توزیع نامناسب آب اشاره نمود. رضایی و نحوی (۳۴) در بررسی پیامد دور آبیاری در کشت برنج به این نتیجه رسیدند که یکی از راه‌های چیره شدن بر مشکل پایین بودن بهره‌وری آب آبیاری و مصرف بیش از اندازه آب در آبیاری غرقابی، استفاده از روش آبیاری تناوبی یا تر و خشک کردن شالیزارها است. روش‌های مدیریتی، کشت نیمه خشک (SDC)^۱ تناوب خشکی و رطوبت (AWD)^۲ و ترکیب آب کم عمق با تناوب خشکی و رطوبت (SWD)^۳ از انواع روش‌های کم آبیاری در برنج هستند. رودریک و همکاران (۳۵) در پژوهشی نتیجه گرفتند که روش کم آبیاری تناوب خشکی و رطوبت (AWD) در حدود ۳۸٪ مصرف آب آبیاری شالیزار را کاهش داده است. روش آبیاری تناوبی به منظور کاهش مصرف آب و نیز جلوگیری از پیامدهای ناسودمند آب‌گرفتگی دایم در شالیزار اجرا می‌شود و در واقع به معنی رساندن آب دوره‌ای و با فواصل معین است؛ به طوری که در این روش به جای این که شالیزار در طول فصل رشد همیشه غرقاب باشد، به صورت ناپیوسته به مزرعه خشکی اعمال می‌گردد (۵). به عبارت دیگر، به جای اینکه پای بوته‌ها پیوسته در آب باشد، فقط در مواقع لزوم و به اندازه مورد نیاز، آب به گیاه داده می‌شود (۳۷). همچنین گزارش شده است که اگرچه نظام آبیاری مبتنی بر صرفه‌جویی در آب، مانند رژیم آبیاری تناوبی، ترکیب آب کم عمق با خشکی و رطوبت و رژیم آبیاری تناوب خشکی و رطوبت می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری آب شود، اما این روش‌ها بیشتر باعث کاهش عمل کرد می‌گردند که می‌توان با روش‌های به‌زراعی و به نژادی آن را بهبود بخشید (۱۱). یکی از مهم‌ترین اصول به‌زراعی بهبود کیفیت فیزیکی خاک است که به شدت تولید محصول را هم تحت تأثیر قرار می‌دهد.

به تازگی پژوهش‌گران علاقه‌مند به کاربرد از نوعی از کربن آلی سیاه رنگ مقاوم به تجزیه با عنوان بایوچار^۴ در کشاورزی گرایش پیدا کرده‌اند (۴۱). بایوچار ماده‌ای جامد و پایدار به شکل زغال است که دارای کربن بالا به صورت زنجیره‌ای می‌باشد و از تجزیه حرارتی^۵ دورریزهای زیستی گیاهی (زیست‌توده)، در نبود اکسیژن به وجود می‌آید (۳۶). تولید بایوچار ۱۰ سال برای کاهش انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از تجزیه عادی بقایای گیاهی به جو است، اما این ماده کاربردهای دیگری نیز در مدیریت خاک و آب پیدا کرده است (۲۶).

5- Pyrolysis

6- *Azospirillum*

7- Plant Growth Promoting Rhizobacteria

8- *Rhizobium*

4- De Martounne

1- Semi-Dry cultivation

2- Alternate wet and drying

3- Combining shallow water depth with wetting and drying

4- Biochar

که مرحله کربونیزاسیون و تشکیل شبکه متخلخل بود گرمازا بود که ۲ ساعت طول کشید و در گام پایانی کربن‌های تولید شده به دمای محیط رسیدند. برای تولید نانو مواد کربنی در یک کوره دوار به طول ۱۰ متر و قطر ۱۰۶ سانتی‌متر و با سرعت بارگیری ۶۰ کیلوگرم بر ساعت قرار گرفتند. سپس با تغییرات زمان ماند مواد در کوره و تغییرات درجه حرارت از ۹۰۰ تا ۱۰۵۰ درجه سلسیوس و میزان مواد فعال ساز، بخار آب و اکسیژن و تغییرات زاویه مواد نانو با حفره‌های گوناگون تهیه شدند. در پایان نیز مخلوط کردن بایوچار با نانو و تهیه نانو بایوچار در یک مخلوط کن انجام گرفت (۱۸) (جدول ۲).

پیش از نشاکاری کود بایوچار و اوره به میزان محاسبه شده (بر اساس آزمون خاک در هکتار اوره (جدول ۱)) (۲۹) برای هر کرت تقسیم و جدا شده و در هر کرت پخش و بخوبی مخلوط شد. سپس برای تکرارهای با آبیاری تناوبی از روش ابداعی ابری (۲۰) استفاده گردید. در این روش در لوله‌های پی‌وی‌سی به ارتفاع ۲۰ و قطر پنج سانتی‌متر، با مته برقی سوراخ‌های زیاد ایجاد گردید و لوله‌ها به صورت مشبک درآمدند (برای نفوذ آب به درون لوله). لوله‌ها پیش از کشت نشاها در کرت‌ها قرار گرفتند و سپس تمامی گل و لای موجود و نشته یافته در لوله‌ها تا کف تخلیه گردید. برای کنترل سطوح آبیاری با استفاده از خط‌کش مدرج میزان سطح آب در داخل لوله‌های کار گذاشته شده در کرت‌ها، روزانه بازمینی و بررسی شد و در صورت نیاز و بر اساس سطوح تعریف شده روش ابداعی ابری، آبیاری انجام شده و مقدار آن یادداشت گردید. برای اندازه‌گیری آب ورودی مزرعه ابتدا در طول همهی تکرارها لوله‌های پلی‌اتیلن به موازات تکرارها کشیده شد و بر روی هر یک از لوله‌ها در کنار هر کرت لوله‌های فرعی همراه با شیر فلکه قرار گرفت که آب را از لوله اصلی به هر کرت به صورت جدا هدایت می‌کرد. همچنین در ابتدای هر لوله اصلی که هر تکرار را آبیاری می‌کرد یک شیر فلکه گنجانده شد. در ورودی مزرعه نیز کنترل آب قرار گرفت تا بتوان آب وارد شده به هر تکرار و کل مزرعه را اندازه‌گیری و محاسبه نمود. برای مایه‌زنی باکتری با ریشه‌های گیاه برنج، ابتدا نشاهای جوان در گام ۳/۵ تا ۴ برگ از خزانه خارج و ریشه‌ها به طور کامل مورد شست و شو قرار گرفت. سپس تعداد مشخصی از آنها درون تشت که از پیش درون آن ۱۰ لیتر آب به همراه یک لیتر زادمایه باکتری *آزوسپریلیوم لیپوفرورم* (تهیه شده از موسسه آب و خاک کرج) ریخته شده بود به همراه ۱۵ گرم از ماده کربوکسی متیل سلولز (CMC) برای افزایش میزان چسبندگی باکتری‌ها به ریشه به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شدند. در پایان نشاها به زمین اصلی انتقال داده شدند. اندازه‌گیری عملکرد شلتوک در پایان فصل رشد (۹۵ روز) با برداشت بوته از چهار متر مربع از وسط هر کرت با رطوبت ۱۲ درصد اندازه‌گیری شد (۴۶).

راهکار مناسبی برای کاهش مشکلات ذکر شده باشد. بنابراین، هدف از این پژوهش تعیین میزان بهره‌وری مصرف آب در روش‌های مدیریتی جدید از جمله تغییر روش آبیاری و استفاده از کودهای زیستی و آلی، در نظر گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در مزرعه‌ی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۱ متر پایینتر از سطح دریای آزاد اجرا شد. بر اساس طبقه‌بندی دومارتن^۴، نواحی شرقی مازندران دارای اقلیم مدیترانه‌ای می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان مازندران)، در دو سال زراعی ۱۳۹۶ و ۹۷، به صورت کرت‌های دو بار خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اجرا شد. رقم مورد استفاده برنج طارم هاشمی بود. عامل اصلی، شیوه آبیاری در دو سطح آبیاری غرقاب و آبیاری تناوبی و عامل فرعی تیمار کودی در نه سطح، ۱۰۰ درصد نیتروژن (توصیه شده بر اساس آزمون خاک (جدول ۱)) (۲۹). ۱۰۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار، ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوچار (در هکتار)، ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار، ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوچار، ۷۵ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوچار، ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوچار، ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار، ۵۰ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوچار، ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار بود. عامل فرعی-فرعی نیز جدا به خالص باکتری *آزوسپریلیوم لیپوفرورم*^۱ در دو سطح بدون مایه‌زنی با نشا و با مایه‌زنی با نشا بود. آزمایش در ۳ تکرار و در دو سال پشت سرهم انجام شد. در پایان اردیبهشت ماه نمونه‌های خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتیمتر قبل از آماده سازی زمین گرفته شد سپس کارهای شخم بهاره، ماله کشیدن، پادینگ (گل خرابی) و تراز کردن انجام و سپس نقشه طرح، در زمین پیاده شد. برای اطمینان از ترکیب نشدن آب کرت‌ها (به ابعاد ۲×۴ متر مربع) با هم و همچنین برای جلوگیری از نشست آب، کود و باکتری‌ها، مرز کرت‌ها تا عمق نیم متری پوشش نایلونی کشیده و هم‌تراز شد و برای نشاکاری آماده گردید.

روش تهیه بایوچار

در ابتدا برای تولید بایوچار مواد اولیه سلولزی شامل بقایای چوب و گیاهان زراعی تهیه و دسته‌بندی شدند. سپس جهت تبدیل مواد سلولزی به کربن در شرایط بی‌هوازی، مواد سلولزی در ابتدا در درجه حرارت ۱۱۰ درجه سلسیوس جهت تبخیر آب موجود به مدت ۲ ساعت قرار گرفتند. سپس به مدت ۳ ساعت در درجه حرارت ۲۸۰ درجه سلسیوس برای بیرون رفتن مواد فرار قرار داده شدند. واکنش بعدی

جدول ۱- خصوصیات خاک
Table 1- Soil characteristics

پتاسیم قابل جذب (K)	فسفر قابل جذب (P)	نیتروژن (N)	هدایت الکتریکی (Electric conductivity)	اسیدیته اشباع (Saturated acidity)	ماده آلی (Organic matter)	کربن آلی (Organic carbon)	بافت خاک (Soil texture)	رس (Clay)	سیلت (Silt)	شن (Sand)
mg/kg	mg/kg	%	dS/m		%	%		%	%	%
186	5	0.19	0.6	8.4	3.39	1.96	لومی رسی (loam clay)	31	28	41

جدول ۲- ویژگی‌های بایوچار استفاده شده
Table 2- Biochar properties used

ویژگی‌های بایوچار (Biochar properties)	عدد ید (Iodine number)	مساحت سطح بر اساس استاندارد ASTM (ASTM Surface area according to standard ASTM)	عدد متیلن بلو (Methylene blue number)	محتوای رطوبت (Moisture content)	pH	درصد خاکستر (Ash %)	درصد کربن (C %)	نیتروژن (N)	دانه بندی (Grading)
mg/g	mg/g	m ² /g	(mg/g)	(%)		%	%	(g/kg)	
مقدار	950-1100	950-1100	150-250	3-4	5.8	4-5	48-50	18-20	0.1≥

معادله ۳) $NBPD = NB/TWc$

تجزیه داده‌ها، به صورت آنالیز واریانس مرکب طرح کرت‌های دو بارخرد شده^۱ در دو سال با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۲ و مقایسه میانگین‌ها در صورت معنی‌داری پیامد عامل‌ها در جدول تجزیه واریانس، با استفاده از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح پنج درصد انجام شد. همچنین، در جدول تجزیه واریانس پیامدهای شیوه آبیاری، کود و باکتری ثابت و اثر سال تصادفی در نظر گرفته شد.

نتایج و بحث

عملکرد شلتوک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پیامدهای ساده شیوه آبیاری، کود و باکتری و برهم‌کنش دوگانه شیوه آبیاری × کود و کود × باکتری و برهم‌کنش سه‌گانه شیوه آبیاری × کود × باکتری در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد معنی‌دار بود (جدول ۳).

مقایسه میانگین برهم‌کنش سه‌گانه مشخص کرد (جدول ۴) که در حالت آبیاری غرقاب، مصرف ۷۵ در صد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار، به همراه مایه‌زنی با باکتری، بالاترین عملکرد شلتوک را تولید نمود (ولی این تیمار تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن به همراه ۲۰ تن بایوچار با مصرف باکتری نداشته است). این در حالی بود که مصرف ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار بدون مایه‌زنی باکتری

شاخص بهره‌وری مصرف آب

برای تعیین بهره‌وری آب کشاورزی از سه شاخص CPD، BPD و NBPD استفاده می‌شود (۲۱). شاخص CPD در واقع نسبت مقدار محصول تولید شده به حجم آب مصرف شده در هکتار است. که در آن TP مقدار محصول تولید شده (کیلوگرم در هکتار) و TWc حجم آب مصرف شده (مترمکعب) در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی می‌باشد.

معادله ۱) $CPD = TP/TWc$

شاخص BPD در واقع نسبت میزان سود ناخالص (درآمد) در هر هکتار به ازای واحد حجم آب (مترمکعب در هکتار) می‌باشد. که در آن TR مقدار ارزش کل فروش محصول در هکتار (ریال) است. TWc حجم آب مصرف شده (مترمکعب) در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی می‌باشد. در این روش هزینه‌ی تولید محصول در نظر گرفته نمی‌شود.

معادله ۲) $BPD = TR/TWc$

بهترین شاخص برای بررسی بهره‌وری آب کشاورزی NBPD یا سود خالص به ازای واحد آب مصرفی می‌باشد که میزان سود خالص را به ازای واحد حجم آب مصرف شده تعیین می‌نماید. این شاخص اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی الگو و ترکیب کشت در مناطق خشک مواجه با محدودیت شدید آب دارد. که در آن NB میزان سود خالص (ریال) در هر هکتار است. TWc حجم آب مصرف شده (مترمکعب) در هکتار بدون در نظر گرفتن بارندگی می‌باشد.

نسبت به غرقاب بیشتر به چشم می‌آید. در واقع در آبیاری تناوبی، باکتری در مقادیر کمتر کود نیتروژن بهتر عمل می‌کند. در همین راستا لهمان و همکاران، (۲۵) بیان داشتند که بايوچار به عنوان ماده افزوده شده به خاک، توانایی تحریک ریزجانداران مفید خاک را داراست. بايوچار با تأثیر مثبت بر کارایی مصرف منابع و نهاده‌های کشاورزی و عمل کرد گیاهان زراعی به دلیل سطح ویژه بالا بیشتر در بهبود راندمان تولیدات زراعی (۳۸) و کاهش هدر رفت نیتروژن (دنیتریفیکاسیون) و افزایش کارایی ریز جانداران مفید تثبیت کننده نیتروژن در نتیجه جذب بیشتر نیتروژن (۴۳) تأثیر بسزایی دارد.

همچنین جدول ۴ نشان می‌دهد که در آبیاری غرقاب تفاوت میزان عملکرد شلتوک بین کمترین (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بايوچار و بدون باکتری) و بیشترین (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار و با باکتری) میزان آن، ۵۳/۶ درصد می‌باشد. در سوی دیگر، در شیوه تناوبی تفاوت بین کمینه (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بايوچار و بدون باکتری) و بیشینه (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار و بدون باکتری) این شاخص ۷۶/۹ درصد بود. همان گونه که بیان شد در هر دو شرایط آبیاری، تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار توانسته موجب افزایش عملکرد شلتوک شود ولی میزان این تأثیر در شرایط آبیاری تناوبی به مراتب بیشتر از غرقاب بوده است. گمان می‌رود کاربرد هم‌زمان کود شیمیایی و بايوچار به دلیل فراهمی بهتر آب و عناصر غذایی به ویژه نیتروژن سبب تحریک رشد و بهبود وزن خشک گیاه و در پی آن افزایش عملکرد برنج گردیده است. عارف و همکاران (۷) نیز بالاترین عملکرد بیولوژیک را در تیمار بايوچار به همراه کود شیمیایی و کمترین عملکرد بیولوژیک را در تیمار بايوچار تنها گزارش کردند. در پژوهشی با عنوان بررسی پیامد بايوچار، کمپوست و کود شیمیایی بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم مشخص شد که بیشترین تأثیر بايوچار در کاربرد آن به همراه کود شیمیایی و کمپوست است. پژوهش‌های گوناگونی پیامد افزایشی بايوچار در ترکیب با کودهای آلی و معدنی را نشان داده است (۱۶). افزایش عمل کرد در تیمارهای دارای بايوچار و کود به دلیل تأثیر بايوچار در نگهداری عناصر غذایی و جلوگیری از آب شویی و تصعید نیتروژن و در نتیجه دسترس بهتر گیاه به عناصر غذایی عنوان شده است. مصرف هم‌زمان بايوچار و کود شیمیایی بهتر از مصرف هر یک از این مواد به تنهایی بود که در پژوهش‌های دیگر (۷ و ۱۳) هم نشان داده شده است.

باعث تولید بیشترین عملکرد شلتوک در آبیاری تناوبی گردید. به دلیل آنکه در شیوه آبیاری تناوبی گیاه برنج بخشی از طول فصل رشد را در شرایط کم آبی سپری می‌کند، پس پیش‌بینی این است که عملکرد در مقایسه با شرایط غرقاب کمتر باشد (۳۳). توکلی و همکاران (۴۰) نیز بیشترین عملکرد شلتوک را در حالت غرقاب دائم مشاهده شد. با وجود این که کم آبیاری یک راهبرد بهینه و برتر برای تولید محصول در شرایط کمبود آب است، اما نخستین پیامد آن کاهش محصول در واحد سطح است. در همین راستا مقایسه بین کمترین عملکرد شلتوک که در هر دو شیوه غرقاب و تناوب آبیاری در تیمار مصرف ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بايوچار و بدون مصرف باکتری بدست آمد، نشان دهنده کاهش حدود ۵۴ درصدی عملکرد شلتوک در آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب می‌باشد. این درحالی است که مقایسه بین بیشترین عملکرد شلتوک در دو شیوه آبیاری غرقاب و تناوبی (در غرقاب در تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار همراه با باکتری و در آبیاری تناوبی در تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار بدون مصرف باکتری) نشان دهنده ۸/۲ درصد کاهش عمل کرد شلتوک در آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب می‌باشد. بر اساس یافته‌ها کاربرد ترکیب کودی از یک سو میزان اختلاف عمل کرد شلتوک را بین دو شیوه آبیاری کمتر کرده است و از سوی دیگر موجب کاهش مصرف کود نیتروژن شده که این امر نشان دهنده تأثیر مثبت آن می‌باشد (جدول ۴). به نظر می‌رسد بايوچار با افزایش گنجایش نگهداری آب در خاک توانسته است کاهش عمل کرد شلتوک برنج در شرایط آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب را جبران کند. در همین زمینه کورنلیسون و همکاران (۱۴) تأثیر بايوچار بر ویژگی‌های فیزیکی خاک را در سه خاک با بافت سبک، سنگین و متوسط بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که استفاده از بايوچار در خاک موجب افزایش آب قابل دسترس گیاه در هر سه خاک مورد آزمایش شد. آب قابل دسترس گیاه در خاک با بافت شنی بیشترین افزایش (از ۱۷ به ۲۱ دز صد) و در خاک با بافت رسی سیلتی کمترین افزایش (۲۲ به ۲۴ درصد) را داشت.

با بررسی نتایج همچنین مشخص شد که در شیوه آبیاری غرقاب، زمانی که باکتری مورد استفاده قرار نگیرد، ترکیب ۷۵ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بايوچار بهترین ترکیب کود در بالاترین عمل کرد شلتوک بود. در حالی که با مایه‌زنی باکتری ترکیب ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار عملکرد بالایی را نشان داد. همچنین در آبیاری تناوبی زمانی که مایه‌زنی باکتری نشده بود، ترکیب ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار بهترین ترکیب کودی برای بالاترین عملکرد شلتوک بود. و در صورت به کارگیری باکتری ترکیب ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بايوچار بالاترین عملکرد شلتوک را نشان داد. مشاهده می‌شود که در سطوح پایین تر مصرف نیتروژن کارایی باکتری برای دست‌یابی به عملکرد بالاتر بهتر از سطوح بالای مصرف نیتروژن بوده و کارایی مصرف باکتری در سطوح پایین تر مصرف نیتروژن در آبیاری تناوبی

جدول ۳- آنالیز واریانس مرکب طرح کرت های دوبار خرد شده در دو سال
Table 3- Combined analysis of variance of split-split plot design in two years

منبع تغییرات (S.O.V)	درجه ازادی (Df)	میانگین مربعات Mean Squares				
		عملکرد (Yeild)	آب (Water)	CPD	BPD	NBPD
سال (Year)	1	159494.42 ^{ns}	172381.5 ^{**}	0.01035421 ^{ns}	37275153 ^{ns}	2835278921 ^{**}
بلوک (سال) (Block) (Year)	4	66064.86	3413.1	0.00044039	1585410	2073364
شیوه آبیاری (Irrigation method)	1	34188587.28 ^{**}	502469209 ^{**}	1.82863011 ^{**}	6583068381 ^{**}	5085794960 ^{**}
سال × شیوه آبیاری (Year* Irrigation method)	1	23.52 ^{ns}	216 ^{ns}	0.00091670 ^{ns}	3300124 ^{ns}	2434668844 ^{**}
بلوک × شیوه آبیاری (سال) (Block* Irrigation method) (Year)	4	144153.21	477.1	0.00286733	10322371	8294234
کود (Fertilizer)	8	11910461.80 ^{**}	12295462.5 ^{**}	88710929 ^{**}	3193593450 ^{**}	2374134038 ^{**}
سال × کود (Year* Fertilizer)	8	206.39 ^{ns}	212.3 ^{ns}	0.00008827 ^{ns}	317756 ^{ns}	469510931 ^{**}
شیوه آبیاری × کود (Irrigation method* Fertilizer)	8	2245504 ^{**}	2135257.7 ^{**}	0.32491656 ^{**}	1169699617 ^{**}	1312819880 ^{**}
سال × شیوه آبیاری × کود (Year*Irrigation method* Fertilizer)	8	7.23 ^{ns}	4.31 ^{ns}	0.00005258 ^{ns}	189279 ^{ns}	469893469 ^{**}
بلوک × کود (سال × شیوه آبیاری) (Block* Fertilizer) (Year*Irrigation method)	64	149853.53	6033.5	0.00421456	15172406	11385157
باکتری (Bactria)	1	5581072.83 ^{**}	47704.2 ^{**}	0.09197787 ^{**}	331120320 ^{**}	432339115 ^{**}
سال × باکتری (Year* Bactria)	1	91.36 ^{ns}	88.2 ^{ns}	0.00002719 ^{ns}	97886 ^{ns}	34125837 ^{ns}
کود × باکتری (Fertilizer* Bactria)	8	6374198.05 ^{**}	9742.2 [*]	0.13898126 ^{**}	500332422 ^{**}	315029556 ^{**}
سال × کود × باکتری (Year* Fertilizer* Bactria)	8	1024.83 ^{ns}	1023.9 ^{ns}	0.00005642 ^{ns}	203120 ^{ns}	20335158 [*]
شیوه آبیاری × کود × باکتری (Irrigation method* Fertilizer* Bactria)	9	2643906.69 ^{**}	7305 ^{ns}	0.06955492 ^{**}	250397698 ^{**}	171661196 ^{**}
سال × شیوه آبیاری × کود × باکتری (Year*Irrigation method* Fertilizer* Bactria)	9	6.67 ^{ns}	3.72 ^{ns}	0.00000527 ^{ns}	18984 ^{ns}	22499509 [*]
خطای آزمایش (Error)	72	108124.60	3852.7	0.00304726	10970127	8991320
ضریب تغییرات (CV)		8.11	0.876287	9.003233	9.002323	10.73862

* و ** به ترتیب نشان دهنده معنی دار بودن در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد و ns به معنای غیر معنی دار بودن می باشد.

*and **: significant at 5 and 1% levels of probability, respectively; ns: not significant.

آب مصرفی

با توجه به جدول تجزیه واریانس داده ها (جدول ۳) مشخص شد که پیامدهای ساده شیوه آبیاری، کود و باکتری و برهم کنش دوگانه شیوه آبیاری × کود در سطح احتمال یک درصد و برهم کنش دوگانه کود × باکتری در سطح احتمال پنج درصد بر آب مصرفی معنی دار بود. با بررسی جدول مقایسه میانگین برهم کنش کود در شیوه آبیاری

(جدول ۵) مشخص شد که در آبیاری غرقابی کمترین میزان مصرف آب مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار بوده است که البته تفاوت معنی داری با تیمارهای ۷۵ و ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار از خود نشان نداده است. کمترین میزان آب مصرفی در شیوه آبیاری تناوبی مربوط به تیمار ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار بوده است که البته تفاوت معنی داری با تیمار ۷۵ درصد نیتروژن

مزرعه را به مدت بیشتری حفظ کند و موجب کاهش دفعات آبیاری و در پی آن کاهش مصرف آب گردد. در ضمن در تمامی تیمارهای کودی به غیر از ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۱۰ تن بایوپچار و ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار تفاوت معنی داری بین مایه‌زنی کردن و نکردن نشای برنج با باکتری در میزان آب مصرفی وجود نداشت.

CPD و BPD

به دلیل آنکه شاخص BPD حاصل ضرب عملکرد شلتوک در قیمت آن تقسیم بر آب مصرفی است، بنابراین از لحاظ مقایسه میانگین تفاوتی با شاخص CPD ندارد و تفاوت بین میانگین‌های آنها یکی است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که پیامدهای ساده شیوه آبیاری، کود و باکتری و برهم‌کنش‌های دوگانه شیوه آبیاری $\times$ کود و کود $\times$ باکتری و برهم‌کنش سه‌گانه شیوه آبیاری $\times$ کود $\times$ باکتری در سطح احتمال یک درصد بر شاخص CPD و BPD معنی‌دار بود (جدول ۳).

بر اساس نتایج مقایسه میانگین (جدول ۴ و ۷) معلوم گردید که که در آبیاری غرقاب بیشترین مقدار CPD (۰/۷۳۶۹) و BPD (۴۴۲۱۶) مربوط به تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار و به همراه مصرف باکتری بود. در حالی که بیشترین میزان CPD (۱/۲۸۹۱) و BPD (۷۷۳۴۴) در آبیاری تناوبی مربوط به تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار و بدون مصرف باکتری بدست آمد. که البته تفاوت معنی‌داری با تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار در هر دو شاخص وجود نداشت. کمترین میزان این دو شاخص در هر دو شیوه آبیاری مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار و بدون مصرف باکتری بود. در حقیقت شاخص CPD نشان دهنده میزان کیلوگرم عملکرد تولید شده در ازای یک متر مکعب آب مصرف شده می‌باشد بنابراین هر چه این نسبت بالاتر باشد نشان دهنده مصرف بهتر آب است، اما لزوماً نشان دهنده سود اقتصادی بیشتر نمی‌تواند باشد. چاودری و همکاران (۱۳) نیز در آزمایش‌های خود به تأثیر بیشتر تیمارهای دارای ترکیب کود شیمیایی و بایوپچار نسبت به تیمارهای دارای کود شیمیایی بدون کاربرد بایوپچار بر افزایش عملکرد محصول اشاره کرده و دلیل این امر را جلوگیری از آب شویی عناصر غذایی در تیمارهای دارای بایوپچار عنوان کردند. اگر تمام عناصر غذایی به مقدار کافی در خاک موجود بوده و خاک حاصل‌خیز باشد تفاوت کمی بین تیمارهای دارای بایوپچار و تیمارهای شاهد مشاهده شده است و تفاوت‌ها در خاک‌های تخریب شده و کم حاصل‌خیز بیشتر قابل مشاهده بوده است (۱۳).

در آبیاری غرقاب تفاوت بین کمترین (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار و بدون مصرف باکتری) و بیشترین (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار و مصرف باکتری) میزان شاخص CPD، ۵۸/۸ درصد بود.

+ ۲۰ تن بایوپچار از خود نشان نداده است. بیشترین میزان مصرف آب در شیوه آبیاری تناوبی به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار و در آبیاری غرقابی مربوط به تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار بوده است. کرر و همکاران (۲۲) گزارش کرده‌اند که کاربرد بایوپچار چوب راش در خاک با بافت لوم رسی آب قابل دسترس گیاه را به طور معنی داری افزایش داده اما در خاک با بافت لوم سیلتی اختلاف معنی‌داری بین تیمار شاهد با دیگر تیمارها مشاهده نشده. در آبیاری غرقاب مقایسه بین کمترین میزان مصرف آب (۲۰ تن بایوپچار + ۱۰۰ درصد نیتروژن) با بیشترین میزان مصرف آب (بدون بایوپچار + ۵۰ درصد نیتروژن) در آبیاری تناوبی و ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار در غرقاب) نشان از کاهش ۱۲/۶ درصدی مصرف آب داشت درحالی که همین مقایسه در آبیاری تناوبی کاهش ۵۲/۴ درصدی مصرف آب را نشان داد. در واقع در هر دو شیوه آبیاری با افزایش مصرف بایوپچار میزان آب مصرفی کاهش معنی داری داشت که این میزان کاهش در مصرف آب در آبیاری تناوبی به مراتب بیشتر بود. البورکرکی و همکاران (۲) نیز با بررسی پیامدهای پنج نوع بایوپچار متفاوت (هسته زیتون، پوسته بادام، کاه گندم، خرده چوب کاج و چوب زیتون) در یک خاک با بافت شن لومی دریافتند که کاربرد بایوپچار بطور کلی رطوبت گنجایش زراعی را بطور معنی‌داری افزایش داده و بیشترین افزایش مربوط به بایوپچار کاه گندم و خرده چوب کاج بود. لیو و همکاران (۲۸) و اتکینسون و همکاران (۸) نیز به نتایج مشابهی دست یافته‌اند. کینی و همکاران (۲۴) گزارش کردند که با کاربرد بایوپچار در خاک شنی اندازه آب در گنجایش زراعی (FC) ۲۵ درصد افزایش یافت و این افزایش به منبع بایوپچار و روش تهیه آن بستگی داشت. در خاک درشت بافت به علت اندازه کم ماده آلی گنجایش نگه‌دار آب پایین بود و با افزودن بایوپچار به خاک‌های شنی خلل و فرج ریز افزایش یافته و رطوبت خاک نیز افزایش می‌یابد. متخلخل بودن بایوپچار و دارا بودن یک سطح ویژه بالا می‌تواند دلیلی برای افزایش نگه‌داشت آب در خاک در پی کاربرد آن باشد.

در مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش باکتری و کود (جدول ۶) مشخص شد که کمترین میزان آب مصرفی مربوط به تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار با مصرف باکتری بود که البته تفاوت معنی داری با تیمارهای ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار و بدون مصرف باکتری و ۱۰۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوپچار با مصرف و بدون مصرف باکتری نداشت. در واقع می‌توان گفت که مصرف باکتری تأثیر معنی‌داری بر میزان آب مصرفی نداشته است. بیشترین میزان آب مصرفی مربوط به تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار و بدون باکتری بود که تفاوت معنی داری با تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوپچار و بدون باکتری نداشت. که نشان دهنده تأثیر بایوپچار در نگهداشت و حفظ آب در خاک می‌باشد در واقع بایوپچار به دلیل گنجایش بالای نگه‌داری آب در خود توانسته میزان آب موجود در

حاصل خیز دیده نشد، در حالی که در خاک‌های ضعیف ۱۶ تا ۳۵ درصد افزایش در عملکرد م مشاهده گردید (۱۴). ازوما و همکاران (۴۲) نیز در پژوهشی گزارش کردند کاربرد ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار بایوچار کود گاوی در یک خاک شنی کارایی مصرف آب ذرت را به طور معنی‌داری در مقایسه با شاهد به ترتیب به میزان ۶، ۱۳۹ و ۹۱ درصد افزایش داد.

در آبیاری تناوبی تفاوت بین کمینه (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری) و بیشینه (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری) این شاخص ۸۴/۹ درصد بود. همان‌گونه که بیان شد در هر دو شرایط آبیاری، تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار توانسته موجب افزایش بهره‌وری آب شود ولی میزان این تأثیر در شرایط آبیاری تناوبی بهتر بوده است. در پژوهش کرنلیسن و همکاران (۱۴) هیچ تأثیر مثبتی از بایوچار بر ذرت در خاک‌های

جدول ۴- مقایسه میانگین پیامد برهم‌کنش کود در باکتری، برش خرده بر اساس شیوه آبیاری برای عملکرد برنج و CPD
Table 4- Mean comparison of the interaction effect of irrigation method, fertilizer and bacteria, fractional cut according to irrigation method for rice yield and CPD

کود Fertilizer	عملکرد برنج Rice yeild Kg/ha				CPD			
	آبیاری غرقابی (Flood irrigation)		آبیاری تناوبی (alternative irrigation)		آبیاری غرقابی (Flood irrigation)		آبیاری تناوبی (alternative irrigation)	
	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 50+ 0 Biochar)	2755.26 ^j	4952.51 ^c	1258.45 ^j	3122.68 ^h	0.3033 ^k	0.5439 ^{defg}	0.1937 ^j	0.4858 ^h
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 50+ 10 Biochar)	3133.84 ^{ij}	4838.01 ^c	3939.50 ^{de}	3839.41 ^{de}	0.3606 ^{jk}	0.5577 ^{defg}	0.6518 ^e	0.637 ^e
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 50+ 20 Biochar)	4964.61 ^c	4404.82 ^{def}	5330.78 ^a	4756.24 ^b	0.6089 ^{cd}	0.5403 ^{efg}	1.2408 ^a	1.1069 ^b
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۰ (Nitrogen 75+ 0 Biochar)	4097 ^{fg}	3330.59 ^{hi}	3400.82 ^{fgh}	1962.51 ⁱ	0.447 ^{hi}	0.3671 ^{jk}	0.522 ^{gh}	0.3073 ⁱ
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 75+ 10 Biochar)	5494.30 ^b	4290.36 ^{ef}	3410.79 ^{fgh}	4400.78 ^{bc}	0.6368 ^{bc}	0.4969 ^{gh}	0.5662 ^{fg}	0.7404 ^d
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 75+ 20 Biochar)	4727.90 ^{cd}	5959.43 ^a	5457.84 ^a	4036.86 ^{cd}	0.5857 ^{cde}	0.7369 ^a	1.2891 ^a	0.9684 ^c
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 100+ 0 Biochar)	3706.65 ^{gh}	4625.17 ^{cde}	2346.94 ⁱ	3390.99 ^{fgh}	0.4105 ^{ij}	0.5072 ^{fgh}	0.3646 ⁱ	0.5302 ^{gh}
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 100+ 10 Biochar)	4947.05 ^c	4269.35 ^{ef}	3774.35 ^{def}	3571.45 ^{efg}	0.5737 ^{cdef}	0.4983 ^{gh}	0.6308 ^{ef}	0.6054 ^{ef}
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 100+ 20 Biochar)	4132.94 ^f	5554.51 ^{ab}	3241.70 ^{gh}	4610.81 ^b	0.5123 ^{fgh}	0.6931 ^{ab}	0.7672 ^d	1.0852 ^b

میانگین‌های با حروف مشابه در هر دو ستون کنار هم نشان دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Means with similar letters in each two columns, are not significantly different at P<0.05 level of probability.

جدول ۵- مقایسه میانگین بهره‌مکنش کود در شیوه آبیاری بر آب مصرف شده

Table 5- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer and irrigation method on used water

کود Fertilizer	آب مصرف شده (Used Water) m ³ /ha	
	آبیاری غرقابی (Flood irrigation)	آبیاری تناوبی (Alternative irrigation)
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 50+ 0 Biochar)	9102.92 ^a	6454.42 ^a
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 50+ 10 Biochar)	8781.75 ^b	6038.58 ^b
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 50+ 20 Biochar)	8115.58 ^d	4297.42 ^d
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۰ (Nitrogen 75+ 0 Biochar)	9115 ^a	6450.67 ^a
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 75+ 10 Biochar)	8634.5 ^{bc}	5985.83 ^{bc}
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 75+ 20 Biochar)	8092.75 ^d	4201.25 ^e
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 100+ 0 Biochar)	9075.25 ^{ab}	6417.92 ^a
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 100+ 10 Biochar)	8597.17 ^c	5941.83 ^c
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 100+ 20 Biochar)	8081.5 ^d	4234.83 ^e

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Means with similar letters in each column, are not significantly at P<0.05 level of probability.

به تیمارهای بدون بایوچار و آبیاری براساس ۱۰۰٪ نیاز آبی برخوردار بودند. آنان دلیل این امر را افزایش گنجایش نگهداری آب و مصرف آب کمتر و همچنین کاهش آب‌شویی عناصر غذایی در تیمارهای دارای بایوچار عنوان کردند. البته پیامد بایوچار در بهبود نفوذ آب در خاک و نگهداری آب در خاک توسط پژوهش‌گران دیگری نیز گزارش شده است (۴۷).

در شاخص BPD نیز مشخص گردید که در شرایط تیمار کودی شاهد (تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری)، آبیاری تناوبی اگرچه موجب کاهش مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی می‌شود، ولی به دلیل افت شدید عملکرد در آبیاری تناوبی، سود ناخالص اقتصادی در ازای مصرف یک متر مکعب آب، کاهش شدید (افت ۵۶/۵ درصد نسبت به حالت غرقابی) پیدا کرد، این درحالی‌ست که اعمال تیمار کودی ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار موجب افزایش ۴۲/۸ درصدی سود اقتصادی نسبت به آبیاری غرقابی شد. (جدول ۷) این امر نشان دهنده تاثیر مثبت تیمار کودی در افزایش میزان سود اقتصادی به میزان آب مصرفی است. و موجب توجیه اقتصادی آبیاری تناوبی (که همراه با کاهش مصرف آب است) می‌باشد.

لازم به ذکر است که مقایسه بین بیشترین CPD در دو شیوه آبیاری غرقابی و تناوبی (در غرقابی تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار همراه با باکتری و در تناوب تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار بدون مصرف باکتری) نشان دهنده ۴۲/۸ درصد افزایش CPD در تناوب نسبت به غرقابی می‌باشد. این درحالی‌ست که مقایسه بین کمترین CPD در دو شیوه آبیاری غرقابی و تناوبی (هر دو تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری) نشان دهنده ۵۶/۵ درصد کاهش CPD در آبیاری تناوبی نسبت به غرقابی می‌باشد. در واقع این مقایسه نشان دهنده این است که در شرایط تیمار کودی شاهد، آبیاری تناوبی اگرچه موجب کاهش مصرف آب نسبت به آبیاری غرقابی می‌شود، ولی به دلیل افت شدید عملکرد در آبیاری تناوبی، شاخص بهره‌وری آب CPD کاهش شدید (افت ۵۶/۵ درصد نسبت به حالت غرقابی) پیدا می‌کند. در سوی دیگر، افزایش شاخص بهره‌وری در روش آبیاری تناوب نسبت به غرقابی نشان دهنده تاثیر مثبت تیمار کودی بر CPD است. در پژوهش ابراهیم و همکاران (۱۹) چهار سطح مختلف بایوچار با دو سطح نیاز آبیاری (۸۰٪ و ۱۰۰٪ نیاز آبی) بر عمل کرد و اجزای عملکرد گندم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنان نشان داد که تیمارهای دارای بایوچار با آبیاری براساس ۸۰ درصد نیاز آبی از عملکرد بالاتری نسبت

NBPD

با توجه به جدول تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) مشخص شد تمامی پیامدهای ساده و برهم‌کنش دو گانه و سه گانه به جز پیامد سال $\times$ باکتری در سطح احتمال یک درصد بر شاخص NBPD معنی‌دار بود. همچنین برهم‌کنش ۴ گانه سال $\times$ شیوه آبیاری $\times$ کود $\times$ باکتری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). به دلیل پیچیدگی بیش از حد، تحلیل برهم‌کنش چهار گانه تفسیر نشد و درباره این شاخص به تفسیر برهم‌کنش سه‌گانه شیوه آبیاری $\times$ کود $\times$ باکتری، اکتفا شد. جدول مقایسه میانگین‌ها (جدول ۷) نشان داد که در شیوه آبیاری غرقاب بیشترین مقدار NBPD (۳۴۳۰۹) مربوط به تیمار ۷۵ در صد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به همراه مصرف باکتری بود. این در حالی است که بیشترین میزان همین شاخص (۶۷۴۱۲) در آبیاری تناوبی مربوط به تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری بدست آمد. که البته تفاوت آماری معنی‌داری با تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مصرف باکتری نداشت. کمترین میزان این شاخص در هر دو روش آبیاری غرقاب (۱۱۶۰۰) و تناوبی (۸۵۲۰/۱۴) مربوط به تیمار ۵۰ در صد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری بود.

شاخص NBPD نشان دهنده میزان درآمد خالص بدست آمده در ازای یک متر مکعب آب مصرف شده است و بنابراین، هر چه این نسبت بالاتر باشد نشان دهنده مصرف بهتر آب و سود اقتصادی خالص بیشتر می‌باشد. در واقع بهترین شاخص برای مقایسه دو شیوه آبیاری و تیمارهای کودی در بهره‌وری مصرف آب شاخص NBPD است. در آبیاری غرقاب تفاوت بین کمترین (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری) و بیشترین (۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و مصرف باکتری) میزان شاخص NBPD، ۶۶/۱ درصد بود. در واقع تیماری کودی ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و با مابه‌زنی باکتری توانسته به ازای هر متر مکعب آب بکار رفته مبلغ ۲۲۷۰۹ ریال سود خالص بیشتری را در شرایط آبیاری غرقاب ایجاد کند. در آبیاری تناوبی اختلاف بین کمینه (۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری) و بیشینه (۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری) این شاخص ۸۷/۳ درصد است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیماری کودی ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری توانسته به ازای هر متر مکعب آب استفاده شده مبلغ ۵۸۸۹۱ ریال سود خالص بیشتری را ایجاد کند. بنابراین در هر دو شرایط آبیاری، تیمار کودی توانسته، NBPD را بهبود بخشد اما کارایی آن در شرایط تناوب به مراتب بیشتر بوده است. در پژوهشی مشابه اختر و همکاران (۱) گزارش کردند که روش‌های کم آبیاری و آبیاری در ناحیه ریشه در مقایسه با آبیاری کامل، به ترتیب سبب افزایش معنی‌دار کارایی مصرف آب در گوجه فرنگی به میزان ۳۵ و ۱۵ درصد افزایش شدند. آنان همچنین گزارش کردند

کاربرد بایوچار به دست آمده از ترکیب پو سته برنج و دانه کتان سبب افزایش کارایی مصرف آب در همه تیمارهای آبیاری در مقایسه با شرایط بدون بایوچار شد. از آنجا که در شرایط آبیاری تناوبی، گیاه برنج بخشی از فصل رشد را در شرایط کمبود آب سپری می‌کند، پیش‌بینی کاهش مصرف آب و در پی آن افزایش شاخص NBPD نسبت به شرایط غرقاب، می‌شود. از سویی کاهش مصرف آب در آبیاری تناوبی موجب کاهش نسبی عملکرد شلتوک می‌شود. در این بین مقایسه بین بیشترین NBPD در دو شیوه آبیاری غرقاب و تناوب (در غرقاب در تیمار ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به همراه مصرف باکتری و در آبیاری تناوبی در ۵۰ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و بدون مصرف باکتری) نشان دهنده ۴۹/۱ درصد افزایش NBPD در آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب می‌باشد. این در حالی است که مقایسه بین کمترین NBPD که در هر دو شیوه آبیاری غرقاب و تناوب در تیمار ۵۰ درصد نیتروژن + بدون بایوچار و بدون مصرف باکتری بدست آمد، نشان دهنده کاهش ۳۶/۱ درصدی NBPD در آبیاری تناوبی نسبت به غرقاب بود. مشاهده شد که در شرایط تیمار کودی شاهد (۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و بدون مصرف بایوچار)، آبیاری تناوبی اگرچه موجب کاهش مصرف آب نسبت به آبیاری غرقاب شد ولی به دلیل افت عملکرد در آبیاری تناوبی، سود خالص اقتصادی در ازای مصرف یک متر مکعب آب، منفی (افت ۳۶/۱ درصد نسبت به حالت غرقاب) بود. این در حالی است که اعمال تیمار کودی ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار موجب افزایش ۴۲/۸ درصدی سود اقتصادی به میزان آب مصرفی نسبت به آبیاری غرقاب شد. این امر نشان دهنده تاثیر مثبت و چشم‌گیر تیمار کودی در افزایش میزان سود اقتصادی خالص به میزان آب مصرفی در آبیاری تناوبی می‌باشد و بنابراین آبیاری تناوبی را از لحاظ اقتصادی توجیه می‌کند. به طوری که این توجیه اقتصادی در تیمار شاهد (۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و بدون مصرف بایوچار) در آبیاری تناوبی مشاهده نمی‌شود، گرچه با کاهش مصرف آب همراه است. البته تاثیر مثبت تیمار کودی ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار و به همراه مصرف باکتری بر روی سود اقتصادی خالص به ازای متر مکعب آب مصرفی (NBPD) در آبیاری غرقاب نیز نسبت به شاهد (۱۰۰ درصد نیتروژن توصیه شده و بدون مصرف بایوچار) مشاهده شده است. ولی اندازه این تاثیر به مراتب کمتر از آبیاری تناوبی بوده است.

در همین راستا ژانگ و همکاران (۵۰) گزارش کردند کاربرد ۲۰ و ۴۰ تن در هکتار بایوچار تولید شده از کاه گندم، عملکرد ذرت را به ترتیب به میزان ۱۱/۶ و ۱۸/۲ درصد در شرایط کاربرد کود نیتروژن و به میزان ۷ و ۱۶ درصد در شرایط بدون کاربرد نیتروژن افزایش داد. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ (۴۹) نیز افزایش عملکرد ذرت در تیمارهای بایوچار را به افزایش فراهمی عناصر غذایی و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند کاهش چگالی ظاهری نسبت دادند. بایوچار

عملکرد برنج و همچنین کاهش مصرف آب و متعاقب آن افزایش شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در کشت برنج شده است، که البته میزان این تاثیرگذاری در آبیاری تناوبی چشم گیر تر بوده است. در واقع می توان گفت که استفاده از ترکیب کودی بایوچار و نیتروژن توانسته کاهش عملکرد ناشی از کاهش مصرف آب در آبیاری تناوبی را نسبت به آبیاری غرقاب تا اندازه زیادی جبران کند.

با پیامد مثبت بر کارایی مصرف منابع و نهاده‌های کشاورزی و عملکرد گیاهان زراعی به دلیل سطح ویژه بالا در بهبود راندمان تولیدات زراعی موثر است (۳۶).

نتیجه گیری

با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که کاربرد ترکیب کودی ۷۵ درصد نیتروژن + ۲۰ تن بایوچار با افزایش نکه داشت آب در خاک و جلوگیری از آبشویی و تصعید نیتروژن موجب افزایش

جدول ۶- مقایسه میانگین برهم کنش کود در باکتری بر آب مصرف شده

Table 6- Mean comparison of the interaction effect of fertilizer and bacteria on used water

کود (Fertilizer)	باکتری (Bacteria)	آب مصرف شده m^3/ha (Used water)
آب مصرفی		
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 50+ 0 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7788 ^{ab}
	(With bacteria) با باکتری	7769.33 ^{bc}
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 50+ 10 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7367 ^d
	(With bacteria) با باکتری	7353.33 ^{de}
نیتروژن ۵۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 50+ 20 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	6226 ^h
	(With bacteria) با باکتری	6227 ^h
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۰ (Nitrogen 75+ 0 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7839.33 ^a
	(With bacteria) با باکتری	7726.33 ^c
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 75+ 10 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7329.17 ^{def}
	(With bacteria) با باکتری	7291.17 ^{fg}
نیتروژن ۷۵+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 75+ 20 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	6151.5 ⁱ
	(With bacteria) با باکتری	6122.5 ⁱ
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۰ (Nitrogen 100+ 0 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7734.83 ^{bc}
	(With bacteria) با باکتری	7758.33 ^{bc}
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۱۰ (Nitrogen 100+ 10 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	7303.67 ^{ef}
	(With bacteria) با باکتری	7235.33 ^g
نیتروژن ۱۰۰+بایوچار ۲۰ (Nitrogen 100+ 20 Biochar)	(No bacteria) بدون باکتری	6143.83 ⁱ
	(With bacteria) با باکتری	6132.5 ⁱ

میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون نشان دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است.

Means with similar letters in each column, are not significantly at $P<0.05$ level of probability.

جدول ۷- مقایسه میانگین برهم‌کنش کود در باکتری، برش خرده بر اساس شیوه آبیاری بر BPD و NBPD

Table 7- Mean comparison of the interaction effect of irrigation method, fertilizer and bacteria, fractional cut according to irrigation method on BPD and NBPD

کود (Fertilizer)	BPD				NBPD			
	آبیاری غرقابی (Flood irrigation)		آبیاری تناوبی (Alternative irrigation)		آبیاری غرقابی (Flood irrigation)		آبیاری تناوبی (Alternative irrigation)	
	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)	بدون باکتری (No bacteria)	با باکتری (With bacteria)
نیترژن ۵۰+با یوچار (Nitrogen 50+ 0 Biochar)	18197 ^k	32636 ^{defg}	11621 ^j	29149 ^h	11600 ^k	26050 ^{de}	8520.14 ^j	25241 ^f
نیترژن ۵۰+با یوچار ۱۰ (Nitrogen 50+ 10 Biochar)	21638 ^{jk}	33464 ^{defg}	39109 ^e	38217 ^e	13582 ^{jk}	25395 ^{de}	34951 ^d	33220 ^{de}
نیترژن ۵۰+با یوچار ۲۰ (Nitrogen 50+ 20 Biochar)	36531 ^{cd}	32417 ^{efg}	74450 ^a	66412 ^b	26721 ^{cd}	22607 ^{efg}	67412 ^a	66412 ^a
نیترژن ۷۵+با یوچار (Nitrogen 75+ 0 Biochar)	26823 ^{hi}	22026 ^{jk}	31318 ^{gh}	18436 ⁱ	20275 ^{gh}	15407 ^{ij}	18956 ^h	13924 ⁱ
نیترژن ۷۵+با یوچار ۱۰ (Nitrogen 75+ 10 Biochar)	38208 ^{bc}	29811 ^{gh}	33974 ^{fg}	44422 ^d	30096 ^{bc}	21708 ^{fg}	25617 ^f	33435 ^{de}
نیترژن ۷۵+با یوچار ۲۰ (Nitrogen 75+ 20 Biochar)	35145 ^{cde}	44216 ^a	77344 ^a	58106 ^c	25229 ^{def}	34309 ^a	58159 ^b	43773 ^c
نیترژن ۱۰۰+با یوچار (Nitrogen 100+ 0 Biochar)	24627 ^{ij}	30432 ^{gh}	21877 ⁱ	31811 ^{gh}	17984 ^{hi}	23852 ^{defg}	14735 ⁱ	21265 ^{gh}
نیترژن ۱۰۰+با یوچار ۱۰ (Nitrogen 100+ 10 Biochar)	34422 ^{cdef}	29896 ^{gh}	37845 ^{ef}	36323 ^{ef}	26305 ^d	21728 ^{fg}	25328 ^f	24437 ^{fg}
نیترژن ۱۰۰+با یوچار ۲۰ (Nitrogen 100+ 20 Biochar)	30738 ^{fgh}	41585 ^{ab}	46031 ^d	65112 ^b	20822 ^{gh}	31603 ^{ab}	30857 ^e	43717 ^c

میانگین‌های با حروف مشابه در هر دو ستون کنار هم نشان دهنده نبود تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد است

Means with similar letters in each tow column, are not significantly different at P<0.05 level of probability

منابع

- 1- Akhtar S.S., Andersen M.N., and Liu F. 2014. Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. Agric. Water Manage 138: 37-44.
- 2- Albuquerque J.A., Calero J.M., Barron V., Torrent J., Del Campillo M.C., Gallardo A., and Villar R. 2012. Effects of biochars produced from different feed stocks on soil properties and sunflower growth. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177:16–25.
- 3- Arabi Yazdi A., Alizadeh A., and Mohammadian F. 2010. Investigation of water ecological footprints in iranian agriculture. water and soil Journal 23(4): 15-1. (In Persian with English abstract)
- 4- Arabzade B. 2006. Investigation of low irrigation in Fajr cultivar. Publishing Department of Rice Research Institute of Iran. 24 pages.
- 5- Arabzade B., and Aghajani S. 2003. Rice, Vegetation, Water Requirements, Pests and diseases and weed Management.
- 6- Anderson C.R., Condrón L.M., Clough T.J., Fiers M., Stewart A., Hill R.A., and Sherlock R.R. 2011. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. Pedobiologia 54: 309–320.
- 7- Arif M., Ali A., Umair M., Munsif F., Ali K., Inamullah M.S., and Ayub G. 2012. Effect of biochar FYM and mineral nitrogen alone and in combination on yield and yield components of maize. Sarhad Journal Agriculture 28(2): 191-

195. (In Persian with English abstract)
- 8- Atkinson C.J., Fitzgerald J.D., and Hips N.A. 2010 Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant and Soil* 337: 1–18.
- 9- Bobojonov I., Berg E., Franz-Vasdeki J., Martius Ch., and Lamers John P.A. 2016. Income and irrigation water use efficiency under climate change: An application of spatial stochastic crop and water allocation model to Western Uzbekistan, *Climate Risk Management*, ISSN 2212-0963, Elsevier, Amsterdam [u.a.], 13: 19-30.
- 10- Bouman B.A.M., Lampayan R.M., and Tuong T.P. 2007. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 54 p.
- 11- Bouman B.A.M., Peng S., Castaneda A.R., and Visperas R.M. 2005. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. *Agricultural Water Management* 74: 87-105.
- 12- Brantley K.E., Brye K.R., Savin M.C., and Longer D.E. 2015. Biochar source and application rate effects on soil water retention determined using wetting curves. *Open Journal of Soil Science* 5(01): 1.
- 13- Chaudhry U.K., Shahzad S., Naqqash M.N., Saboor A., Yaqoob S., Abbas M.S., and Saeed F. 2016. Integration of biochar and chemical fertilizer to enhance quality of soil and wheat crop (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences* 9(1): 348-358.
- 14- Cornelissen G., Martinsen V., Shitumbanum V., Alling V., Gijs D., Breedveld G.D., Rutherford D.W., Sparrevik M., Hale S.E., Obia A., and Mulder A. 2013. Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agronomy* (3): 256-274.
- 15- Egamberdiyeva D., Juraeva D., Poberejskaya S., Myachina O., Teryuhova P., Seydaliyeva L. and Aliev A. 2004. Improvement of wheat and cotton growth and nutrient uptake by phosphate solubilizing bacteria. *Proceedings of the 26th Southern Conservation Tillage Conference for Sustainable Agriculture*. Raleigh, North Carolina, June 8-9, P. 58-66.
- 16- Gebremedhin G.H., Haileselassie B., Berhe D., and Belay T. 2015. Effect of biochar on yield and yield components of wheat and post-harvest soil properties in Tigray, Ethiopia. *Journal of Fertilizers and Pesticides* 6: 158-162.
- 17- Glab T., Palmowska J., Zaleski T., and Gondek K. 2016. Effect of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sandy soil. *Geoderma* 281: 11-20.
- 18- Hua L., Lu Z., Ma H., and Jin S. 2014. Effect of biochar on carbon dioxide release, organic carbon accumulation, and aggregation of soil. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 33(3): 941-946.
- 19- Ibrahim O.M., Bakry A.B., El Kramany M.F., and Elewa T.A. 2015. Evaluating the role of biochar application under two levels of water requirements on wheat production under sandy soil conditions. *Global Journal of Advanced Resarch* 2(2): 411-418.
- 20- IRRI, PhilRice, NIA and BASC. 2005. Aerobic Rice: A water-saving technology in development. www.irri.com.
- 21- Jvan J., and Fal Soleyman M. 2008. Water crisis and the need to pay attention to agricultural water productivity in dry areas Case Study: Birjand Plain, *Geography, Development, Sh.*
- 22- Karer J., Wimmer B., Zehetner F., Kloss S., and Soja G. 2013. Biochar application to temperate soils: effect on nutrient uptake and corn yield under field conditions. *Agricultural and Food Science* 22: 390-403.
- 23- Kheyri Shalamzari, K. And Borumabsab, S. 2014. Effect of different levels of superabsorbent 200A on the physical and hydraulic properties of silty loam soil. *Irrigation Science and Engineering*, 36 (4): 63-71.
- 24- Kinney T.J., Masiello C.A., Dugan B., Hockaday W.C., Dean M.R., Zygourakis K., and Barnes R.T. 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy* 41: 34-43.
- 25- Lehmann J., and Joseph S. 2009. Biochar for Environmental Management- an Introduction. In: Lehmann J. and Joseph S. (Eds). *Biochar for Eenvironmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 1–11.
- 26- Lehmann J., Cheng C. H., Thies J.E., Burton S.D., and Engelhard M.H. 2006. Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes. *Organic Geochemistry* 37: 1477-1488.
- 27- Lehmann J. 2007. Bio-Energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5: 381-387.
- 28- Liu X.H., Han F.P., and Zhang X.C. 2012. Effect of biochar on soil aggregates in the loess plateau: results from incubation experiments, *International Journal of Agriculture and Biology* 14: 975–979.
- 29- Malekotti M.J., Ghayibi M.N. 2000. Determining the critical level of effective nutrients in soil, plants and fruits in order to increase the quality and quantity performance of strategic products of the country. second edition. *Agricultural Education Publication*. 92 p.
- 30- Martinsen V., Mulder J., Shitumbanuma V., Sparrevik M., Børresen T., and Cornelissen G. 2014. Farmer-led maize biochar trials: Effect on crop yield and soil nutrients under conservation farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177: 681-695.
- 31- Nassiri M., and Niknejad Y. 2012. Causes of damage in rice fields. *Publishing Ward* 83 pages.
- 32- Pirdashti H. 2000. Study of the process of remobilization of dry matter, nitrogen and determination of growth indices of rice cultivars in different dates of masters dissertation. *Tarbiat Modares University of Tehran*. 158 pages.
- 33- Pirdashti H., Tahmasebi Sarvestani Z., Nematzadeh G., and Ismail A. 2004. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. In: *Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*, 26 Sept. 1 Oct, Brisbane, Australia.

- 34- Rezaei M., and Nahvi M. 2004. Effect of irrigation interval on rice yield. Proceedings of the Eleventh Irrigation and Drainage Conference, Tehran.
- 35- Roderick M., Florencia G.R., Rodriguez G.D.P., Lampayan R.M., and Bouman B.A.M. 2011. Impact of the alternate wetting and drying (AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines. Food Policy 36(2): 280-288.
- 36- Schmidt M.W.I., and Noack A.G. 2000. Black carbon in soils and sediments: Analysis, distribution, implications and current challenges. Global Biogeochemical Cycles 14:777-793.
- 37- Sedaght N., Pirdashti H., Asadi R., and Mousavi Toghani S.I. 2014. The effect of irrigation methods on water productivity in rice. Journal of Water Research in Agriculture 28(1): 9-1. (In Persian with English abstract)
- 38- Smith J.L., Collins H. P., and Bailey V.L. 2010. The effect of young biochar on soil respiration. Soil Biology Biochemistry 42: 2345-2347.
- 39- Sun Z., Bruun E.W., Arthur E., De Jonge L.W., Moldrup P., Hauggaard-Nielsen H., and Elsgaard L. 2014. Effect of biochar on aerobic processes, enzyme activity, and crop yields in two sandy loam soils. Biology and Fertility of Soils 50:1087-1097.
- 40- Tavakoli A. 2002. Low irrigation. Publication of Iran National Irrigation and Drainage Committee.
- 41- Topoliantz S., Ponge J.F., and Ballof S. 2007. Manioc peel and charcoal: A potential organic amendment for sustainable soil fertility in the tropics. Biology and Fertility of Soils 41: 15-21.
- 42- Uzoma K., Inoue M., Andry H., Fujimaki H., Zahoor A., and Nishihara E. 2011. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. Soil Use Manage 27: 205-212.
- 43- Van Zwieten L., S. Kimber S., Morris K., Chan A., Downie J., Rust S., Joseph and Cowie A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant. Soil 327: 235-246.
- 44- Wang Z., and Huang B. 2004. Physiological recovery of Kentucky bluegrass from simultaneous drought and heat stress. Crop Science 44: 1729-1736 .
- 45- Warnock D.D., Mummeya D.L., McBride B., Major J., Lehmann J., and Rillig M.C. 2010. Influences of nonherbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils: results from growth chamber and field experiments. Applied Soil Ecology 46:450-456.
- 46- Yoshida S. 1981. Fundamentals of rice crop science. International Rice Research Institute, Los Banos, Laguna, Pilippines.
- 47- Yu O.Y., Raichle B., and Sink S. 2013. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. International Journal of Energy and Environmental Engineering 4(1): 44-52.
- 48- Zahir A.Z., Arshad M., Frankenberger W.T. 2004. Plant growth promoting rhizobacteria: applications and perspectives in agriculture. Advance in Agronomy 81: 97-168.
- 49- Zhang A., L. Cui G., Pan L., Li Q., Hussain X., Zhang J., Zheng and D. Crowley., 2010. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China. Agriculture Ecos. Environment 139: 469-475.
- 50- Zhang A., Liu Y., Pan G., Hussain Q., Li L., Zheng J., and Zhang X. 2012. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. Plant Soil 351: 263-275.



Effect of Biochar and *Azospirillum lipoferum* bacteria on Yield and Water Use Efficiency Indices of Tarom Hashemi Rice Cultivar under Flooded and Alternation Irrigation Regimes

M. Kaveh¹- M.A. Esmaeili^{2*}- H. Pirdashti³- M.R. Ardakani⁴

Received: 08-07-2019

Accepted: 10-03-2020

Introduction: Rice is a staple food source and the most important grain in developing countries, which is most commonly consumed by more than 90 percent of the world populations. Moreover, this plant is produced and consumed in Asia. However this major crop faces severe limitations such as water scarcity and other environmental stresses. Limited water resources along with climate change effects, have increased attention to methods which improve water use efficiency in crops such as rice cultivation. On the other hand, traditional irrigation methods for rice production often waste considerable fraction of irrigation water. Therefore, it is necessary to modify irrigation and other farming methods. Furthermore, using biochar and nitrogen fixing bacteria as organic biofertilizers can be effective methods to improve water use efficiency and yield attributes of rice plant. Therefore, the present research was conducted to investigate the effect of biochar and *Azospirillum lipoferum* rhizobacteria on yield and water use efficiency on Tarom Hashemi rice cultivar of under flooded and alternating irrigation regimes.

Materials and Methods: This study was conducted at the research fields of the Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University in 2017 and 2018. The experimental site is located at 36° 39'42" N latitude and 53°03'54" E longitude with -11 m above sea level. Soil samples were taken from depths of 0-30 cm before land preparation. The experiment was done in factorial split-split plot arrangement with complete randomized blocks based design with three replications. Treatments included two irrigation management methods (flooding and irrigation regimes) in combination with nine fertilizers levels (100% of recommended nitrogen or N100, N100+ 10 ton biochar or biochar 10, N100+ biochar 20, N75, N75+ biochar 10, N100+ biochar 20, N50, n50+ biochar 10 and N100+ biochar 20) as main plots and seedling inoculation with *Azospirillum lipoferum* bacteria (without inoculation was also included as control) as sub plots. Plot ridges were covered by plastic sheets and inserted into the soil at 50 cm to prevent water flowing from one plot to the others. The plots were then leveled and 3-4 leaf seedlings stage. A specific number of seedlings were gently washed and placed for 30 minutes in a pan containing 10 L of water mixed with 1 L of bacterial inoculum. Carboxymethyl cellulose, 15 g, was added to increase adhesion of bacteria into the plant roots. Nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers were applied according to the results of soil analysis. Weeds and pests were controlled mechanically or by hand and no herbicides or pesticides were used.

Results and Discussion: Results showed that biochar and nitrogen fertilizers, irrigation methods, and seedling inoculation with bacteria had significant effects on water use efficiency indices. Comparison of means of interaction effects showed that the highest paddy yield (5950.43 and 5330.78 kg/ha, respectively) were observed by flooding irrigation method in combination with N50 + biochar 20 treatment and inoculated by *Azospirillum lipoferum* bacteria and alternating irrigation management method which was along with N50 + biochar 20 without inoculation. Alternating irrigation plots experienced water shortage in some growth stages and therefore slightly lower paddy yield is acceptable. Application of biochar 20 and flooding or alternating methods which treated by N75 and N50, respectively showed 49.1% increase in economic efficiency index.

Conclusion: In general, application of 20 ton biochar along with 75% nitrogen fertilizers led to 42.8% increase in economic advantages in alternating irrigation method as compared to the flooding systems. These observation indicates beneficial effect of fertilizer in economic advantage enhancement in rice cultivation.

1 and 2- Ph.D. Student of Agronomy and Associate Professor, Department of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: esmaeilim550@gmail.com)

3 - Professor, Department of Agronomy, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Professor of Agronomy, Islamic Azad University, Karaj Branch, Karaj, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81493

Keywords: Biochar, *Azospirillum lipoferum*, Water use efficiency index, Rice



مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی بر عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشائی و کشت مستقیم بذر

مریم کریمی فرد^۱ - مهدی ذاکری نیا^{۲*} - علیرضا کیانی^۳ - محمدتقی فیض بخش^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۵

چکیده

گیاه برنج از نظر اهمیت دومین غله مهم خوراکی بعد از گندم در ایران هست. مهم‌ترین عامل تولید پایدار در مناطق تولید برنج نیز آب است. این پژوهش به منظور امکان‌سنجی استفاده از روش‌های نوین آبیاری با هدف بهره‌وری بیشتر از آب در دو روش کشت مستقیم و نشائی برنج انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۶ تیمار و سه تکرار در ۱۸ کرت به ابعاد هر کدام ۶ متر در ۱۲ متر (۷۲ متر مربع) در زمینی به مساحت ۱۵۰۰ متر مربع در ایستگاه تحقیقات کشاورزی عراقی محله استان گلستان در بهار و تابستان سال ۱۳۹۷ انجام شد. تیمارها شامل سه سامانه آبیاری غرقابی، بارانی و نواری - تیپ به عنوان عامل اصلی و دو روش کشت مستقیم و نشائی به عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر آبیاری و روش کاشت بر عملکرد شلتوک در سطح یک درصد معنی‌دار شد. بیش‌ترین عملکرد برنج در کشت نشائی در روش آبیاری غرقابی با میانگین ۸۱۷۷ کیلوگرم در هکتار و بعد از آن در کشت مستقیم در آبیاری سنتی و نواری - تیپ به ترتیب با میانگین ۷۳۷۵ و ۶۸۳۶ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. بیش‌ترین وزن هزار دانه در کشت نشائی در آبیاری سنتی و در کشت مستقیم در آبیاری سنتی و نواری - تیپ به دست آمد. بیش‌ترین تعداد دانه پر در خوشه در تیمار آبیاری سنتی، در کشت نشائی به دست آمد که با مقدار به دست آمده در کشت مستقیم تفاوت معنی‌دار داشت. همچنین در آبیاری سنتی بین روش‌های کاشت تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد دانه پوک وجود نداشت؛ در حالی که در آبیاری قطره‌ای و بارانی کشت نشائی (با میانگین ۵۱ و ۵۶ عدد برای آبیاری بارانی و قطره‌ای) تعداد دانه پوک بالاتری نسبت به کشت مستقیم (با میانگین ۴۱ و ۴۵ عدد برای آبیاری بارانی و قطره‌ای) داشته است. آبیاری بارانی کم‌ترین عملکرد شلتوک را در کشت نشائی (۴۱۸۸ کیلوگرم در هکتار) و کشت مستقیم (۵۷۱۲ کیلوگرم در هکتار) داشته است. آبیاری نواری - تیپ با میزان مصرف ۷۳۹۰ و ۶۸۴۰ متر مکعب آب مصرفی، سبب کاهش مصرف آب نسبت به آبیاری سنتی (۱۰۷۰۰ و ۱۶۹۳) متر مکعب به ترتیب در کشت نشائی و مستقیم شده است. همچنین بالاترین مقدار بهره‌وری مصرف آب در کشت مستقیم در آبیاری نواری - تیپ (۰/۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب) و در کشت نشائی تحت آبیاری سنتی و قطره‌ای (به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۶۶ کیلوگرم بر متر مکعب) به دست آمد. در مجموع در این تحقیق روش آبیاری قطره‌ای ضمن کاهش مصرف آب، توانایی افزایش بهره‌وری آب و حفظ میزان عملکرد برنج در کشت مستقیم را داشته است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای، برنج، بهره‌وری، کشت مستقیم، کشت نشائی

مقدمه

کشاورزی عمده‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی در جهان است. لذا، محدودیت منابع آبی بزرگ‌ترین چالش توسعه کشاورزی و نهایتاً امنیت غذایی تلقی می‌شود (۱۲). در ایران برنج بعد از گندم مهم‌ترین محصول زراعی کشور است. سطح زیر کشت برنج در ایران حدود ۶۰۰ هزار هکتار بود و ۷۰ درصد از اراضی شالیکاری کشور منحصر به دو استان گیلان و مازندران است و استان گلستان ۶۰ هزار

در بسیاری از کشورهای جهان، محدودیت آب به موضوعی جدی و نگران‌کننده تبدیل شده است. بر اساس برآورد موسسه بین‌المللی مدیریت آب تا سال ۲۰۲۵ حدود یک میلیارد نفر به آب کافی دسترسی نخواهند داشت (IWMI, 2011). مطالعات نشان می‌دهد که بخش

منابع طبیعی استان گلستان
۴- استادیار پژوهش بخش زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
(Email: mzakerinia@gmail.com) (*- نویسنده مسئول)

۳- استادیار پژوهش بخش فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و

برنج هوازی با مصرف ۵۰ درصد آب کمتر (در مقایسه با آبیاری مرسوم غرقابی)، حدود ۱۱ تن در هکتار بوده است. در ایران نیز نتایج آزمایش های مقدماتی مربوط به کشت و کار ژنوتیپ های برنج هوازی نشان داده است که این ژنوتیپ ها ضمن دارا بودن عملکرد دانه مناسب، امکان تغییر الگوی کشت از غرقابی به هوازی در مناطق مواجه با خطر کم آبی و حفظ تولید برنج در شرایط بحران آبی را فراهم می کنند (۱۸).

با برنامه ریزی دقیق و اعمال مدیریت صحیح آبیاری از منابع موجود حداکثر استفاده را کرد و ضمن حفظ عملکرد مطلوب، آب مصرفی اراضی شالیزاری را کاهش داد و باعث افزایش بهره‌وری آب آبیاری شد. همچنین در صورت امکان کشت مستقیم بذر در مزرعه بجای خزانه، ممکن است بتوان از هزینه های کاشت و تولید و نیز مصرف آب در خزانه جلوگیری نمود. بنابراین هدف از این تحقیق افزایش بهره‌وری آب مصرفی و بررسی آثار روش های آبیاری و روش کشت در شالیزار بر عملکرد و اجزاء عملکرد برنج می باشد. به نظر می رسد در صورتی که آبیاری بارانی و قطره ای دارای بهره‌وری مصرف آب مطلوبی باشد، می توان با صرفه جویی در مصرف از آب مازاد جهت سایر مصارف استفاده نمود و یا آنکه از فشار بیش از حد به منابع آب زیرزمینی و تخلیه روزافزون آن جلوگیری نمود. در این راستا بررسی رژیم های مختلف آبیاری بارانی و قطره ای جهت افزایش عملکرد برنج و بهره‌وری آب در دو روش کشت نشائی و کشت مستقیم صورت گرفت.

مواد و روش ها

این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی عراقی محله شهرستان گرگان در بهار و تابستان سال ۱۳۹۷ صورت گرفت. منطقه با ۵/۵ متر ارتفاع از سطح دریای آزاد و موقعیت عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۵ درجه شرقی دارای تابستان های گرم و مرطوب و زمستان های ملایمی می باشد. میزان بارندگی سالیانه استان گلستان ۴۰۰-۴۵۰ میلی متر می باشد. آزمایش به صورت طرح کرت های خرد شده با طرح پایه بلوک های کامل تصادفی در یک قطعه زمین کشاورزی به مساحت تقریبی ۱۵۰۰ متر مربع صورت گرفت. تیمارهای آبیاری در سه سطح غرقاب و آبیاری قطره ای و بارانی به عنوان عامل اصلی و روش کاشت در دو سطح کشت نشائی و مستقیم به عنوان عامل فرعی مورد نظر قرار گرفتند. ۱۸ کرت با ابعاد ۱۲ در ۶ متر (۷۲ متر مربع) و با ارتفاع معین مرزها و به فاصله یک متر از یکدیگر احداث شد. کرت ها شامل دو سیستم کشت نشائی و کشت مستقیم (بذر) بودند. نمایی از طرح اجرا شده در مزرعه در شکل ۱ آمده است.

هکتار سطح زیر کشت (حدود ۱۰ درصد سطح زیر کشت) در جایگاه سوم هست (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۳۹۶). عرب زاده (۱) گزارش کرد که یکی از مهم ترین مسائل و مشکلات در روند آبیاری بخش کشاورزی ایران، پایین بودن بازده آبیاری است. از دیگر عواملی که موجب پائینی بازده آبیاری بوده و هدر رفت بالای آب را در پی دارد، می توان به سستی بودن روش های آبیاری، و توزیع نامناسب آب که در بسیاری از موارد غیرعلمی است اشاره نمود. رضایی و نحوی (۲۰) در مطالعه اثر دور آبیاری در برنج به این نتیجه رسیدند که یکی از راه های غلبه بر مشکل پائین بودن بهره‌وری آب آبیاری و مصرف بیش از اندازه آب در آبیاری غرقابی، استفاده از روش آبیاری تناوبی یا تر و خشک کردن اراضی شالیزاری است. بومان (۴) در آزمایشی به این نتیجه دست یافته با اعمال مدیریت صحیح آب می توان باعث کاهش عملکرد شد و ثانیاً در مصرف آب صرفه جویی نموده و در نتیجه بهره‌وری آب را افزایش داد. تلاش های زیادی برای کاهش مصرف آب در اراضی برنج کاری ایران انجام گرفته است و گزارش ها متعددی درباره تأثیر آبیاری تناوبی در کاهش مصرف آب و افزایش بهره‌وری مصرف آب برنج منتشر شده است، براساس این گزارش ها، با تغییر شیوه آبیاری از غرقابی به آبیاری تناوبی می توان بدون کاهش عملکرد و یا با درصد قابل قبولی از آن در مصرف آب صرفه جویی نمود و بازده کاربرد آب را به مقدار قابل توجهی افزایش داد. آبیاری بارانی و قطره ای از جمله روش هایی هستند که در تحقیقات جهت افزایش بهره‌وری آب مورد توجه قرار گرفته اند. در بررسی گیلانی و رضایی (۷) در استان خوزستان مشاهده شد که در کشت برنج تفاوتی بین آبیاری بارانی و غرقابی از نظر عملکرد دانه مشاهده نشد؛ در حالی که مصرف آب در کشت بارانی یک سوم روش غرقابی بود. کلون و همکاران (۹) در گیاه گندم بهره‌وری ۵/۲۱ و ۱/۳۸ کیلوگرم دانه در هر متر مکعب آب به ترتیب در روش آبیاری بارانی و سطحی را گزارش نمودند. محققان به منظور مقایسه تأثیر دو روش آبیاری و قطره ای و عملکرد کیفیت محصول و کارایی مصرف آب در زراعت هندوانه، خربزه و گوجه فرنگی آزمایش هایی را در ایستگاه تحقیقات کشاورزی طریقه (مشهد) در سال ۷۵-۷۹ انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که به طور متوسط کارایی مصرف آب به روش آبیاری قطره ای در هندوانه، خربزه و گوجه فرنگی به ترتیب ۳۰، ۳۰، ۲۰ برای شیاری مرسوم بود (۲). با توجه به خشک سالی های اخیر، کمبود منابع آب در سطح کشور، ناکافی بودن آب در مراحل مختلف رشد برنج و در نهایت کاهش عملکرد، ضروری است. سهرابی و همکاران (۲۴) به ارزیابی سامانه های آبیاری تحت فشار در شبکه ای آبیاری قزوین پرداختند نتایج نشان داد که در برخی سامانه های آبیاری قطره ای بازده ۱۰۰ درصد حاصل گردید که دلیل آن نبود هیچ گونه تلفات در سامانه می باشد. نتایج تحقیقات اخیر نشان داده است که عملکرد دانه برخی از ارقام

نشاء غرقاب Flood-Transplanting	بذر غرقاب Flood-seed	نشاء نواری - تیپ Trickle-Transplanting	بذر نواری - تیپ Trickle-seed	نشاء بارانی Sprinkler-Transplanting	بذر بارانی Sprinkler-seed
بذر غرقاب Flood-seed	نشاء غرقاب Flood-Transplantin	بذر نواری - تیپ Trickle-seed	نشاء نواری - تیپ Trickle-Transplanting	بذر بارانی Sprinkler-seed	نشاء بارانی Sprinkler-Transplanting
نشاء غرقاب Flood-Transplanting	بذر غرقاب Flood-seed	نشاء نواری - تیپ Trickle-Transplanting	بذر نواری - تیپ Trickle-seed	نشاء بارانی Sprinkler-Transplanting	بذر بارانی Sprinkler-seed

شکل ۱- شماتیکی از طرح اجرا شده

Figure 1- Schematic of the executed plan

جدول ۱- مشخصات فیزیکی- شیمیایی خاک در مزرعه (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر)

Table 1- Physical and chemical properties of soil in the field (depth 30 cm)

عمق Depth (cm)	پتاسیم قابل جذب Available K (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی O.C (%)	pH pH _{SP}	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	فسفر قابل جذب Available P (mg.kg ⁻¹)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت Texture
30	360	1.33	7.7	0.8	7.8	29	60	11	لوم سیلتی Clay-loam

میزان تبخیر از تشت تبخیر صورت گرفت و آبیاری هر دو روز اعمال شد. در عملیات داشت، در سه مرحله وجین دستی و با توجه به دستورالعمل‌های فنی سازمان از سموم علف‌کش و نیز مبارزه با آفات و بیماری‌ها در طول دوره رشد برنج انجام گرفت. پس از رسیدن محصول برداشت در اوایل مهرماه پس از حذف حاشیه، انجام شد. ارتفاع بوته، تعداد دانه پر و پوک، تعداد پنجه بارور و غیر بارور، وزن هزار دانه، طول خوشه، عملکرد زیست‌توده و شلتوک بر اساس استانداردهای زراعی اندازه‌گیری شد. شاخص بهره‌وری آب آبیاری مبتنی بر عملکرد با استفاده از رابطه (۱) به دست آمد:

آبیاری / عملکرد شلتوک = بهره‌وری آبیاری مبتنی بر عملکرد

شلتوک (کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) (۱)

برای اندازه‌گیری‌های موردنظر پنج کپه از هر کرت به صورت تصادفی انتخاب شد تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایش شامل طول ساقه، طول خوشه، وزن هزار دانه، در صد پوکی و عملکرد شلتوک پنجه بارور و غیر بارور، تعداد دانه پر با استفاده از نرم‌افزار SAS صورت گرفت.

نتایج و بحث

عملکرد شلتوک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روش کاشت و آبیاری بر میزان عملکرد شلتوک معنی‌دار بود (جدول ۲). در کشت نشائی، آبیاری سنتی دارای بالاترین عملکرد شلتوک (۸۱۷۷ کیلوگرم

آماده‌سازی زمین شامل مراحل شخم اولیه، شخم ثانویه، تسطیح و ایجاد کرت‌بندی قبل از کشت انجام گرفت. بعد از آماده‌سازی زمین، عملیات کودپاشی بر اساس آزمایش تجزیه خاک و طبق نظر کارشناسان به صورت یکسان برای تمامی تیمارها اعمال شد. کود اوره به میزان ۶۰ کیلوگرم در هکتار به صورت پایه و به مقدار ۶۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک یک ماه بعد از مرحله پایه (در مرحله حداکثر پنجه‌زنی) نیز مصرف شد. کود پتاسیم اکسید (K₂O) به میزان ۷۰ کیلوگرم در هکتار و فسفر پنتاکسید (P₂O₅) به میزان ۲۵ کیلوگرم در هکتار استفاده گردید. مشخصات فیزیکی-شیمیایی محل آزمایش در جدول ۱ آمده است.

رقم مورد انتخابی رقم اصلاح شده و پر محصول فجر بود. در روش کشت نشائی در قسمت غرقابی بعد از آن انجام گل‌خرابی نشای برنج پس از ۲۰ روز قرارگیری در خزانه در مرحله سه-چهار برگی و رسیدن به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری در تاریخ ۲۲ خرداد به زمین اصلی منتقل شدند. به صورت هم‌زمان، کشت نشائی در بستر خشک بعد از انجام شیار به وسیله شیار کن و بعد از پهن کردن سامانه‌های آبیاری در قسمت آبیاری تیپ و بارانی به همین صورت انجام گرفت. هر شش نشاء با فاصله بین ۲۵×۲۵ سانتی‌متر کشت شد. در سیستم کشت بذر مستقیم، قبل از کشت بذرها به مدت سه روز خیسانده و با ظهور جوانه‌زنی بذر به مزرعه برای کشت انتقال داده شد. جهت اعمال آبیاری سنتی کشت نشائی و مستقیم از ابتدا در بستر غرقاب صورت گرفت؛ درحالی‌که جهت اجرای آبیاری نواری-تیپ و بارانی، کشت در بستر مرطوب و اشباع صورت گرفت. در کلیه تیمارها، آبیاری بر اساس

تیمار آبیاری سنتی (۲۰/۸۸ گرم) بود که با تیمار آبیاری قطره‌ای (۱۹/۸۳ گرم) تفاوت معنی‌دار نداشت (شکل ۳). به نظر می‌رسد عدم انتقال مناسب آب برای گیاه روی پر شدن مطلوب دانه تأثیر منفی گذاشته است. مهم‌ترین عامل کاهش وزن هزار دانه در شرایط کم‌آبی، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه، کاهش عرضه مواد پرورده به گیاه تحت این شرایط و در نتیجه کاهش وزن دانه است (۱۱). وزن هزار دانه یکی از مؤلفه‌های عملکرد برنج است که مقدار آن به خصوصیات ارقام برنج و شرایط رطوبتی در دوره رسیدگی بستگی دارد (۷). گیلانی و همکاران (۷) در بررسی اثر آبیاری بارانی بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد برنج در کشت مستقیم خشکه‌کاری در خوزستان مشاهده نمودند که بالاترین وزن هزار دانه در ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد آب مورد نیاز گیاه و کم‌ترین وزن هزار دانه در ۷۵ درصد آب مورد نیاز گیاه مشاهده شد.

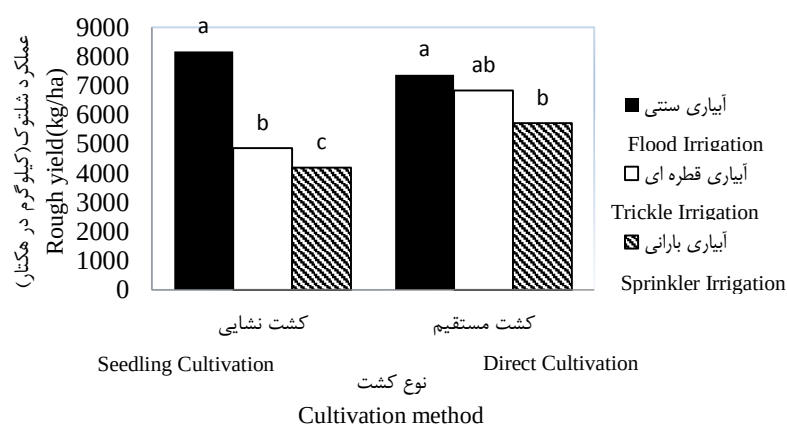
تعداد دانه پر و پوک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل آبیاری و روش کاشت بر دانه پر و پوک معنی‌دار بود (جدول ۲). در آبیاری سنتی بین روش‌ها کاشت تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد دانه پوک وجود نداشت؛ در حالی که در آبیاری نواری-تیپ و بارانی کشت نشایی (با میانگین ۵۱ و ۵۶ عدد برای آبیاری بارانی و قطره‌ای) تعداد دانه پوک بالاتری نسبت به کشت مستقیم (با میانگین ۴۱ و ۴۵ عدد برای آبیاری بارانی و قطره‌ای) داشته است (شکل ۴). بیش‌ترین تعداد دانه پر در آبیاری سنتی، در کشت نشایی به دست آمد که با مقدار به دست آمده در کشت مستقیم تفاوت معنی‌دار داشت؛ در حالی که در آبیاری بارانی و قطره‌ای، بین روش‌های کاشت تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد دانه پر در خوشه وجود نداشت.

در هکتار) بود که با مقادیر به‌دست‌آمده در آبیاری نواری-تیپ و بارانی (به ترتیب ۴۸۶۵ و ۴۱۸۸ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی‌دار داشته است (شکل ۲). رضایی و همکاران (۲۱) نیز در کاشت نشایی برنج با کاربرد مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری مشاهده نمودند که بیش‌ترین عملکرد در تیمار غرقاب دائم و کم‌ترین عملکرد در شدیدترین سطح کم‌آبیاری (۴ روز پس از ناپدید شدن آب) بود. در کشت مستقیم عملکرد شلتوک به‌دست‌آمده در آبیاری قطره‌ای (۶۸۳۶ کیلوگرم در هکتار) با آبیاری سنتی (۷۳۷۵ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی‌داری نداشت و کم‌ترین عملکرد در آبیاری بارانی (۵۷۱۲ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (شکل ۱). پراساد و همکاران (۱۷) گزارش کردند که برای اکثر گیاهان زراعی به‌خصوص آن‌هایی که مانند برنج محدودیت فیزیکی برای رشد دانه دارند، ظرفیت عملکرد عمدتاً توسط تعداد دانه در واحد سطح و طول دوره پر شدن دانه تعیین می‌شود و تنش گرمایی و کمبود آب طول دوره پر شدن دانه و اندازه بذر را کاهش می‌دهد. بررسی ماتریس ضرایب همبستگی بین مدیریت‌های آبیاری و روش کاشت و صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۱) نشان داد که تغییرات عملکرد شلتوک بیش‌تر توسط عملکرد زیست‌توده و طول خوشه توجیه می‌شود و با صفات تعداد دانه پوک در خوشه و تعداد پنجه غیر بارور همبستگی منفی و معنی‌دار داشته است.

وزن هزار دانه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل آبیاری و روش کاشت بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین داده‌های آزمایش نشان داد که در کشت نشایی آبیاری سنتی بالاترین وزن هزار دانه (۲۳/۰۸ گرم) را داشته است که با مقادیر وزن هزار دانه آبیاری نواری-تیپ و بارانی (۱۷/۶۳ و ۱۸/۶۷ گرم) تفاوت معنی‌دار داشته است (شکل ۳). در کشت مستقیم بالاترین وزن هزار دانه در



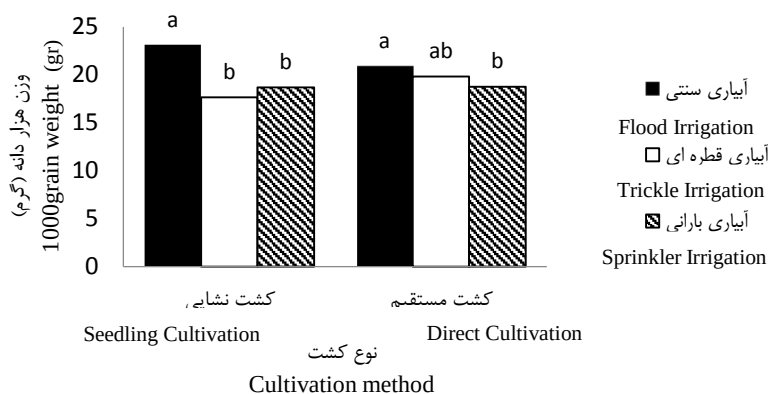
شکل ۲- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت عملکرد شلتوک

Figure 2- Interaction effect of Irrigation × method of cultivation on rice yield traits

جدول ۲- تجزیه واریانس خصوصیات زراعی برنج تحت تأثیر تیمار سیستم آبیاری × روش کشت
Table 2- Analysis of variance of rice agronomic properties under irrigation system treatment × cultivation method

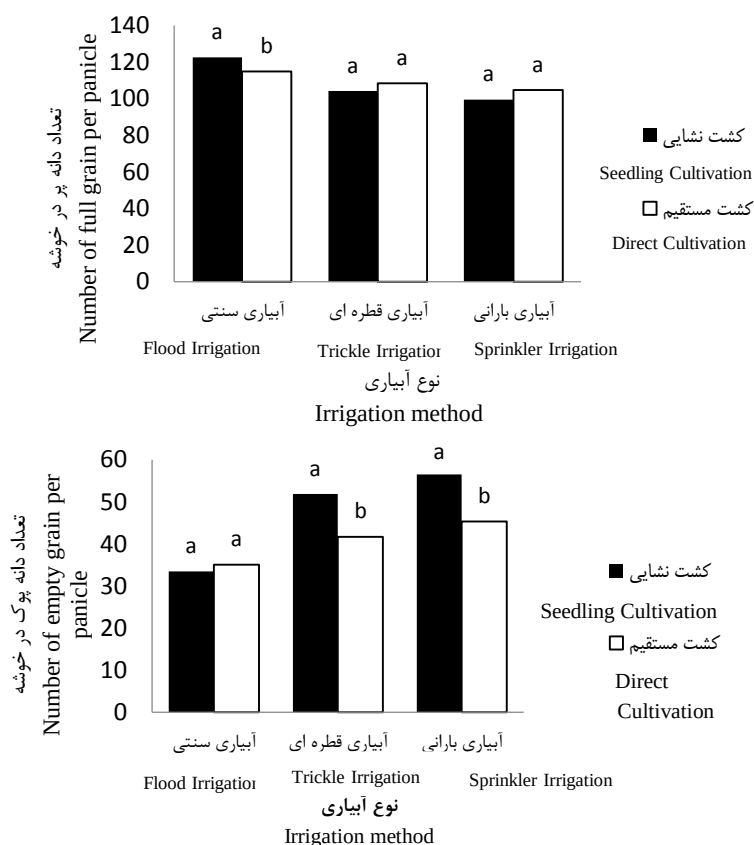
صفات زراعی													
Agronomic traits													
منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد بیولوژیک	عملکرد دانه	شاخص برداشت	میزان آب مصرفی	کارایی مصرف آب	وزن هزار دانه	ارتفاع بوته	طول خوشه	تعداد دانه پوک	تعداد دانه پر خوشه	پنجه بارور	پنجه غیر بارور
Source of variance	df	Biological yield	Grain yield	Harvest index	Wc	WUE	1000-grain weight	Plant height	Panicle length	Number of empty seeds	Number of full grains of cluster	Fertile claw	Non-fertile tillers
تکرار	2	117161 ^{ns}	6412 ^{ns}	0.16 ^{ns}	88741 ^{ns}	0.0016 ^{ns}	0.15 ^{ns}	44.84 ^{ns}	0.49 ^{ns}	12.79 ^{ns}	12.79 ^{ns}	0.66 ^{ns}	0.38 ^{ns}
سیستم آبیاری	2	48375767**	12502302**	6.00**	25617615**	0.13**	21.24**	1073.17**	27.05**	451**	451.29**	79.6**	6.18**
خطای سیستم	4	569036 ^{ns}	132990 ^{ns}	0.66 ^{ns}	44146 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	0.12 ^{ns}	13.55 ^{ns}	0.91*	10.25 ^{ns}	10.25 ^{ns}	4.7 ^{ns}	0.30 ^{ns}
روش کاشت	1	14918462**	3625226**	2.72*	147786ns	0.06**	0.0046 ^{ns}	189.41*	20.14**	195.95**	1.61 ^{ns}	1.38 ^{ns}	0.00001 ^{ns}
خطای روش	2	9834759**	3325753**	8.22**	818511 ^{ns}	0.08**	7.23**	27.67**	17.12**	76.06*	76.06*	10.1 ^{ns}	2.60**
تغییرات (درصد)	2	677909	108013	0.38	160811	0.0024	0.58	28.46	0.17	9.40	9.40	5.35	0.13
CV		6	5	2	4	7	4	6	2	7	3		118

ns, *, ** and *** به ترتیب به مفهوم غیر معنی دار و معنی دار در سطح ۱٪، ۵٪ و ۱٪ می‌باشد.
ns, * and **: Nonsignificant and significant at 5% and 1% level of probability respectively.



شکل ۳- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت وزن هزار دانه

Figure 3- Interaction of irrigation × method of cultivation on 1000-grain weight trait



شکل ۴- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت تعداد دانه پر و پوک در خوشه

Figure 4- Interaction of irrigation × method of cultivation on number of full and empty seeds traits per panicle

را گزارش نمودند. بنابراین شرایط افزایش دسترسی به آب می‌تواند سبب افزایش تعداد دانه پوک در خوشه گردد. شی و همکاران (۲۳) گزارش نمودند مدیریت‌هایی که سبب کوتاه شدن دوره فنولوژی برنج می‌شوند، سبب کاهش اجزای عملکرد از جمله باروری خوشه و وزن

ژنگ و همکاران (۲۷) عمق کم آب در مرحله آغازش و رشد پنجه‌های بارور را بهترین میزان آب برای رشد برنج با افزایش تعداد دفعات آبیاری توصیه نمودند و تأثیر منفی عمق زیاد آب (با افزایش ارتفاع آب از ۴ تا ۲۰ سانتی‌متر) روی مؤلفه‌های رشد و عملکرد برنج

بوته‌های برنج در محیط تنش خشکی ۸۰ درصد ظرفیت زراعی به مدت ۲۰ روز قرار گرفتند، میزان سطح برگ، ارتفاع، زیست‌توده، وزن خشک‌ریشه، وزن تر و وزن خشک گیاه چه در مقایسه با شاهد به‌صورت معنی‌داری کاهش یافت (۵). بالاترین تعداد پنجه غیر بارور در کشت نشائی در آبیاری نواری و قطره‌ای (۴/۴ و ۴/۰) به دست آمد که با آبیاری سنتی (۱/۴) تفاوت معنی‌دار داشت درحالی‌که در کشت مستقیم بالاترین تعداد پنجه غیر بارور در آبیاری بارانی (۳/۸۶) به دست آمد که با آبیاری قطره‌ای و سنتی (۳/۰۳ و ۲/۹) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۴). رضایی و نحوی (۲۷) بیان نمودند که کمبود دسترسی به آب ناشی از آبیاری غیر غرقابی با جلوگیری از انتقال املاح و مواد غذایی به گیاه و کاهش فتوسنتز باعث کاهش تعداد پنجه، سطح برگ، تجمع ماده خشک، تعداد دانه پر در خوشه، وزن صد دانه و درنهایت عملکرد می‌شود که با نتایج کربلایی و همکاران (۱۳۸۵) در توافق بود.

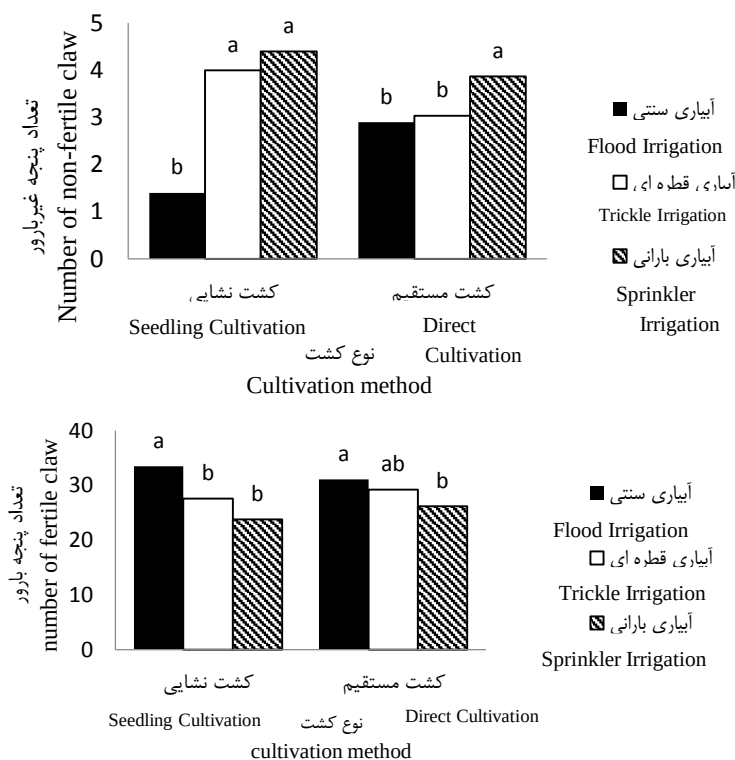
میزان آب مصرفی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روش کاشت و آبیاری بر میزان آب مصرفی معنی‌دار بود (جدول ۲). در کشت نشائی بیش‌ترین مقدار آب مصرفی در آبیاری سنتی (۱۰۷۰۰ متر مکعب در هکتار) بوده است و روش‌های آبیاری نواری-تیپ و بارانی (به ترتیب ۷۲۹۰ و ۹۲۰۰ متر مکعب در هکتار) تفاوت معنی‌داری با هم نداشتند (شکل ۶).

دانه می‌شود. بنابراین هر گونه تنش در اجرای روش‌های آبیاری می‌تواند در افزایش عقیمی خوشه و افزایش تعداد دانه و پوک مؤثر باشد. این نتایج با یافته‌های حبیبی اصل و همکاران (۱۳۸۸) که روش خشکه کاری را در سه رقم مورد امتحان قرار داده بودند، همخوانی داشت.

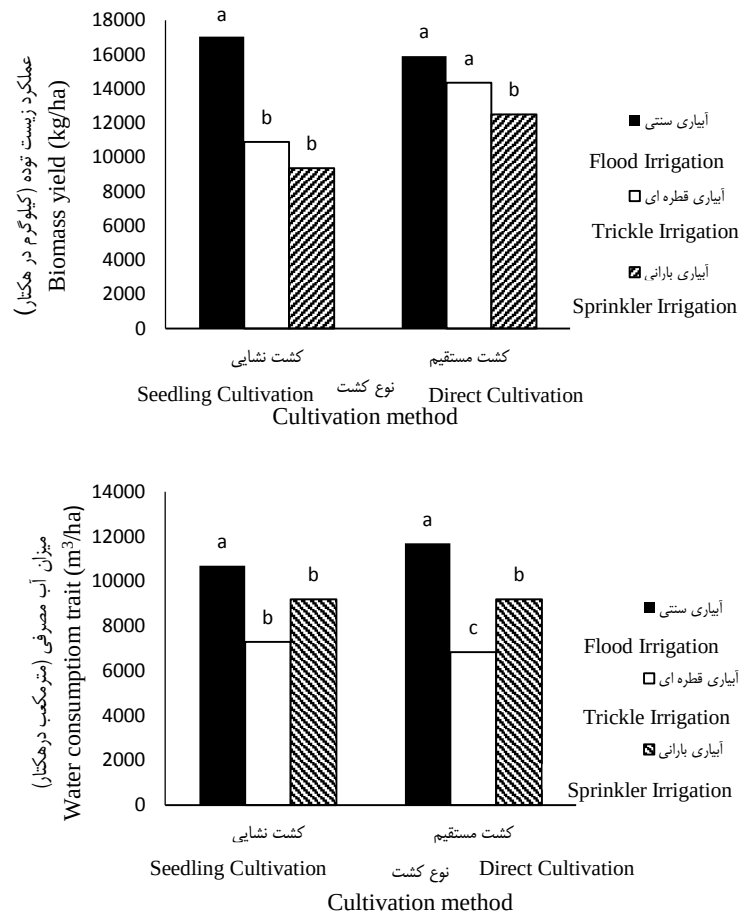
پنجه بارور و پنجه غیر بارور

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل آبیاری و روش کاشت بر تعداد پنجه بارور و غیر بارور معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین تعداد در نشائی در آبیاری سنتی (۳۳/۴) بود که با مقادیر به‌دست‌آمده آبیاری نواری-تیپ و بارانی (۲۷/۶ و ۲۳/۷) تفاوت معنی‌دار دارد (شکل ۵)؛ درحالی‌که بالاترین تعداد پنجه بارور در کشت مستقیم در آبیاری سنتی و نواری-تیپ (۳۱/۰۶ و ۲۹/۲) به دست آمد که با تعداد آن در آبیاری بارانی (۲۶/۲) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۵). پیر دشتی و همکاران (۱۶) اثرات کمبود آب را در مراحل مختلف رشد رویشی، گلدهی و پر شدن دانه‌ها، بر عملکرد و اجزای عملکرد چهار رقم برنج طارم، خزر، فجر و نعمت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمبود آب در مرحله رویشی به‌طور معنی‌داری باعث کاهش ارتفاع بوته و تعداد پنجه‌ها شد، درحالی‌که در مرحله زایشی و پر شدن دانه، تعداد دانه و وزن دانه‌ها را کاهش داد و در مرحله رویشی حساسیت بوته‌های برنج به کمبود آب بیشتر بود. در تحقیقی، وقتی



شکل ۵- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت تعداد پنجه بارور و غیر بارور

Figure 5- Interaction of Irrigation x Method of cultivation on number of fertile and non-fertile tillers



شکل ۶- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت میزان آب مصرفی و اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت عملکرد زیست توده

Figure 6- Interaction of Irrigation × cultivation method on water consumption trait and interaction of irrigation × cultivation method on biomass yield

بالاترین عملکرد زیست توده در کشت نشایی در آبیاری سنتی (۱۷۰۴۵) کیلوگرم در هکتار) به دست آمد که با مقادیر به دست آمده در آبیاری نواری - تیپ و بارانی (به ترتیب ۱۰۸۹۶ و ۹۳۷۳ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی دار داشته است. در حالی که در کشت مستقیم عملکرد زیست توده آبیاری سنتی (۱۵۹۱۵ کیلوگرم در هکتار) با آبیاری قطره ای (۱۴۳۴۹ کیلوگرم در هکتار) تفاوت معنی داری نداشت و کمترین عملکرد زیست توده در آبیاری بارانی (۱۲۵۱۱ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد (شکل ۶). به نظر می رسد کاهش رطوبت در منطقه رشد ریشه روی تولید زیست توده گیاه اثر منفی گذاشته است. میر ابوالقاسمی و همکاران (۱۳) بیان نمودند که برنج برای توسعه ریشه خود نیاز به شرایط اشباع دارد و کاهش رطوبت خاک از حد اشباع، باعث کاهش میزان عملکرد ماده خشک شده است. گیاهان سه کربنی مانند برنج در شرایط عدم آبیاری به سرد کردن برگ های خود از طریق تعرق وابسته می باشند. در چنین شرایطی، خشکی خاک سبب می شود گیاه علاوه بر دمای محیط به دلیل عدم توانایی تعرق، تنش گرمایی مضاعفی را تحمل کند که سبب آسیب به گیاه می شود (۲۵).

در حالی که در کشت مستقیم آبیاری نواری - تیپ کمترین مقدار مصرف آب (۶۸۴۰ متر مکعب در هکتار) را داشته و با سایر روش های آبیاری (به ترتیب ۱۱۶۹۳ و ۹۲۰۰ متر مکعب در هکتار مصرف آب در آبیاری سنتی و بارانی) تفاوت آن معنی دار بوده است. میرزایی و قدمی فیروزآبادی (۱۴) در بررسی کمیت و کیفیت چغندر قند در دو سیستم آبیاری جویچه ای و قطره ای در همدان مشاهده نمودند که مقدار مصرف آب در آبیاری قطره ای با تأمین ۱۰۰ درصد نسبت به آبیاری جویچه ای حدود ۸۰ درصد کاهش نشان داد. در صورتی که اختلاف تفاوت عملکرد قند قابل استحصال آن ها در دو سال آزمایش معنی دار نبود و با هدف کاهش مصرف آب و دستیابی به کارایی مصرف آب بالا، تیمار آبیاری قطره ای با تأمین ۷۵ درصد نیاز آبی چغندر قند توصیه شد.

عملکرد زیست توده

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روش کاشت و آبیاری بر عملکرد زیست توده معنی دار بود (جدول ۲). بر اساس نتایج

شاخص برداشت

بارانی و سنتی (به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۶۳ کیلوگرم بر متر مکعب) تفاوت معنی‌دار داشتند (شکل ۸). بلدر و همکاران (۳) دریافتند که با تغییر روش آبیاری غرقاب به غیر غرقاب در گیاه برنج مقدار بهره‌وری آب افزایش می‌یابد. لمپین و همکاران (۱۰) مشاهده نمودند که کاهش مصرف آب با افزودن تناوب آبیاری و خشکی نسبت به آبیاری غرقاب، سبب بهبود بهره‌وری آب در برنج از نظر تولید عملکرد دانه می‌شود. گیلانی و همکاران (۸) در بررسی اثر آبیاری بارانی بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و راندمان مصرف آب ارقام برنج در کشت مستقیم خشکه‌کاری در خوزستان در سه سطح آبیاری ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد آب مورد نیاز گیاه، مشاهده نمودند که بالاترین راندمان مصرف آب مربوط به سطح ۷۵ درصد با ۱۷۹ گرم در متر مکعب بود. قدمی فیروزآبادی و همکاران (۱۸) در بررسی اثر سامانه‌های آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب سه ژنوتیپ گندم و ارزیابی اقتصادی آن‌ها در همدان مشاهده نمودند آبیاری قطره‌ای باعث افزایش ۱۳۲ و ۴۵ درصدی کارایی مصرف آب نسبت به روش جویچه‌ای و بارانی گردید. مولایی (۱۵) در بررسی آبیاری بارانی و نواری-تیپ از لحاظ عملکرد و کارایی مصرف آب در ارقام برنج مشاهده نمودند که آبیاری نواری-تیپ (۶۲۸۰ متر مکعب بر هکتار) میزان مصرف آب را نسبت به آبیاری بارانی (۷۴۷۰ متر مکعب بر هکتار) ۱۶ درصد کاهش داد و در این پژوهش آبیاری نواری-تیپ در مقایسه با آبیاری بارانی عملکرد بیشتر و کارایی مصرف آب بالاتری داشت.

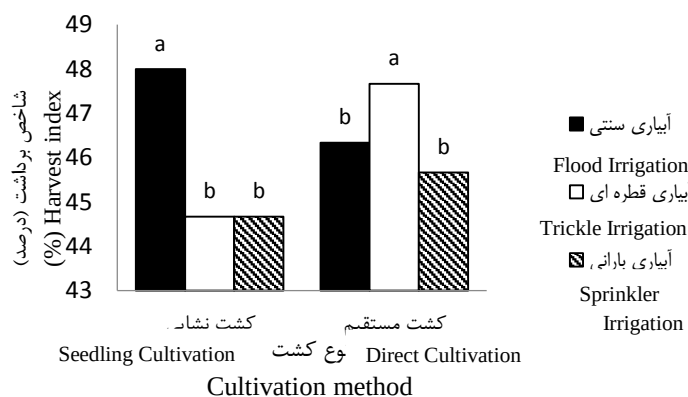
نتیجه‌گیری

تنظیم مصرف آب از هر دو طریق مصرف کم‌تر آب و کاهش هدرروی آب می‌تواند سبب سوق دادن نظام‌های تولید برنج به بهره‌وری بیشتر آب برای ایجاد نظام‌های تولید پایدار برنج شود. استفاده از روش آبیاری غرقابی، مستلزم مصرف فراوان آب می‌باشد. با توجه به افزایش خطر کمبود آب، نیاز به روش‌های آبیاری که مصرف آب را کاهش دهند الزامی می‌باشد.

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روش کاشت و آبیاری بر میزان شاخص برداشت معنی‌دار بود (جدول ۲). در کشت نشائی بالاترین شاخص برداشت در آبیاری سنتی به دست آمد (۴۸ درصد) که با مقادیر به‌دست‌آمده در آبیاری بارانی و نواری-تیپ (به ترتیب ۴۴/۶ و ۴۴/۶ درصد) تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۷)؛ در حالی که در کشت مستقیم بالاترین شاخص برداشت در آبیاری قطره‌ای (۴۷/۶ درصد) به دست آمد که با آبیاری سنتی و بارانی (به ترتیب ۴۶/۳ و ۴۵/۶ درصد) و تفاوت معنی‌دار داشت (شکل ۷). صنوبر و همکاران (۲۲) در بررسی اثر آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم مشاهده نمودند که در شرایط نامناسب آبیاری، مقادیر عملکرد دانه و شاخص برداشت روند کاهشی به خود گرفت که کاهش در عملکرد دانه مستقیماً متأثر از کاهش در اجزای تشکیل‌دهنده آن بود و کاهش در شاخص برداشت گواه این نکته بود که عملکرد دانه در اثر دسترسی نامناسب آب به گیاه، تأثیرپذیری بیشتری نسبت به عملکرد ماده خشک (کل) گیاه داشت که مهم‌ترین دلیل عمده آن طولانی‌تر بودن طول دوره پر شدن دانه و بالاتر بودن سرعت انتقال مواد فتوسنتزی اندام‌ها به سمت دانه در تیمارهای رطوبتی با فواصل آبیاری کمتر بود. طی آزمایشی مشابه در اثر شرایط رطوبتی نامناسب عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت گندم به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (۲۶).

بهره‌وری مصرف آب

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر متقابل روش کاشت و آبیاری بر میزان کارایی مصرف آب معنی‌دار بود (جدول ۲). در کشت نشائی بالاترین بهره‌وری آب در آبیاری سنتی و قطره‌ای (به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۶۶ کیلوگرم بر متر مکعب) به دست آمد که آبیاری بارانی (۰/۴۵ کیلوگرم بر متر مکعب) تفاوت معنی‌دار داشتند؛ در حالی که در کشت مستقیم بالاترین میزان بهره‌وری در آبیاری نواری-تیپ (۰/۹۹ کیلوگرم بر متر مکعب) به دست آمد که با تیمارهای آبیاری

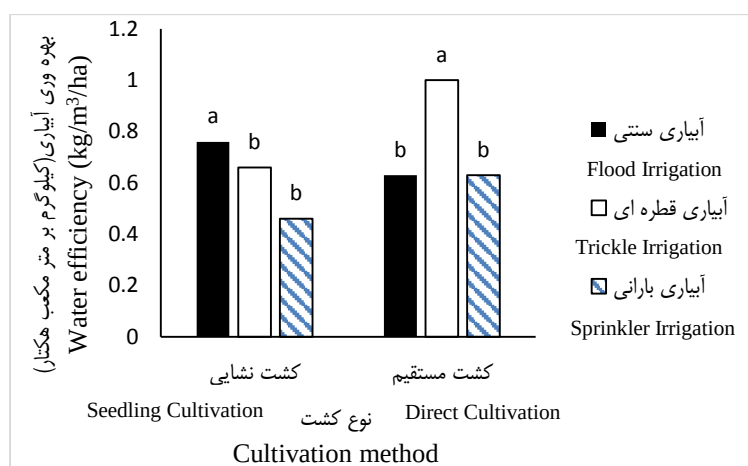


شکل ۷- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت شاخص برداشت

Figure 7- Interaction of irrigation × cultivation method on harvest index

جدول ۳- همبستگی عملکرد و اجزای عملکرد برنج تحت تیمارهای آبیاری و روش کاشت
Table 3- Correlation of yield and yield components of rice under irrigation treatments and cultivation method

	تعداد پنجه عقیم در بوته Number of non-fertile claw in plant	تعداد پنجه پوک در خوشه Number of empty grains per panicle	تعداد پنجه بارور بوته Number of fertile claw in plant	عملکرد زیست توده Biomass yield	عملکرد شلوک Rough yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن دانه 1000-grain weight	ارتفاع بوته Plant height	طول خوشه Panicle length	تعداد دانه پر در خوشه Number of full grain per panicle
تعداد پنجه عقیم در بوته Number of non-fertile claw in plant	1.00000									
تعداد دانه پوک در خوشه Number of empty grains per panicle	0.85**	1.00000								
تعداد پنجه بارور بوته Number of fertile claw in plant	-0.80370	-0.85405	1.00000							
عملکرد زیست توده Biomass yield	-0.85**	-0.93**	0.83**	1.00000						
عملکرد شلوک Rough yield	-0.87**	-0.93**	0.83**	0.99**	1.00000					
شاخص برداشت Harvest index	-0.77**	-0.70**	0.58*	0.76**	0.81**	1.00000				
وزن ۱۰۰۰ دانه 1000-grain weight	-0.80**	-0.78**	0.70**	0.81**	0.83**	0.75**	1.00000			
ارتفاع بوته Plant height	-0.71**	-0.87**	0.71**	0.86**	0.85**	0.61**	0.83**	1.00000		
طول خوشه Panicle length	-0.81**	-0.88**	0.72**	0.91**	0.92**	0.80**	0.77**	0.78**	1.00000	
تعداد دانه پر در خوشه Number of full grain per panicle	-0.92**	-0.93**	0.89**	0.89**	0.89**	0.66**	0.84**	0.84**	0.79**	1.00000



شکل ۸- اثر متقابل آبیاری × روش کشت روی صفت بهره‌وری آب
Figure 8- Interaction of irrigation × method of cultivation on water efficiency

غرقابی از نقطه نظر اقتصادی می‌بایست، با قیمت واقعی آب مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در مجموع در این تحقیق روش آبیاری نواری-تیپ ضمن کاهش مصرف آب، توانایی افزایش بهره‌وری آب و حفظ میزان عملکرد برنج در کشت مستقیم را داشته است. آبیاری بارانی کم‌ترین عملکرد شلتوک را در کشت نشائی و کشت مستقیم داشته است. به نظر می‌رسد مشکلاتی از جمله عدم یکنواختی پاشش و هدر روی آب از طریق باد و نیز عدم کیفیت آبپاش‌ها از دلایل مهم کاهش کارایی آبیاری بارانی باشد.

مهم‌ترین دستاورد این تحقیق این بود که روش‌های آبیاری نوین با کاهش مصرف آب، عملکرد قابل قبولی را تولید کردند. نتایج این آزمایش نشان داد که روش آبیاری نواری-تیپ ضمن کاهش مصرف آب، توانایی افزایش بهره‌وری آب و حفظ میزان عملکرد برنج در کشت مستقیم را داشته است؛ درحالی‌که این روش در کشت نشائی نیازمند بررسی‌های بیش‌تر و در نظر گرفتن تمهیدات جدی‌تر جهت افزایش بهره‌وری آب و عملکرد برنج هست. در کشت نشائی، آبیاری قطره‌ای و سنتی دارای بازده مصرف آب بیشتری نسبت به آبیاری نواری-تیپ بود البته کاهش معنی‌دار عملکرد در آبیاری قطره‌ای نسبت به آبیاری

منابع

- 1- Arabzadeh B. 2005. Investigation of low-irrigated crops in seedling cultivation in Fajr cultivar rice. Iran Rice Competitive Expectations. 24. (In Persian)
- 2- Baghbani J. 2000. The effect of irrigation period and number of droplets irrigation on yield and quality of watermelon in Khorasan Agricultural Research Center, issue 1351. (In Persian)
- 3- Belder P., Bouman B.A.M., and Spiertz J.H.J. 2007. Exploring option for water savings in lowland rice using a modeling approach. Agricultural Systems 92: 91-114.
- 4- Bouman B.A.M., Lampayan R.M., and Tuong T.P. 2007. Water management in irrigated rice: coping with water scarcity. Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute. 54 p.
- 5- Farooq M., Wahid D. A.; Lee J.O.; and Siddique K.H.M. 2009. Advances in drought resistance of rice. Critical Reviews in Plant Science. 28:199-217. film. Agri. Water Management, ISSN 0378-3774, CODEN AWMADF. 79: 265-279.
- 6- Gilani A., and Absalan Sh.A. 2010. Investigation of the effect of irrigation regimes on individuals and growth indicators of irrigation in Khoozestan. Agricultural Education and Training Organization. Final Research Project Report. (In Persian)
- 7- Gilani A., and Rezaei M. 2001. Comparison of Sprinkler and Flood Irrigation Application for Rice Direct Seeding Cultivation in Khuzestan. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO). Final report. (In Persian)
- 8- Gilani A., Absalans Sh., Jalali S., and Behbahani L. 2019. Effect of sprinkler irrigation on grain yield, yield components and water use efficiency of rice cultivars in direct drying in Khuzestan. Irrigation Science and Engineering 42(2): 63-73. (In Persian with English abstract)
- 9- Habibi Asl J., Loimi N., and Gilani A. 2009. Study and comparison of three mechanized drying methods of different rice cultivars in Khuzestan. Journal of Agricultural Engineering Research. 1(10): 81-96.

- 10- Kahlowan M. A., Raoof A., Zubair M., and Kemper W.D. 2007. Water use efficiency and economic feasibility of growing rice and wheat with sprinkler irrigation in the Indus Basin of Pakistan. *Agricultural Water Management* 87(3): 292-298.
- 11- Karbalaee MT., Aqeb P., and Hosseini H. 2006. Direct cultivation of rice cultivars (drying method and wet bed) in comparison with transplanting in Mazandaran province. 9th Congress of Agriculture and Plant Breeding.
- 12- Lampayan R.M., Samoy-Pascual K.C., Sibayan E.B., Ella V.B., Jayag O.P., Cabangon R.J., and Bouman B.A.M. 2015. Effects of alternate wetting and drying (AWD) threshold level and plant seedling age on crop performance, water input, and water productivity of transplanted rice in Central Luzon, Philippines. *Paddy and Water Environment* 13(3), 215-227.
- 13- Majidian M., Ghalavandi A., Haghighi K., and Karimian N. 2008. Effect of drought stress, nitrogen and organic fertilizer on chlorophyllometer reading, grain yield and yield components of corn cross 704. *Iranian Journal of Crop Sciences* 10: 304-330. (In Persian)
- 14- Maneta M., Torres M.d.O., Wallender W., Vosti S., Howitt R., Rodrigues L., Bassoi L., and Panday S. 2009 A spatially distributed hydroeconomic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research* 45(11): W11412.
- 15- Mir Abolghasemi S.A.M., Ghobadi Nia M., Ghasemi A.R., and Annoryemamzadehe M.R. 2016. Influence of underground irrigation and irrigation management on growth characteristics and yield components of rice in arid and semiarid region. *Water and Soil* 31(2): 411-421. (In Persian)
- 16- Mirzai M.R., and QadamiFirouzAbadi A. 2007. Investigation of beet quantity and quality in furrow and drip irrigation systems in Hamadan. *Sugar Beet Journal* 23 (2): 111-123. (In Persian)
- 17- Molaei B. 2012. Investigation of t-tape and rainfall drip irrigation for yield and water consumption efficiency for two Born and Satina potato cultivars under different organic fertilizer consumption conditions. Master thesis. Isfahan University of Technology. 110. (In Persian)
- 18- Mmomeni A. 2016. A look at the development capabilities of aerobic rice cultivation in conditions of water shortage crisis in Iran. *Journal of Crop Sciences* 18(3): 179-195.
- 19- Pirdashti H., Sarvestani Z.T., Nematzadeh G., and Ismail A. 2004. September. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. In The 4th International Crop Science Congress. Brisbane, Australia.
- 20- Prasad P.V.V., Staggenborg S.A., and Ristic Z. 2008. Impacts of drought and/or heat stress on physiological, developmental, growth, and yield processes of crop plants. Response of crops to limited water: Understanding and modeling water stress effects on plant growth processes, (responseofcrops), 301-355.
- 21- QadamiFirouzabadi A., Chaychi M., and Sidan S.M. 2017. The effect of irrigation systems on water yield and productivity of three wheat genotypes and their economic evaluation in Hamadan. *Water Research in Agriculture* 31.2(2): 149-139. (in Persian)
- 22- Razavi Pour T., Yazdani M.R., and Kavusi M. 2000. Effect of soil moisture stress at different stages of rice growth on grain yield of Binam cultivar. *Proceedings of the 6th Iranian Soil Science Congress, Mashhad.* 613-614. (In Persian)
- 23- Rezaei M., and Nahvi M. 2007. Effect of irrigation interval on rice yield. *Proceedings of the 11th Conference on Irrigation and Drainage. Tehran.* 233-240. (In Persian)
- 24- Rezai M., and Nahvi M. 2003. Effect of irrigation intervals on rice yields. *Content studies of irrigation and drainage fuels. Tehran.* (In Persian)
- 25- Senobar A., Tabatabai S.A., and Dahghane F. 2010. The Effect of Irrigation Period on Grain Yield and Yield Components of Bread Wheat Genotypes in Yazd Region. *Journal of Environmental Stress in Agricultural Sciences* (2): 95-104. (In Persian)
- 26- Shi HR., Zhang WZ., Xie WX., Yang Q., Zhang Z.Y., et al. 2009. Analysis of matter production characteristics under different nitrogen application patterns of japonica super rice in north China. *Acta Agronomica Sinica* 34: 1985-1993. (In Chinese with English abstract)
- 27- Sohrabi T., Alizadeh M., and Babaei H. 2010. Performance evaluation of irrigation systems under pressure of Qazvin irrigation network. *Third national conference on irrigation and drainage management, ShahidChamran University of Ahvaz.* 190 (In Persian)
- 28- Taiz L., and Zeiger E. 2006. *Plant physiology.* Sinauer Associates. Sunderland MA. US. 2010. 782 p.
- 29- Yan-Jun D., Zi-Zhen L., and Wen-Long L. 2006. Effect of different water supply regimes on.
- 30- Zhang H., Links P.H., Ngsee J.K., Tran K., Cui Z., Ko K.W., and Yao Z. 2003. Localization of LDL receptor-related protein 1 (LRP1) to caveolae in 3T3-L1 adipocytes in response to insulin treatment. *Journal of Biological Chemistry.*



The Effect of Trickle and Sprinkler Irrigation Systems on Yield and Water Productivity of Rice in Transplanting and Direct Cultivation Methods

M. Karimi Fard¹- M. Zakerinia^{2*}-A.R. Kiani³- M.T. Feyz Bakhsh⁴

Received: 05-02-2020

Accepted: 26-08-2020

Introduction: Rice is the second most important edible grain after wheat in Iran. The most important factor for sustainable production in rice production lands, is water. Almost 75 percent of the world's rice is produced from paddy fields and rice is the largest consumer of water among all crops. Its growth is significantly affected by climate change and water scarcity. This research was carried out to compare the direct cultivation and transplanting of rice under different irrigation methods from the point of view of water productivity.

Material and Methods: The current work was designed as split plot based on randomized complete block design with 6 treatments and three replications in 18 plots with 6 m wide and 12 m length (72 m^2) in area of approximately 1500 m^2 at the Agricultural Research Station of Golestan province in spring and the summer of 2018. Treatments including three levels of basin irrigation, sprinkler and drip (tape) irrigation were considered as main factors and two methods of direct cultivation and transplanting were considered as sub-factors.

Results and Discussion: The results of analysis of variance showed that the effect of irrigation and sowing method on the yield of rice were significant at 0.01 level probability. The highest amount of biological yield in transplanting was obtained by basin irrigation (8177 kg/ha) and in direct seeding in basin irrigation and taper irrigation (7375 and 6836 kg/ha, respectively). The highest 1000-grain weight in transplanting method was obtained in basin irrigation and direct seeding method in traditional irrigation and tape irrigation. The highest number of filled grains in the panicle was observed in the basin irrigation treatment in transplanting, with significant difference compared to the amount observed in direct seeding. Traditional irrigation between planting methods had not significant effect on the number of hollow grains; while in sprinkler and tape irrigation (with an average of 51 and 56 for sprinkler and tape irrigation, respectively), the number of hollow grains had a higher rate in direct seeding (with an average of 41 and 45 for sprinkler and tape irrigation). The results showed that basin irrigation with 8177 kg/ha grain yield in transplanting method and basin and tape irrigations with 7375 and 6836 kg/ha in direct seeding method had the highest grain yield. Sprinkler irrigation had the lowest paddy yields in transplanting (4188 kg/ha) and direct seeding (5712 kg/ha). Tape irrigation with 7390 and 6840 m^3 of consumed water, resulted in lower water consumption compared to traditional irrigation (10700 and 1693 m^3), respectively. The highest amount of water use efficiency was obtained in direct and tape irrigation (0.99 kg/m^3) and in traditional and tape irrigation (0.76 and 0.66 kg/m^3 , respectively).

Conclusion: Adjusting water consumption both through lower water consumption and reduced water wastage can lead higher water productivity of rice production systems creating sustainable rice production systems. In transplanting method, tape irrigation and traditional irrigation had higher water use efficiency than sprinkler irrigation, although a significant water use reduction in tape irrigation rather than basin irrigation should be analyzed economically at real water prices. Overall, in this study, the tape irrigation method, by reducing water consumption, was able to increase water productivity and maintain the yield of rice in direct cultivation. Sprinkler

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor Department of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mzakerinia@gmail.com)

3- Research Professor of Technical and Engineering Department, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center

4- Assistant Professor of Agriculture and Horticulture, Golestan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.84952

irrigation had the lowest yield of rice in transplanting and direct cultivation. Problems such as lack of uniformity of spraying and waste water through the wind as well as poor quality of sprinklers are the main reasons for the decrease of the efficiency of sprinkler irrigation.

Keywords: Direct cultivation, Transplanting cultivation, Trickle irrigation, Production, Rice.

مقاله علمی-پژوهشی

پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی با استفاده از منطق فازی (حوزه آبخیز قلعه گرگ شوشتر)

محمدرضا انصاری^{۱*} - فریدون سلیمانی^۲ - علیرضا احمدی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰

چکیده

در اثر فرسایش خاک، مهم‌ترین منبع تولید مایحتاج بشر از بین می‌رود. به همین سبب، لزوم انجام تحقیقات بنیادی و کاربردی در زمینه ارزیابی فرسایش خاک به روش‌های مختلف در راستای مدیریت جامع منابع طبیعی بیش از پیش مورد تاکید قرار گرفته است. هدف از این پژوهش کاربرد عمل‌گرهای منطق فازی در پهنه‌بندی فرسایش خندقی در حوزه آبخیز قلعه گرگ واقع در شهرستان شوشتر می‌باشد. در این پژوهش میزان شش متغیر تأثیرگذار در فرسایش خاک شامل: میانگین وزنی قطر خاکدانه، سدیم قابل جذب، شوری، شن‌ریز، سیلت و رس خاک مطابق روش‌های استاندارد آزمایشگاهی تعیین گردید. سپس کلاس‌بندی مجدد و استانداردسازی لایه‌ها به روش فازی انجام و لایه‌های فازی شده با استفاده از عمل‌گرهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی و گامای فازی ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۹ با یکدیگر تلفیق و نتایج حاصله مورد ارزیابی قرار گرفت. در پایان جهت اعتبارسنجی نقشه‌های تهیه شده، از دو روش درصد تطابق نقشه مناطق دارای حساسیت خیلی زیاد و زیاد با نقشه خندق‌های منطقه و شاخص مجموع کیفیت (QS) استفاده شد. با توجه به نتایج به‌دست آمده و با در نظر گرفتن مساحت پهنه‌های مختلف و میزان درصد خندق‌های رخ داده در هریک از آنها، گامای فازی ۰/۹ با دارا بودن بیشترین میزان شاخص مجموع کیفیت (۰/۷۳) در بین عمل‌گرهای مختلف، همچنین ۹۴/۹۳ درصد تطابق نقشه خندق‌های منطقه با مناطق حساسیت خیلی زیاد و زیاد به‌عنوان بهترین روش جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی مناطق حساس به فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی، فرسایش خندقی، لایه‌های فازی، عمل‌گر فازی

مقدمه

در کشور ایران فرسایش خندقی از این جهت حائز اهمیت است که حدود ۹۰ درصد از کشور دارای اقلیم خشک و نیمه خشک بوده و بارندگی در این مناطق از پراکنش زمانی مناسب برخوردار نمی‌باشد. در چنین شرایطی نبود یا کمبود پوشش گیاهی همراه با افزایش رواناب موجب از بین رفتن بیش از ۲/۵ میلیارد تن خاک در سال را فراهم می‌کند (۱). اصلی‌ترین عوامل تشکیل خندق وجود جریان متمرکز رواناب در سطح خاک یا فرسایش زیر زمینی و ریزش سقف این نوع فرسایش است که شرایط توپوگرافی و زمین شناسی تعیین کننده این دو عامل است (۲۱ و ۳۱). از طرفی عوامل انسانی مانند تغییر کاربری زمین، تخریب جنگل‌ها و مراتع، کاهش پوشش گیاهی و گسترش

مناطق مسکونی و راه‌های ارتباطی نیز با ایجاد تغییرات اساسی در شرایط هیدرولوژیکی طبیعی حوزه‌های آبخیز، زمینه ساز و تشدید کننده ایجاد فرسایش خندقی می‌باشند (۵).

در پژوهشی که توسط مارزولف و پوزن (۱۷) در زمینه شناسایی مناطق دارای پتانسیل فرسایش خندقی در اسپانیا انجام گرفته است نتایج حاکی از آن است که مناطق خشک و نیمه خشک و خاک‌هایی با بافت سبک و لسی و سازند ضعیف دارای پتانسیل بالایی در خندق‌زایی می‌باشند. با توجه به افزایش سریع فرسایش خاک و تاثیر بسزایی که فرسایش خندقی به عنوان بدترین شکل تخریب خاک دارد برای تسهیل و افزایش دقت درخصوص تحقیقات مرتبط با فرسایش خاک لزوم بررسی خواص و مشخصات خاک با استفاده از تکنیک‌های

۲- استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۱ و ۳- به‌ترتیب استادیار و کارشناسی ارشد خاک‌شناسی، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ایران
(Email: ansari386@yahoo.com) (*- نویسنده مسئول)

منطقه بدلدن را محاسبه نموده و با استفاده از رابطه تجربی مدلی که بیشترین مقدار احتمال تجربی را داشته باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب نمودند.

در این تحقیق با توجه به اینکه فرسایش خندقی و تغییر کاربری اراضی در حوزه قلعه گرگ به نسبت زیاد بوده و وجود شرایط خاص ژئومورفولوژیکی و توپوگرافیکی (شامل طبقات شیب: ۲-۵، ۵-۸، ۸-۱۲، ۱۲-۲۰، ۲۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ درصد، و واقع شدن بیشتر مناطق فرسایشی در شیب ۵-۰ درصد و در قسمت رسوبات کواترنر حوضه حاصل از تجمع مواد آبرفتی مناطق بالادست) سبب به وجود آمدن اشکال مختلف فرسایش خاک در منطقه مورد مطالعه گردیده لزوم انجام این پژوهش و ارایه راهکارهای نوین در این خصوص ضروریست. هدف از این پژوهش کاربرد عمل گرهای منطق فازی در ارزیابی پهنه بندی فرسایش خندقی می باشد تا با بررسی تعدادی از متغیرهای مؤثر شامل: میانگین وزنی قطر خاکدانه (MWD)، سدیم قابل جذب، شوری، شن ریز، سیلت و رس خاک همچنین لایه های شیب، کاربری اراضی و زمین شناسی حوزه مناطق با پتانسیل بالای خندق زایی شناسایی و تعیین گردد. ملاک و معیار انتخاب این پارامترها بر اساس بازدید میدانی و مشاهده عینی آثار شوری و قلیائیت و همچنین لیتولوژی منطقه (سازند آغاجاری و رسوبات کواترنر که عمدتاً رسوبات ریزدانه و حساس به فرسایش می باشند) بوده است. همچنین در این تحقیق استعداد، پتانسیل و پهنه بندی مناطق حساس به فرسایش با توجه به پارامترهای خاص ذاتی منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها

منطقه مورد پژوهش

پژوهش صورت گرفته در زمستان ۱۳۹۶ درحوزه آبخیز قلعه گرگ یکی از زیرحوضه های شهید مدرس در استان خوزستان به مساحت ۵/۶۳۲۷ هکتار در ۶۵ کیلومتری شمال شرق اهواز در بخش قلعه گرگ شهرستان شوشتر صورت گرفت. این حوضه در محدوده جغرافیایی ۳۵° ۳' ۴۹" تا ۵۹° ۱۲' ۴۹" طول شرقی و ۴۹° ۴۲' ۳۱" تا ۴۷° ۲۸' ۳۱" عرض شمالی واقع شده است. اقلیم منطقه طبق روش دومارتن نیمه خشک و گرم تا خشک و گرم بوده و رژیم های رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب یوستیک و هایپرترمیک می باشند.

حوضه مورد مطالعه از جنوب و غرب به جاده اهواز-مسجد سلیمان و رودخانه گرگر و از شمال و شرق به ارتفاعات محدود می گردد. این حوضه جزء حوزه های آبخیز رودخانه گرگر (شاخه ای از رودخانه کارون) محسوب می گردد.

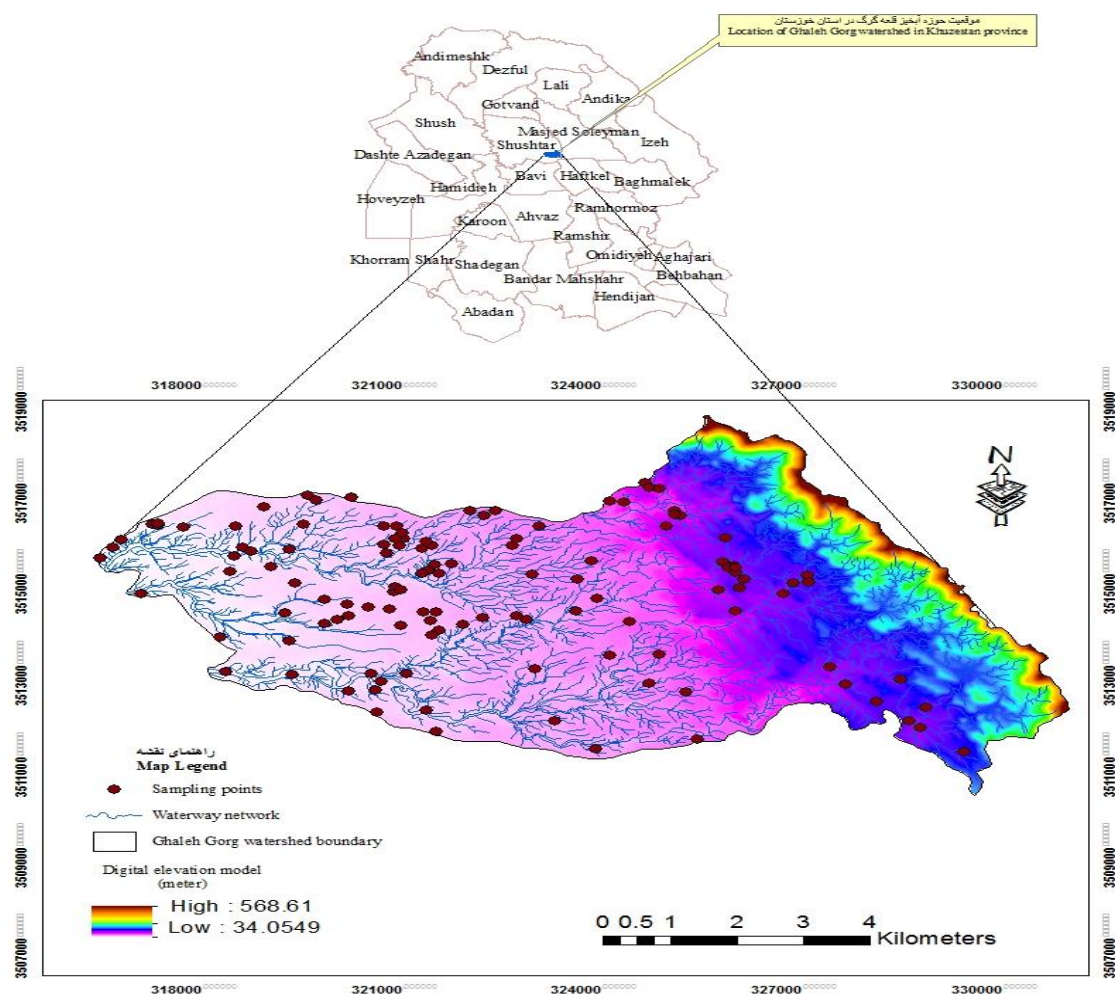
جدید جهت جلوگیری از تخریب فاجعه بار زمین لازم می باشد (۳). در نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته در خصوص فرسایش خندقی حوضه دهدشت مشخص گردید تراکم خندق ها در منطقه بسیار بالاست و هدایت الکتریکی در بیش از ۹۵ درصد خندق ها در افق های پایینی بیش تر است. همچنین پایداری خاکدانه ها به عنوان یکی از عوامل تاثیرگذار در فرسایش بیانگر توانایی خاک در حفظ اندازه خاکدانه ها در برابر نیروهای خارجی است. پایداری اندک خاکدانه ها باعث تخریب آسان آن ها، تراکم خاک، ایجاد سله، کاهش سرعت نفوذ آب به خاک، افزایش رواناب و فرسایش خاک می شود (۲۵).

عوامل گستره آبخیز، درصد سیلت و شن ریز، باتوجه به معادلات به دست آمده به ترتیب جزء مهم ترین عوامل در گسترش فرسایش خندقی و تولید رسوب در منطقه دشت کهور می باشد (۳۳). مهم ترین عوامل در گسترش خندق های حوضه شهید مدرس شوشتر (زیرحوضه آبخیز هدام)، گستره و شیب خندق، درصد سیلت، درصد خاک لخت، بالا بودن شوری خاک و میزان سدیم بالا می باشد، که این عوامل در کنار فقر پوشش گیاهی بستر بسیار مناسبی برای پیشروی طولی خندق ها ایجاد کرده اند (۲۹).

امروزه روش های مختلفی برای برآورد متغیرهایی که تغییرات زمانی و مکانی دارند وجود دارد تفاوت عمده این روش ها مربوط به نحوه محاسبه است. پژوهشگران اندکی از جمله راهی و همکاران (۲۳)؛ انتظاری و همکاران (۷)؛ صبح زاهدی و همکاران (۲۸) و شادفر (۲۴) با استفاده از تکنیک های نوین همانند شاخص همپوشانی، عمل گرهای فازی و یا تحلیل سلسله مراتبی به ارزیابی و پهنه بندی فرسایش خندقی در بعضی مناطق کشور پرداخته اند. متولی و اسماعیلی (۱۹) بیان نمودند برای پهنه بندی به روش فازی، تشکیل لایه فازی هر عامل بر اساس مقدار عضویت آن در نقاط مختلف و ترکیب امتیاز عوامل با استفاده از عمل گر جمع، ضرب و گامای فازی انجام می گیرد و سطح منطقه بر اساس میزان خطر بین صفر و یک امتیازدهی می گردد.

اسفندیاری درآباد و همکاران (۹) در پژوهشی به بررسی قابلیت فرسایش خندقی با استفاده از مدل منطق فازی در حوضه سد گلستان، رودخانه قرناوه پرداختند. برای پهنه بندی از توان های مختلف عمل گر گامای فازی استفاده شد. نتایج نشان داد که گامای ۰/۸ بیشترین قابلیت را نسبت به دو عمل گر ۰/۷ و ۰/۹ دارد و نقشه نهایی بدست آمده ۳۸ درصد از زمین های منطقه را با حساسیت زیاد و خیلی زیاد برای فرسایش خندقی نشان داده است.

جوکار سرهنگی و همکاران (۱۳) برای ارزیابی روش های استفاده شده در پهنه بندی مناطق بدلدن جاجرو، نقشه پهنه بندی خندق ها در هر مدل را به روی نقشه اصلی پهنه بندی منطقه پراکنش بدلدن ها قرار داده و در طبقات مختلف پهنه بندی مقدار سطح خندق ها به سطح کل



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد پژوهش در استان خوزستان
Figure 1- Location of studied area in Khuzestan Province

مطالعات پیشین و همچنین بررسی روند تغییرات خندق‌های منطقه به کمک تصاویر ماهواره‌ای موجود در یک دوره ۱۷ ساله (۱۳۷۹ الی ۱۳۹۶)، برای نمونه‌برداری پس از مراجعه به منطقه مورد مطالعه و بازدیدهای میدانی از عوارض و خندق‌های موجود با توجه به مختصات تعیین شده توسط دستگاه GPS ضمن بررسی و تعیین مناطق مورد نظر تعداد ۱۲۴ نمونه (به روش نمونه‌برداری ناحیه‌بندی شده) از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی متری خاک برداشت گردید. در هر واحد کاری نمونه‌ها از قسمت سرخندق‌ها و سایر مناطق با کاربری‌های مختلف برداشت گردید. در روش نمونه‌برداری لایه‌بندی شده (ناحیه‌بندی شده) ابتدا منطقه به واحدهای کاری مورد نیاز تقسیم و سپس نمونه‌برداری در هر زیر بخش بصورت تصادفی انجام پذیرفت. در این روش باتوجه به نوع پراکنش، منطقه مورد مطالعه می‌تواند، به زیر بخش‌هایی با مساحت

از دیدگاه زمین‌شناسی شامل ۵۶/۵۶ درصد رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای و دشت سیلابی دوران عهد حاضر یا کواترنر در قسمت غرب تا مرکز و ۴۳/۴ درصد آن را سازند آگاجاری در شرق منطقه می‌باشد. میانگین بارندگی در منطقه بطور متوسط ۲۹۵/۲ میلی‌متر، میانگین درجه حرارت ۲۶/۷ درجه سانتی‌گراد و مقدار رطوبت نسبی منطقه ۳۹ درصد می‌باشد. شکل ۱ موقعیت مکانی حوزه آبخیز قلعه گرگ در استان خوزستان را نشان می‌دهد.

روش کار

در این پژوهش ابتدا با تلفیق نقشه‌های شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 نقشه واحدهای کاری همگن با مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ تهیه گردید. سپس با استفاده از

در روش جمع جبری فازی ترکیب عوامل اثر افزایشی خواهد داشت به عبارت دیگر عوامل یکدیگر را تقویت می کنند. معادله جمع جبری فازی به شکل زیر بیان می گردد (۲۷ و ۳۴).

$$\mu_{Combination} = 1 - (\prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)) \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه μ_i بیانگر مقدار عضویت در نقشه فاکتور i ام است. در عمل گر ضرب فازی برعکس عمل گر جمع فازی مقادیر عضویت در نقشه خروجی کوچک شده و به سمت صفر میل می کند. به عبارت دیگر با توجه به ضرب مقادیر کوچک در هم، ترکیب عوامل اثر کاهشی خواهند داشت. معادله ضرب فازی به صورت زیر بیان می گردد.

$$\mu_{Combination} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در این رابطه μ_i بیانگر مقدار عضویت در نقشه فاکتور i ام است. با توجه به اشکالات دو عمل گر قبلی و با در نظر گرفتن اختلاف فاحش بین نتیجه استفاده از عمل گرهای جمع جبری و ضرب جبری فازی و یا به عبارتی جهت تعدیل حساسیت خیلی بالای اپراتور ضرب فازی و حساسیت خیلی کم اپراتور جمع جبری فازی از اپراتور گامای فازی نیز استفاده شده است که روابط این عمل گر به صورت زیر بیان می گردد.

رابطه (۳)

$$\mu_{Combination} = (Fuzzy Sum)^V \times (Fuzzy Product)^{1-V}$$

در این رابطه $\mu_{combination}$ لایه حاصل از گاما می باشد و V در محدوده بین صفر و ۱ انتخاب می شود.

در این پژوهش با توجه به اثرات مستقیم و متقابل شوری و قلیائیت در پایداری خاکدانه، ابتدا لایه های مذکور در محیط ArcMap با هم تلفیق شده و به ۴ کلاس شوری و قلیائیت شامل: $(EC < 4)$ ، $(SAR < 13 - EC < 4)$ ، $(SAR > 13 - EC < 4)$ ، $(SAR > 13 - EC > 4)$ طبقه بندی مجدد شدند. سپس نقشه فازی لایه تلفیقی تهیه گردید. پس از تهیه لایه های فازی شده، از عملگرهای فازی جهت تلفیق نقشه ها استفاده گردید. سپس نقشه های تهیه شده در هر عملگر، در پنج طبقه خطر (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) کلاس بندی مجدد شدند. این روش تلفیق می تواند از دقت و اعتبارسنجی بالاتری نسبت به استفاده مجزای دو نقشه شوری و قلیائیت باشد.

اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی میزان صحت و دقت نقشه های بدست آمده از دو روش درصد تطابق نقشه مناطق دارای حساسیت خیلی زیاد و زیاد با نقشه خندق های منطقه و شاخص مجموع کیفیت استفاده شده است. در هر کدام از روش های فازی بکاربرده شده ابتدا با مقایسه

یکنواخت یا غیریکنواخت تقسیم گردد. جهت رعایت شرایط تخمین با استفاده از محدودیت شعاع جستجو می بایست در جهاتی که تغییرپذیری بیشتر است، تراکم نمونه برداری نیز بیشتر باشد (۱۴). به همین جهت تعداد نقاط نمونه برداری شده در قسمت مرکز تا غرب منطقه مورد مطالعه با توجه به تراکم خندق ها در این منطقه و فرسایشی بودن سازند موجود با تراکم بیشتر و در قسمت شرق منطقه با توجه به کوهستانی بودن تعداد محدودتری نمونه برداشت شد. سپس نمونه های خاک به آزمایشگاه منتقل و در آنجا میزان پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک شامل درصد رس و سیلت (به روش هیدرومتر)، شن ریز (الک خشک)، میانگین وزنی قطر خاکدانه (الک تر)، نسبت جذب سدیم (فلیم فتومتر و تیتراسیون) و هدایت الکتریکی (EC سنج) اندازه گیری شد. پس از تعیین میزان پارامترهای مدنظر، هر کدام از این پارامترها در محیط نرم افزار ArcMap به روش های متداول درونیابی، سپس لایه های رستری مدنظر برای تک تک پارامترهای شش گانه مذکور و همچنین سه فاکتور شیب، کاربری اراضی و زمین شناسی تهیه گردید. جهت درون یابی پارامترهای میانگین وزنی قطر خاک دانه، سدیم قابل جذب، شوری، درصد شن ریز، سیلت و رس خاک به ترتیب از روش کریجینگ معمولی با مدل پایدار، کریجینگ معمولی با مدل گوسین، کریجینگ معمولی با مدل کروی و در خصوص سه متغیر دیگر کریجینگ معمولی با مدل نمایی به عنوان بهترین روش میان یابی تعیین گردید. نقشه شیب از مدل رقومی ارتفاعی و نقشه های کاربری اراضی و زمین شناسی از تفسیر عکس های هوایی و ماهواره ای، عملیات میدانی و همچنین گزارشات مطالعات آبخیزداری و منابع طبیعی تهیه شدند.

استانداردسازی و فازی سازی لایه ها

برای پهنه بندی به روش فازی، ابتدا لایه های رستری بر اساس روابط موجود به لایه های فازی تبدیل گردید. در این روش در هر یک از ۹ متغیر موردنظر (شامل سیلت، رس، شن ریز، میانگین وزنی قطر خاکدانه، شوری، نسبت جذب سدیم، شیب، کاربری اراضی و زمین شناسی) ابتدا مدل فازی تغییرات آن عامل با توجه به شدت تاثیر آن متغیر در روند تشکیل خندق تعریف شده سپس بر اساس نوع مدل های تعریف شده توابع عضویت فازی، مقادیر هر عامل را بر اساس میزان رابطه با تشکیل خندق به صورت یک تابع پیوسته بین صفر و یک تعیین گردید. در این روش برای هر عامل یک تابع عضویت تعریف می گردد (۴). تابع عضویت هر عامل به صورتی تعریف شد که با افزایش احتمال تشکیل خندق مقدار عضویت عامل به عدد یک نزدیک و با کاهش احتمال تشکیل خندق مقدار عضویت به عدد صفر نزدیک می گردد (۸). پس از فازی سازی، لایه ها با استفاده از سه عمل گر جمع جبری، ضرب جبری و گامای فازی با هم تلفیق شدند.

همبستگی بین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک شامل (میزان رس، سیلت، شن ریز، میزان شوری، نسبت سدیم قابل جذب) با استفاده از رابطه همبستگی پیرسون مورد ارزیابی قرار گرفته و مشاهده شد برخلاف خاصیت ذاتی رس‌ها، در این منطقه رس اثر کاهشی بر پایداری خاکدانه داشته است. علت آن را می‌توان نوع کانی‌های رس (تورم پذیر) و همبستگی مثبت رس با شوری خاک بیان نمود. در مکان‌هایی که میزان رس افزایش یافته، میزان شوری خاک نیز در آن نقطه روند افزایشی داشته است. از طرفی در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد بین میزان شوری خاک و نسبت جذب سدیم نیز همبستگی مثبت معنی‌دار در سطح یک درصد وجود دارد. این همبستگی بدین معنی است که نمک‌های موجود در منطقه از نوع با کاتیون غالب از جمله سدیم می‌باشد. افزایش کاتیون سدیم در خاک باعث پراکنده شدن ذرات رس و افزایش ناپایداری خاکدانه‌ها می‌گردد. این نتیجه با نتایج بدست آمده توسط محققین دیگر همچون آرمین و همکاران (۲)، محمدابراهیمی و همکاران (۱۸)، دیمویانیس (۶) و آیدووا (۱۲) مطابقت دارد.

با توجه به میزان اثرگذاری هر لایه در گسترش فرسایش خندقی در منطقه مورد مطالعه استانداردسازی لایه‌های خاک (سیلت، رس، شن ریز، پایداری خاکدانه، شوری و نسبت جذب سدیم) و عوامل محیطی (شیب، کاربری اراضی و زمین‌شناسی) با استفاده از روش کلاس‌بندی مجدد تهیه گردید. نتایج حاصل از فازی سازی لایه‌های رستری بدست آمده نشان از تجمع نسبی ذرات سیلت، رس و شن ریز در قسمت‌های میانی تا غربی منطقه دارد که این امر بدلیل شسته شدن و تجمع ذرات خاک سازند آغاجاری با شیب زیاد (۲۰ >) درصد و نهشته شدن این رسوبات در محیطی با شیب ۵-۰ درصد در قسمت میانی و غربی حوضه می‌باشد.

مساحت هر طبقه نسبت به مساحت کل منطقه درصد مساحت هر طبقه را بدست آورده سپس با تقسیم مساحت خندق‌های موجود در هر طبقه به کل خندق‌های منطقه نیز درصد خندق‌ها محاسبه گردید. با مقایسه نتایج بدست آمده، نقشه‌ای که بیشترین درصد خندق‌ها در طبقات بالاتر از متوسط (زیاد و خیلی زیاد) قرار گرفته‌اند، و بیشترین شباهت بین نقشه تهیه شده و واقعیت منطقه را نشان می‌دهد به‌عنوان بهترین نقشه انتخاب گردید (۲۴ و ۲۷). پژوهشگران متعددی (۲۴،۲۶) و (۳۲) برای ارزیابی روش‌های پهنه‌بندی خندق از شاخص مجموع کیفیت استفاده کرده‌اند. رابطه شاخص مجموع کیفیت (Qs) به شرح زیر می‌باشد.

$$Qs = \sum_{i=1}^n (Dr - 1)^2 * S \quad \text{رابطه (۴)}$$

Dr: نسبت مساحت خندق در هر رده خطر به مساحت هر یک از پهنه‌های خطر به نسبت مساحت کل خندق به سطح کل حوضه مطالعه شده می‌باشد. هر چه Dr یک طبقه خطر بیشتر باشد نشان دهنده تراکم خندق بیشتر در آن طبقه نسبت به تراکم متوسط منطقه است. بنابراین هر چه پهنه‌بندی خطر دقیق‌تر باشد با افزایش خطر تشکیل خندق در پهنه‌های تفکیک شده (از پهنه خطر خیلی کم تا بسیار پرخطر) مقدار Dr افزایش می‌یابد (۱۹).

S: نسبت مساحت هر پهنه خندق به مساحت کل منطقه
n: تعداد رده‌های خطر

شایان ذکر است هرچه میزان Qs بیشتر باشد بیانگر این است که مدل مدنظر کارایی بیشتری در منطقه دارد و اختلاف کمتر از ۰/۱ در این شاخص بیان کننده دقت مشابه دو مدل می‌باشد (۳۲).

نتایج و بحث

جدول ۱- آنالیز همبستگی داده‌های آزمایشگاهی

Table 1- Analyze of laboratory data correlation

پارامتر Parameter	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) mm	سیلت Silt %	رس Clay %	شن ریز Fine sand %	شوری (EC) dS m ⁻¹	نسبت جذب سدیم (SAR) (mmoles L ⁻¹) ^{0.5}
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)	1					
سیلت (Silt)	-0.2*	1				
رس (Clay)	-0.18*	-0.33**	1			
شن ریز (Fine sand)	-0.44**	-0.04	0.19*	1		
شوری (EC)	-0.65**	0.08	0.23**	0.59**	1	
نسبت جذب سدیم (SAR)	-0.69**	0.14	0.25**	0.32**	0.63**	1

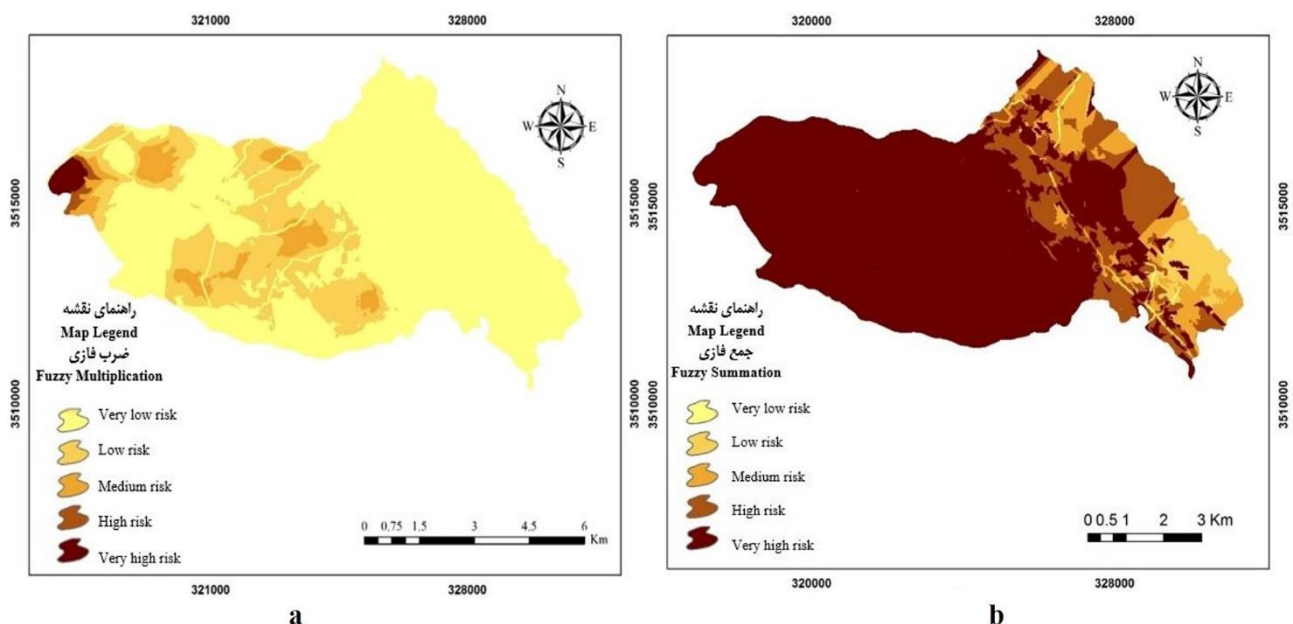
*: معنی‌دار در سطح ۵ درصد (Significant at the 0.05 level) **: معنی‌دار در سطح ۱ درصد (Significant at the 0.01 level)

آن در طبقات خطر کم و بسیار کم قرار گرفته است. با توجه به اینکه ۸۲/۸۸ درصد خندق‌ها در این روش در منطقه در معرض خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند، می‌توان تا حدودی این روش را روشی مناسب جهت تهیه نقشه نهایی فازی در نظر گرفت. شادفر (۲۴)، شهاب ارخازلو و همکاران (۲۶) در پژوهش‌های صورت گرفته گامای ۰/۸ را روش مناسب جهت تهیه نقشه فازی در منطقه مورد مطالعه تعیین نمودند. اما در نتایج بدست آمده در روش گامای ۰/۹، میزان ۶۰/۹۲ درصد منطقه در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد و ۱۷/۱ درصد آن در منطقه خطر کم و بسیار کم قرار گرفته است. همچنین در خصوص محدوده پراکنش خندق‌ها، ۹۴/۹۳ درصد از خندق‌های منطقه در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است که نسبت به گامای ۰/۸ از نتیجه بهتر و قابل قبول تری برخوردار می‌باشد. با توجه به اینکه ۵۶/۶ درصد منطقه مورد مطالعه در محدوده سازند کواترنر با حساسیت بالا نسبت به فرسایش قرار دارد از محاسبات بدست آمده در جدول ۲ می‌توان نتیجه گرفت در نقشه نهایی به روش گامای فازی ۰/۹ با قرارگرفتن ۶۰/۹۲ درصد منطقه در طبقه خطر زیاد و بسیار زیاد و قرار گرفتن ۹۴/۹۳ درصد خندق‌ها در این منطقه، نزدیک‌ترین نتیجه به ماهیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را دارا است. شهرپور و همکاران (۲۷) و جوکار سرهنگی (۱۳) با استفاده از روش مقایسه درصد و مساحت خندق‌های منطقه با درصد و مساحت طبقات با خطر بسیار زیاد و زیاد استفاده نموده و نتایج مشابهی را گزارش نموده‌اند.

با کاهش شیب در خاک‌های دشت و پست آبرفتی، در سازندهای حساس میزان انحلال و نفوذ آب بیشتر شده و موجب افزایش فرسایش آبی شده است. تحقیقات انجام شده در نقاط مختلف نشان می‌دهد بیشتر مناطق تحت تاثیر فرسایش خندقی در شیب‌های کم‌تر از ۵ درصد قرار دارند (۱۰، ۲۰ و ۳۳).

نتایج تلفیق لایه‌ها نشان می‌دهد روش جمع جبری فازی به علت اثر افزایشی زیاد و ضرب جبری فازی به علت اثر کاهشی زیادی که دارند روش مناسبی جهت تهیه نقشه نهایی نمی‌باشند. تحقیقات صورت گرفته توسط مددی و همکاران (۱۶)، نیز به همین موضوع اشاره دارد. درخصوص عملگر گامای فازی ۰/۲ نتایج بدست آمده در مجموع حدود ۱۷/۰۷ درصد منطقه در طبقه خطر زیاد و خیلی زیاد و ۶۷/۰۷ درصد آن در منطقه کم خطر قرار گرفته است. همچنین ۳۶/۹۴ درصد از خندق‌ها در منطقه دارای خطر زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است (شکل ۴). در روش گامای فازی ۰/۵ نتایج بدست آمده در مجموع حدود ۳۱/۱۶ درصد منطقه در طبقه پرخطر و ۵۵/۳۸ درصد آن در منطقه کم خطر قرار گرفته است و تنها ۶۰/۳۸ درصد خندق‌ها در منطقه دارای خطر زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته‌اند. در نتیجه این دو روش نیز نمی‌توانند روش قابل قبولی جهت تهیه نقشه نهایی فازی باشند.

در خصوص روش گامای ۰/۸ با توجه به نتایج بدست آمده حدود ۴۳/۲۱ درصد منطقه در طبقات خطر زیاد و بسیار زیاد و ۴۲/۴۵ درصد



شکل ۲- نقشه پهنه بندی به روش ضرب (a) و جمع (b) جبری فازی
Figure 2- Zoning map by fuzzy multiplication (a) and summation (b) method

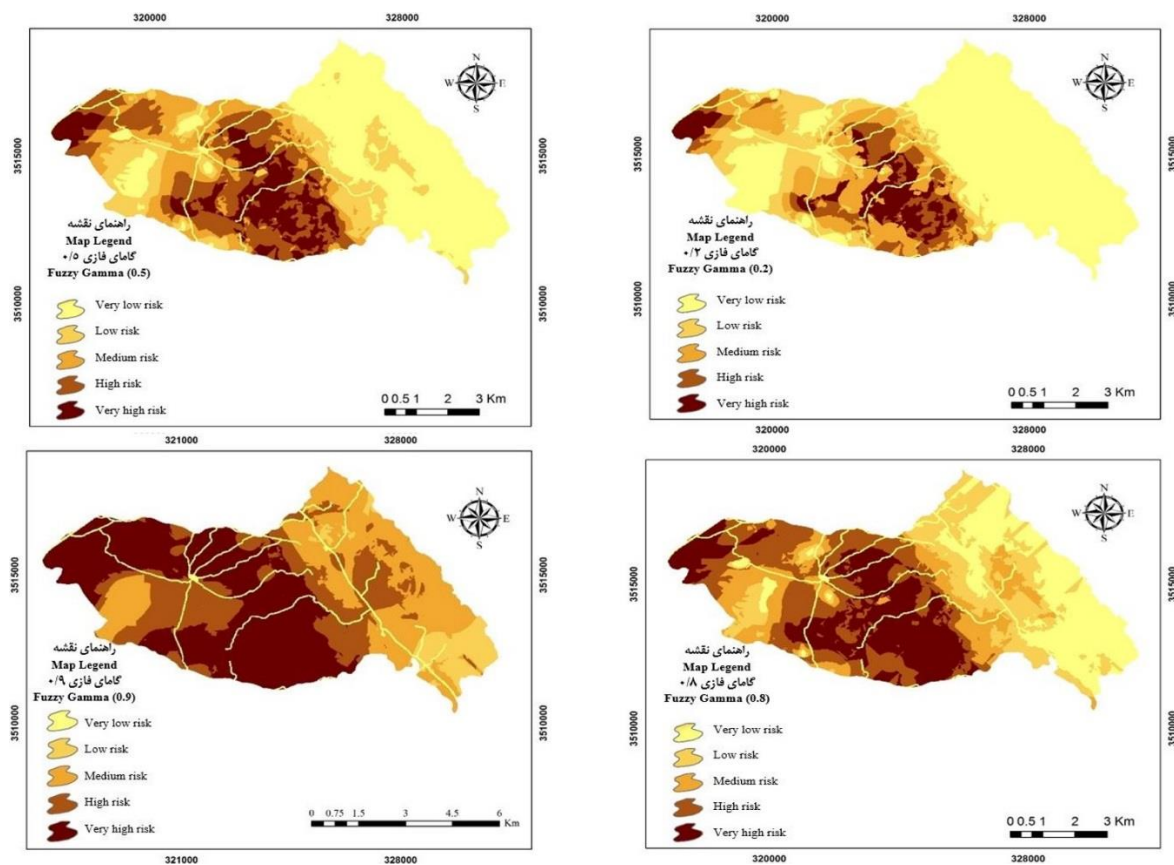
جدول ۲- درصد و مساحت طبقات نقشه پهنه‌بندی به روش‌های مختلف فازی

Table 2- The area and percentage of classification of zoning map by different fuzzy methods

خطر بسیار زیاد	خطر زیاد	خطر متوسط	خطر کم	خطر خیلی کم	طبقات پهنه‌بندی روش و مساحت پهنه بندی
Very high risk	High risk	Medium risk	Low risk	Very low risk	
5755	502	42	24	4	جمع فازی (Summation)
69	38	350	1322	4548	ضرب فازی (Multiplication)
524	556	1003	856	3388	گاما ۰/۲ (Gamma 0.2)
313	1200	851	941	2563	گاما ۰/۵ (Gamma 0.5)
1362	1372	907	1497	1189	گاما ۰/۸ (Gamma 0.8)
2583	1272	1390	769	313	گاما ۰/۹ (Gamma 0.9)
90.95	7.93	0.66	0.38	0.06	جمع فازی (Summation)
1.09	0.6	5.53	20.89	71.88	ضرب فازی (Multiplication)
8.28	8.79	15.85	13.53	53.54	گاما ۰/۲ (Gamma 0.2)
4.95	18.96	13.45	14.87	40.51	گاما ۰/۵ (Gamma 0.5)
21.53	21.68	14.33	23.66	18.79	گاما ۰/۸ (Gamma 0.8)
40.82	20.10	21.97	12.15	4.95	گاما ۰/۹ (Gamma 0.9)
100	0	0	0	0	جمع فازی (Summation)
2.12	1.06	12.10	42.43	42.29	ضرب فازی (Multiplication)
18.70	18.24	31.02	19.30	12.74	گاما ۰/۲ (Gamma 0.2)
1.43	38.27	20.27	13.57	5.77	گاما ۰/۵ (Gamma 0.5)
44.88	38	9.33	5.08	2.72	گاما ۰/۸ (Gamma 0.8)
81.26	13.67	2.54	1.11	1.43	گاما ۰/۹ (Gamma 0.9)

بهترین مدل با بالاترین میزان اعتبارسنجی در بین روش‌های به کار گرفته شده انتخاب گردید. نتایج بدست آمده در این تحقیق با نتایج محققین بسیاری از جمله راهی و همکاران (۲۳)، شهاب ارخالو و همکاران (۲۶)، شهرپور و همکاران (۲۷)، تاکسین (۳۰)، لیا او و همکاران (۱۵)، هانگ و همکاران (۱۱) مطابقت دارد.

در نهایت با استفاده از رابطه مجموع کیفیت (Qs) میزان دقت نقشه‌های بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت. مقدار Qs برای اپراتورهای جمع جبری فازی، ضرب جبری فازی، گامای فازی ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۹ به ترتیب مقادیر ۰/۱، ۰/۴۴، ۰/۵۶، ۰/۶۲، ۰/۶۹ و ۰/۷۳ بدست آمد. در این روش اعتبارسنجی نقشه‌ای که بیشترین مقدار (Qs) را دارا باشد از اعتبار بالاتری برخوردار است (۲۶، ۲۷ و ۳۲). فازی سازی لایه‌ها به روش گامای ۰/۹ با مقدار ۰/۷۳ به عنوان



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی به روش گامای فازی ۰/۲، ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۹

Figure 3- Zoning map by fuzzy gamma (0.2, 0.5, 0.8 and 0.9)

جدول ۳- مقایسه مساحت مناطق با خطر زیاد و بسیار زیاد و خندق‌های منطقه به روش‌های مختلف فازی

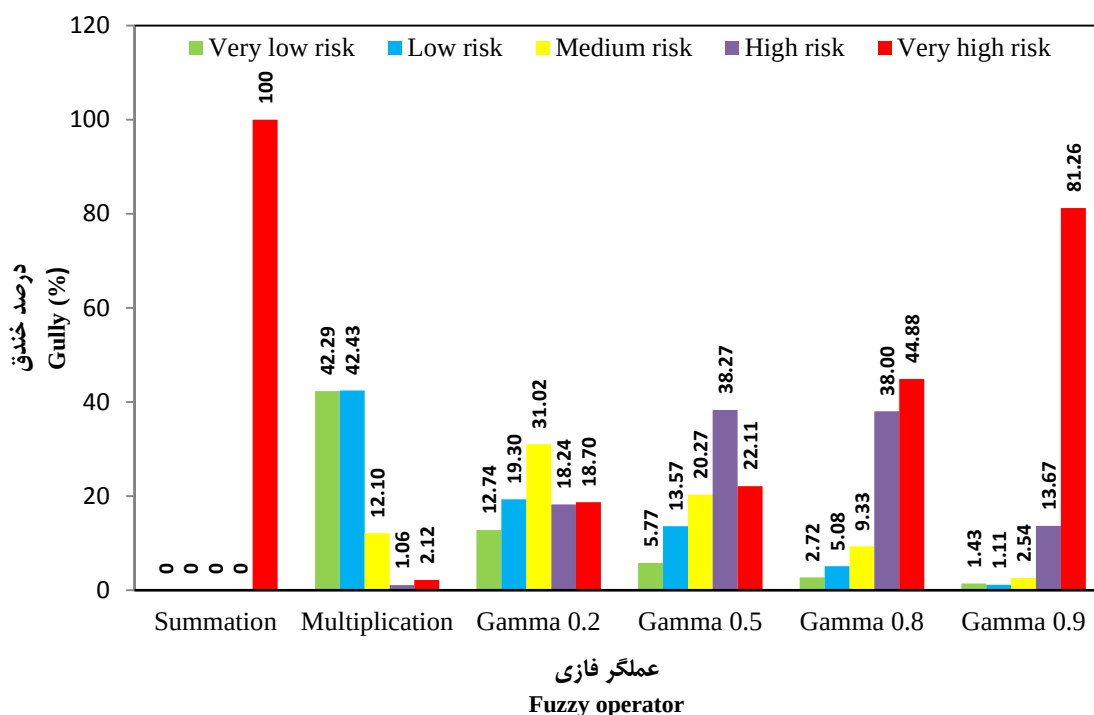
Table 3- Comparison of area with high and very high risk location and gully location by different Fuzzy methods

نقشه Map	مساحت منطقه پرخطر و بسیار پرخطر (درصد) High and very high risk area %	مساحت خندق‌های منطقه پرخطر و بسیار پرخطر (درصد) High and very high risk of gully area %
جمع جبری فازی Fuzzy summation	98.88	100
ضرب جبری فازی Fuzzy multiplication	1.69	3.18
گامای فازی ۰/۲ Gamma 0.2	17.07	36.94
گامای فازی ۰/۵ Gamma 0.5	31.16	60.38
گامای فازی ۰/۸ Gamma 0.8	43.21	82.88
گامای فازی ۰/۹ Gamma 0.9	60.92	94.93

نتیجه‌گیری

نوع بافت خاک، شوری و قلیائیت و عدم اجرای طرح‌های بیولوژیک و بیومکانیک به منظور احیاء خاک و پوشش گیاهی می‌باشند. بیشتر مناطق خندقی در منطقه مورد مطالعه در شیب‌های کمتر از ۵ درصد تشکیل شده است.

با توجه به نتایج این تحقیق و تطبیق آن با مشاهدات میدانی، عوامل موثری که در شکل‌گیری و گسترش فرسایش خندقی در حوزه دخالت داشته‌اند شامل: حساس بودن سازندهای زمین‌شناسی حوزه،



شکل ۴- هیستوگرام مقایسه ای پراکنش خندق‌ها در هر روش فازی بر حسب درصد
Figure 4- Histogram of gully distributed by different Fuzzy methods

۳۸۵۵ هکتار (۶۰/۳۸ درصد) منطقه در معرض خطر فرسایش زیاد و بسیار زیاد قرار گرفته است. همچنین از ۲۱۶۶ هکتار مساحت خندق‌های موجود در منطقه میزان ۲۰۵۶ هکتار (۹۴/۹۳ درصد) آنها در طبقه خطر فرسایش زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته است، که خود دلیلی بر صحت بالای نقشه نهایی تهیه شده می باشد. با توجه به این که ۵۶/۶ درصد منطقه را سازند حساس به فرسایش کواترنر در بر گرفته، قرار گرفتن این مساحت از منطقه در طبقه دارای خطر فرسایش زیاد قابل توجیه می باشد. با توجه به نقشه همپوشانی نهایی به دست آمده می توان نتیجه گرفت با استفاده از مکان یابی به روش فازی به خوبی مکان هایی که عوامل موثر بر فرسایش بیشترین هم پوشانی را داشته شناسایی نموده و تصمیمات مدیریتی مناسبی همچون احیای پوشش گیاهی جهت افزایش زبری سطح، افزایش ماده آلی خاک و همچنین اصلاح خاک های شور و سدیمی به کمک اصلاح کننده ها برای جلوگیری و کاهش خسارات ناشی از گسترش خندق ها را اتخاذ نمود.

همچنین با توجه به سیل گیر بودن این منطقه در مدت زمان کوتاهی مقدار رواناب زیادی از ارتفاعات اطراف سرازیر شده و چون خاک این مناطق از رسوبات دانه ریز با بافت سیلتی و ساختمانی سست و دارای املاح زیادی می باشند حساسیت زیادی در برابر فرسایش و انحلال پیدا کرده و ایجاد رواناب های فصلی می تواند عامل موثر دیگری در شکل گیری و گسترش خندق های این منطقه باشد. با توجه به اینکه بیشترین مناطق خندقی در اراضی مرتعی بسیار ضعیف و رها شده واقع شده اند می توان نتیجه گرفت که چرای بیش از حد دام از این مراتع باعث از بین رفتن پوشش گیاهی و لخت شدن خاک شده و عرصه مهبیای فرسایش گردیده است.

از بین عملگرهای فازی، مدل گامای فازی ۰/۹ با بیشترین تطابق بین مساحت طبقات در معرض خطر زیاد و بسیار زیاد با نقشه خندق های منطقه (۹۴/۹۳ درصد)، و بیشترین مقدار مجموع کیفیت (۰/۷۳)، به عنوان بهترین روش فازی برای پهنه بندی در منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید. نتایج ارزیابی مساحت مناطق فرسایش یافته نشان می دهد از ۶۳۲۷/۵ هکتار مساحت کل منطقه مورد مطالعه،

منابع

- 1- Ahmadi H., and Mohammadi A.A. 2007. Gully land management by investigating the effective factors and model presentation to determine the linear progress of gullies (Case study: Hablehroud watershed). 4th national conference

- on watershed management. Iran, Karaj. Tehran University. (In Persian)
- 2- Armin M., Mahdian M.H., Ahmadi H., Rohipour H., Salajegheh A., and Ghorbannia Kheybari V. 2014. Investigation on spatial variability of aggregate stability and the factors affecting soil aggregation using kriging geostatistics method (Case study: A part of Taleghan watershed). *Watershed Management Research* 27(3): 107-122. (In Persian)
 - 3- Castillo C., and Gómez J.A. 2016. A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Review Article. Earth-Science Reviews* 160: 300-319.
 - 4- Chaplot V. 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology* 186: 1-11.
 - 5- Deng Q., Qin F., Zhang B., Wang H., Luo M., Shu C., Liu H., and Liu G. 2015. Characterizing the morphology of gully cross-sections based on PCA: A case of Yuanmou Dry-Hot Valley. *Geomorphology* 228: 703-713.
 - 6- Dimoyiannis D.G., Tsadilas C.D. and Valmis S. 1998. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29: 1239-1251.
 - 7- Entezari M., Maleki A., and Moradi KH. 2014. Zoning of gully erosion in catchment of Dyreh by analytical hierarchy process (AHP). *The Journal of Spatial Planning* 17(4): 63-86. (In Persian)
 - 8- Erfanian M., Ghahramani P., and Saadat H. 2014. Mapping of soil erosion potential hazard using Fuzzy logic in golestan Gharnaveh watershed. *Watershed Management Science & Engineering* 7(23): 43-52. (In Persian)
 - 9- Esfandiari Darabad F., Beheshti Javid A., and Fathi M.H. 2013. Gully erosion susceptibility evaluation using fuzzy logic model (Case study: Golestan dam catchment – Ghornave river). 2nd International conference on environmental hazards. Iran, Tehran. Kharazmi University. (In Persian)
 - 10- Gabris G., Kertesz A. and Zambo L. 2003. Land use change and gully formation over the last 200 years in hilly catchment. *Catena* 50: 151- 164.
 - 11- Huang Ivy B., Keisler J., and Linkov I. 2011. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment* 409(19): 3578 -3594.
 - 12- Idowu O.J. 2003. Relationships between aggregate stability and selected soil properties in humid tropical environment. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 3: 695-708.
 - 13- Jokar Sarhangi I., and Mortezaei N. 2016. Comparison of Frequency Ratio and Confidence Factor Models in badland erosion zoning (Case study: Jajrood watershed). *Quantitative Geomorphological Research* 6(2): 161-172. (In Persian)
 - 14- Khosravi Y., and Abasi S. 2016. *Geostatistical Analyst*. Azarkelk Publisher. First Edition. 133p.
 - 15- Liao Z., Xu Z., Wang D., Lu S., and Hannam P.M. 2011. River Environmental Decision Support System Development for Suzhou Greek in Shanghai. *Journal of Environmental Management* 92(9): 2211-2221.
 - 16- Madadi A., and Hemmati T. 2015. Karstformation zoning capability using Fuzzy logic model (Case study: Ragion Namakabroud of Chalous City). *Applied Geomorphology of Iran* 3(5): 89-102. (In Persian)
 - 17- Marzloff I., and Poesen J. 2009. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology* 111(1-2):48-60.
 - 18- Mohammad Ebrahimi M., Javadi M.R., and Vafakhah M. 2015. Investigation of the Role of Soil and Non-Soil Parameters in Development of Linear Gully Erosion in Agh Emam Watershed (2). *Iranian Journal of Soil Research* 29(4): 487-498. (In Persian)
 - 19- Motevalli S., and Esmaeli R. 2013. Landslide Hazard Zoning using Gamma Fuzzy Operator (A Case Study: Taleghan Watershed). *Quarterly journal of Environmental Erosion Research* 2(4): 1-20. (In Persian)
 - 20- Nowhegar A., Heidarzadeh M. 2011. The study of physical - chemical characteristics and morphometry of gulying area (case study: Gezir, Hormozgan province). *Environmental Erosion Research Journal* 1(1): 29-44. (In Persian)
 - 21- Poesen J., Nachtergaele J., Verstraeten G., and Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* 50: 91-133
 - 22- Qilin Y., Jiarong G., Yue W., and Bintian Q. 2011. Debris flow characteristics and risk degree assessment in Changyuan gully, Huairou District, Beijing. *Procedia Earth and Planetary Science* 2: 262-271.
 - 23- Rahi Gh.R., Nazari Samani A.A., and Ghoddousi J. 2011. Validation of the predicting model for land vulnerability to gully erosion in arid watersheds (Case study: Boushehr province). *Journal of Range and Watershed Management* 64(3): 281-294. (In Persian)
 - 24- Shadfar S. 2015. Application of Fuzzy logic operators to investigate gully erosion using geographic information system (GIS) (Case study: Troud watershed basin). *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data* 23(92): 35-42. (In Persian)
 - 25- Shafiee A., Mollaei A., and Khazaei M. 2011. Gully erosion threaten in Dehdasht watershed. 7th National conference on watershed management, Isfahan, Iran. 7p. (In Persian)
 - 26- Shahab Arkhazloo H., Emami H., Haghnia Gh.H., and Esmali A. 2016. Comparing the Analytic Hierarchy Process and fuzzy logic for zoning the risk of gully erosion in the three regions of the Ardebil province. *Quarterly journal of Environmental Erosion Research* 6:1(21): 1-16. (In Persian)
 - 27- Shahrivar A., Shadfar S., Khazaei M., and Adeli B. 2017. Assessment of Gully Erosion Zonation Methods (Case

- study: Abgendi Watershed). Iranian Journal of Eco Hydrology 4(1): 119-132. (In Persian)
- 28- Sobhe Zahedi Sh., Shadfar S., Alidoost M., pournasrolla M.R., Ghodrati A., and Dadashi A.A. 2012. Calibration, validation, and completion of predictive model of soil sensitivity to gully erosion in arid and semi-arid watersheds(Guilan Province). Final report of project. Soil conservation and watershed management research institute 70p. (In Persian)
- 29- Soleimani F., Soufi M., and Arsham A. 2017. Determination of effective factors in gullies development in Modares watershed of Shushtar. Journal of Water and Soil 31(5): 1432-1446. (In Persian with English abstract)
- 30- Taskin Gumus A. 2009. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy –AHP and TOPSIS methodology. Expert Systems with Applications 36(2): 4067-4074.
- 31- Valentin C. J., Poesen J., and Yong Li. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. Catena 63: 132–153.
- 32- Yalcin A. 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. Catena 72: 1-12
- 33- Yamani M., Zamanzadeh S.M., and Ahmadi M. 2013. Influence of physical and chemical properties of soil on formation and development of gully erosion (Case Study: Kahoor Plain in Fars Province). Quantitative Geomorphological Research 2(2): 135-156. (In Persian)
- 34- Zadeh L.A. Fuzzy sets. Information and control. June 1965 8(3): 338-353.



Evaluation and Zonation of Sensitive Areas to Gully Erosion Using Fuzzy Logic (Case Study: Ghaleh Gorg Watershed- Shushtar)

M.R. Ansari^{1*}- F. Soleimani²- A.R. Ahmadi³

Received: 16-10-2019

Accepted: 10-03-2020

Introduction: Soil erosion is the most widespread form of soil degradation jeopardizing food security worldwide. In Iran, gully erosion is important because about 90% of the country has arid and semi-arid climates and rainfall is not adequately distributed. In such conditions, the absence or lack of vegetation cover with increasing runoff causes more than 2 billion tons of soil losses annually. Therefore, conducting basic and applied researches on soil erosion via different methods for comprehensive management of natural resources is emphasized. The prerequisite for all kinds of erosion, such as gully erosion, is the prediction of the risk of gully formation in different areas susceptible to erosion.

Materials and Methods: The study area is located in Ghaleh Gorg watershed which sub-basin of Shahid Modarres that large part of these farmlands has been destroyed by gully erosion. The purpose of this study was to apply fuzzy logic operators for gully erosion zoning. In this research, six effective parameters on soil erosion including mean weight diameter of aggregate, sodium adsorption ratio, salinity, percent of fine sand, silt and clay were determined according to standard laboratory methods. After re-classification, standardization of prepared layers was carried out by the Fuzzy method. Hence, Fuzzy-based layers were integrated using operators of Fuzzy algebraic sum, Fuzzy algebraic production and Fuzzy gamma with 0.2, 0.5, 0.8, 0.9 values and the obtained results were evaluated. The validation of prepared maps was done based on two methods of map matching percentage of areas with very high and high sensitivity with gullies map of the study area and quality sum index (Q_s).

Results and Discussion: The Fuzzy results of raster layers showed the relative accumulation of silt, clay and fine sand grains in the middle to western parts of the region due to leaching and soil aggregation of Aghajari formation with a high slope of $>20\%$. The deposition of this sediments was with 0-5% slope in the middle and western part of the basin. Results of layer integration indicated the fact that the fuzzy summation and multiplication method are not suitable approaches for final mapping because of their high increasing and decreasing effects, respectively. About Fuzzy Gamma operator 0.2, the results revealed that about 17.07% of the area was in the high and very high-risk zone and 67.07% of the area was in the low risk zone. In Fuzzy Gamma 0.5, about 31.16% of the area was in high risk and 55.38% in low risk zone. And only 60.38 percent of the gullies was in the high-risk area. Thus, these both operators 0.2 and 0.5 cannot be an acceptable method for preparing the final fuzzy map. The results of gamma operator 0.8 showed that about 43.21% of the area was in high and very high risk classes and 42.45% of the area was in low and very low risk classes. In the gamma operator 0.9, about 60.92% of the area was in high and very high risk zone and 17.1% of the area was in low and very low-risk zone. Also, regarding the distribution range of gullies, 94.93% of gullies was in high and very high risk classes, which is more acceptable and better than gamma 0.8. According to the obtained results, Fuzzy gamma 0.9 with 94.93 matching percentage of areas containing very high and high sensitivity and maximum quality sum index (0.73) among different operators was selected as the best method for preparing Fuzzy map in the study area.

Conclusion: According to the results of this study and its comparison with field observations, effective factors contributing to the initiation and development of gully erosion were sensitivity of the geological formations, soil texture type, salinity and alkalinity and non-implementation of biological and biomechanical operations to the soil and vegetation cover restoration. Around 3855 hectares (60.38%) out of 6327.5 hectares of the total studied area were at high and very high erosion risk. Furthermore, 2056 hectares (94.93%) out of the 2166 hectares of the gullies area were at high and very high risk of erosion, denoting the high accuracy of the final map. Among the available methods, Fuzzy Gamma 0.9 with the highest overlap between the area of high and very high-risk classes of the gully map (94.93%), and the highest qualitative sum index (0.73), was selected as the best fuzzy method for zoning in the study area.

1 and 3- Assistant Professor and Master of Science in Soil Science, Soil Science Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: ansari386@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.83478

Keywords: Fuzzy operator, Fuzzy layers, GIS, Gully erosion, Zonation

مقاله علمی-پژوهشی

تأثیر سویه‌های برتر باسیلوس و استافیلوکوکوس جداسازی شده از دیم‌زارها بر شاخص‌های کمی و کیفی گندم در شرایط تنش

ابراهیم شیرمحمدی^۱ - حسینعلی علیخانی^{۲*} - احمدعلی پوربابائی^۳ - حسن اعتصامی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

چکیده

استفاده از پتانسیل باکتری‌های محرک رشد گیاه (PGPR) در جهت کاهش اثرات تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمک به تغذیه بهینه عناصر غذایی (به‌خصوص فسفر)، راهکاری علمی و سازگار با محیط زیست در جهت افزایش تولید گندم در کشور می‌باشد. پژوهش حاضر به‌صورت گلخانه‌ای با هدف بررسی تأثیر سویه‌های *Bacillus pumilus* W72، *B. safensis* W73 و *Staphylococcus succinus* R12N2 بر تعدادی از صفات کمی و کیفی گندم به‌صورت آزمایش فاکتوریل (سه فاکتوره شامل: ۲ سطح رطوبتی، ۶ سطح کود فسفوری و ۴ سطح جدایه باکتری) و در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار طراحی و اجرا شد. نتایج نشان داد که سطح رطوبتی ۸۰ درصد نسبت به ۵۵ درصد ظرفیت زراعی (FC) باعث افزایش ارتفاع، وزن خشک، نسبت ریشه به اندام هوایی، تعداد خوشه بارور، تعداد دانه، وزن هزار دانه، و غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه شد. همچنین کود سوپر فسفات تربیل در هر سطحی نسبت به شاهد باعث بهبود اغلب صفات اندازه‌گیری شده گردید؛ ولی تیمار خاک فسفات به تنهایی (بدون تیمار باکتری) فاقد چنین اثری بود. خاک فسفات همراه با تیمار *S. succinus* R12N2 در هر دو سطح رطوبتی ۵۵ و ۸۰ درصد FC، و نیز *B. pumilus* W72 و *B. safensis* W73 تنها در سطح رطوبتی ۸۰ درصد FC، نسبت به شاهد باعث افزایش غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه شد. در کل برای کشت گندم در شرایط غیر تنش و تنش کم‌آبی، استفاده از تیمار باکتری *S. succinus* R12N2 مناسب به نظر می‌رسد؛ و بررسی کارایی این سویه در شرایط طبیعی (دیم‌زارهای گندم) توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: باکتری‌های حل‌کننده فسفات (PSB)، تنش کم‌آبی، PGPR

مقدمه

اعمال مدیریت صحیح و مناسب، افزایش تولید گندم در کشت آبی و دیم امکان‌پذیر است. با توجه به قرارگیری ایران در اقلیم گرم و خشک، یکی از راه‌های دستیابی به تولید بیشتر گندم در دیم‌زارها، افزایش توان تحمل آن به تنش‌های کم‌آبی، شوری و کمبود عناصر ضروری مخصوصاً فسفر است؛ که استفاده از پتانسیل ریزوباکتری‌های محرک رشد گیاهان (PGPR) می‌تواند در این موضوع راه‌گشا باشد. تحقیقات نشان می‌دهد که PGPR با مکانیسم‌های متعدد باعث کاهش اثرات تنش‌های کم‌آبی، شوری و افزایش مقاومت گیاهان در مقابل این تنش‌ها می‌شوند که در نهایت باعث افزایش تولید محصول می‌گردند. برای مثال: در پژوهشی *Azospirillum brasilense* در شرایط تنش کم‌آبی با مکانیسم تولید ایندول استیک اسید (IAA)

گندم به لحاظ راهبردی مهمترین محصول زراعی کشور می‌باشد؛ و نان حاصل از آن اصلی‌ترین منبع غذایی محسوب می‌شود به‌طوری که قسمت عمده کالری و پروتئین مورد نیاز مردم از این طریق بدست می‌آید. برای تأمین غذای مورد نیاز جمعیت در حال رشد کشور، تولید گندم باید افزایش یابد. طبق آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۷ متوسط عملکرد گندم در شرایط آبی و دیم به ترتیب ۴،۳۴۳ و ۱،۰۳۷ کیلوگرم در هکتار بوده است (۱). با توجه به آمار ذکر شده عملکرد گندم دیم در مقایسه با گندم آبی بسیار پایین است و میانگین کل نیز کمتر از متوسط جهانی تولید گندم آبی / دیم می‌باشد (۳۹). بنابراین در صورت

۳ و ۴- به‌ترتیب دانشیار و استادیار گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.83826

۱- استادیار گروه علوم خاک، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران
(Email: halikhan@ut.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول

زیستی خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش از مختصات جغرافیایی $49^{\circ}26'25''$ طول شرقی از گرینویچ $35^{\circ}52'26''$ عرض شمالی از استوا و ارتفاع ۱۵۳۴ متر (واقع در دیم‌زارهای استان قزوین)، از عمق ۳۰- سانتیمتر نمونه برداری شد. پس از عبور نمونه خاک از الک ۲ میلی‌متری، خصوصیتی از خاک از جمله: بافت خاک، درصد رطوبت‌های اشباع خاک (SP)، ظرفیت زراعی (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) (۱۵)، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (ECe)، pH گل اشباع، ماده آلی، نیتروژن کل، فسفر کل، فسفر قابل دسترس، پتاسیم قابل دسترس، آهن، منگنز، روی و مس قابل دسترس، کربنات کلسیم، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) (۲۶) و جمعیت باکتری‌های حل‌کننده فسفات (۳۶)، اندازه‌گیری شد و نتایج آن در جدول ۳ بیان گردید.

طرح و تیمارهای آزمایش

آزمایش به صورت فاکتوریل (سه فاکتور) و در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) با سه تکرار انجام شد. فاکتور اول: سطح رطوبتی خاک در دو سطح شامل ۸۰ و ۵۵ درصد ظرفیت زراعی (W80 و W55)؛ فاکتور دوم: باکتری در چهار سطح شامل (B0: بدون مایه‌کوبی با باکتری) و مایه‌کوبی با سویه‌های *Bacillus* (B1) *pumilus* strain W72 *B. safensis* strain W73 (B2) و (B3) *Staphylococcus succinus* strain R12N2؛ فاکتور سوم: کود فسفر در شش سطح شامل شاهد بدون کود فسفر (F0)، خاک فسفات (F1)، خاک فسفات + ۱۹ میلی‌گرم سوپر فسفات تریپل بر کیلوگرم خاک (F2)، خاک فسفات + ۳۸ میلی‌گرم سوپر فسفات تریپل بر کیلوگرم خاک (F3)، خاک فسفات + ۵۷ میلی‌گرم سوپر فسفات تریپل بر کیلوگرم خاک (F4)، و ۵۷ میلی‌گرم سوپر فسفات تریپل بر کیلوگرم خاک (F5)، در سه تکرار جمعاً ۱۴۴ واحد آزمایشی (گلدان) بود. در تیمارهای دارای خاک فسفات، ۱۹۲ میلی‌گرم خاک فسفات (دارای ۱۳/۸ درصد P2O5 یا ۶/۱۳ درصد P) به ازای هر کیلوگرم خاک مخلوط شد. ۳/۵ کیلوگرم از خاک عبور داده شده از الک ۴ میلی‌متری بر طبق طرح آزمایشی با اعمال تیمارهای کود فسفوری گلدان‌هایی با حجم ۳ لیتر پر شدند. همچنین قبل از کاشت میزان کود مورد نیاز بر اساس آزمون خاک محاسبه و تمام کود پتاسه (۱۹ میلی‌گرم سولفات پتاسیم بر کیلوگرم خاک)، کود روی (۱۵ میلی‌گرم سولفات روی بر کیلوگرم خاک)، کود فسفوری (از منابع سوپر فسفات تریپل و خاک فسفات بر اساس تیمارهای طرح آزمایشی) و نیز ۳۰ درصد نیتروژن (۴۰ میلی‌گرم اوره بر کیلوگرم خاک) قبل از کشت با خاک مخلوط گردید. همچنین ۴۰ و ۵۳ میلی‌گرم اوره بر کیلوگرم خاک همراه با آهن (۲/۵ میلی‌گرم سکوسترین آهن ۱۳۸ بر کیلوگرم

باعث توسعه آوندهای چوب گندم شد و در نتیجه آن وضعیت آب در گیاه بهبود یافت (۲۹). تیموسک و همکاران (۳۷) نیز بیان نمودند که مایه‌کوبی گندم با *Bacillus thuringiensis* در شرایط تنش کم‌آبی باعث افزایش فعالیت گلوکاتایون ردوکتاز، کاتالاز، سوپراکسید دیسموتاز، افزایش مدت زمان زنده ماندن گیاه و وزن خشک آن، و کاهش ترکیبات فرار ناشی از تنش شد که نشان دهنده کاهش اثرات تنش کم‌آبی در گیاهان مایه‌کوبی شده با این باکتری است. همچنین گزارش شده که مایه‌کوبی گندم با PGPR، از طریق مکانیسم‌هایی مانند تولید اگزوپلی ساکارید، IAA و افزایش توان حل کردن فسفات‌های کم‌محلول، باعث کاهش اثرات تنش شوری بر گیاه شد (۳۸). بارناوال و همکاران (۲) نیز بیان نمودند که مایه‌کوبی گندم با *Arthrobacter protophormiae* با مکانیسم تولید IAA و کاهش آبسزیک اسید باعث افزایش مقاومت گندم به تنش شوری می‌شود. نتایج پژوهش رزاقی و همکاران (۳۱) نیز نشان داد که در تنش شوری *Staphylococcus* sp. فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز، میزان کلروفیل کل، جذب پتاسیم و شاخص‌های رشد گیاه را افزایش دادند. علاوه بر اثرات PGPR بر افزایش مقاومت و تحمل گیاهان در برابر تنش‌های محیطی گزارش‌های متعددی نیز مبنی بر نقش محرک رشدی و تغذیه‌ای این میکروارگانیسم‌ها برای گیاهان وجود دارد. در این راستا گزارش شده که PGPR با بهبود تغذیه‌ای (NPK)، و کاهش جذب یون سدیم اثر تنش شوری را در گندم کاهش دادند (۲۱). در پژوهشی دیگر PGPR همراه با خاک فسفات باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه، اندام هوایی، عملکرد دانه و جذب فسفر (در ریشه، اندام هوایی و دانه) ذرت و گندم شد (۱۲). همچنین سالمی و همکاران (۳۲) بیان نمودند که مایه‌کوبی گندم با سویه‌های *Bacillus*، *Azospirillum* و *Azotobacter* و تولید هورمون‌های گیاهی و جلوگیری از پاتوژن‌ها، باعث بهبود رشد گیاه شدند. ضیائی‌ان و همکاران (۴۱) گزارش کردند که کاربرد توام کود فسفر و باکتری حل‌کننده فسفات تأثیر مثبتی بر افزایش ارتفاع بوته‌ها داشت. همچنین در پژوهشی دیگر گزارش شد که مایه‌کوبی گندم با PGPR همراه با سایر مدیریت‌های کودی باعث بهبود شاخص‌های رشد، افزایش تولید دانه و همچنین افزایش NPK در دانه و بقایای گیاه شد (۸). با توجه به اثرات مفید ذکر شده از ریزوباکترهای محرک رشد گیاه، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر سه سویه PGPR بر تر (از نظر توان حل‌کنندگی فسفات‌های نامحلول و متحمل به تنش‌های کم‌آبی و شوری) بر تعدادی از شاخص‌های رشد و غلظت فسفر در اندام‌های مختلف گندم دیم، طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و

خاک) به ترتیب بعد تنک کردن و انتهای پنجه دهی بصورت محلول در آب به تمام گلدان‌ها اضافه شد (۱۷).

آماده سازی بذور

بذر گندم (*Triticum aestivum* L.) رقم آذر ۲ از بانک ژن گروه زراعت و اصلاح نباتات پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران تهیه گردید. بذره‌های سالم و هم‌اندازه جداسازی و به مدت ۳۰ ثانیه در اتانول ۷۰ درصد غوطه‌ور شدند و با سرم فیزیولوژیک (۰/۸۵ درصد نمک سدیم کلراید) استریل شستشو گردیدند؛ سپس به مدت ۳ دقیقه در هیپوکلریت سدیم ۰/۵ درصد غوطه‌ور شده و با سرم فیزیولوژیک استریل ۸ بار شستشو شدند (۳۳).

آماده‌سازی زادمایه و مایه کوبی بذور

طی پژوهش‌های قبلی از بین باکتری‌های جداسازی شده از دیم‌زارهای استان‌های قزوین و زنجان، سه جدایه برتر باکتری منتخب و شناسایی شده با نام‌های *B. pumilus* strain W72 و *B. safensis* strain W73 (MF689056) و *B. safensis* strain W73 (MF689056).

جدول ۱- توان تحمل سویه‌های باکتری استفاده شده به کم‌آبی، شوری و انحلال فسفر از منابع خاک فسفات و تری کلسیم فسفات

Table 1- Tolerance potential of used bacterial strains to water deficit, salinity and phosphorus solubilization from rock phosphate and tricalcium phosphate sources

تیمارهای باکتری Bacterial treatments	سویه‌های باکتری Bacterial strains	حلالیت تری کلسیم فسفات Solubility of tricalcium phosphate (mg l ⁻¹)	حلالیت خاک فسفات Solubility of rock phosphate (mg l ⁻¹)	تحمل به شوری Salinity tolerance (%NaCl)	تحمل به خشکی Drought tolerance (bar)
B1	<i>Bacillus pumilus</i> strain W72	58	37	4	-17.17
B2	<i>B. safensis</i> strain W72	101	69	8	-22.17
B3	<i>Staphylococcus succinus</i> strain R12N2	220	131	8	-22.17

برداشت محصول و اندازه گیری صفات در گیاه

در پایان دوره رشد گیاهان که ۱۲۵ روز طول کشید متوسط ارتفاع گیاهان، تعداد خوشه‌های بارور، نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی، وزن خشک کل گیاه (شامل ریشه، اندام هوایی و دانه که در آن با دمای ۶۵ درجه سلسیوس در مدت ۷۲ ساعت خشک شدند)، تعداد دانه، وزن هزاردانه و غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه نیز پس از هضم خشک با روش فسفو واندو مولیبدات-روش زرد (۴۰)، برای هر واحد آزمایشی (گلدان) اندازه‌گیری و محاسبه شد.

آنالیز آماری داده‌ها

تجزیه آماری با نرم‌افزار SAS و مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون توکی (HSD) و در سطح احتمال پنج درصد انجام شدند.

کاشت گیاه و اعمال تنش کم‌آبی

طبق طرح آزمایشی در تیمارهای باکتری، درون هر گلدان تعداد ۱۰ بذر تیمار شده با زادمایه‌ها طبق طرح آزمایشی کشت و آبیاری با آب مقطر در حد ۸۰ درصد (FC) انجام شد. سه هفته پس از کشت واحدهای آزمایشی تنک شدند و در هر واحد آزمایشی (گلدان) ۵ بوته نگه داشته شد. با شروع مرحله ساقه رفتن نیز تیمار تنش رطوبتی شدید (طبق جدول ۲، رطوبت ۵۵ درصد (FC) نزدیک به رطوبت نقطه پژمردگی دائم (PWP) بود) طبق طرح آزمایشی به‌صورت وزنی اعمال شد و تا برداشت محصول ادامه یافت. همچنین در طول دوره ۱۲۵ روزه آزمایش، گلدان‌ها در گلخانه با درجه حرارت روز ۲۵±۲°C و شب ۲۰±۲°C و طول دوره روشنایی ۱۶ ساعت با متوسط شدت نور ۲۳۰۰۰ لوکس نگهداری شدند (۲۵).

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک استفاده شده
Table 2- Physical, chemical and biological properties of used soil

شن Sand	لای Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture	درصد اشباع SP	ظرفیت مزرعه ای FC	نقطه پژمردگی دائم PWP	قابلیت هدایت الکتریکی EC	واکنش خاک pH	کربن آلی OC	ماده آلی OM	کربنات کلسیم CaCO ₃	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	کل Total		قابل دسترس Available							باکتری های حل کننده PSB	
													نیترژن N	فسفر P	فسفر P	پتاسیم K	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	روی Zn			
(%)					(%)		dS m ⁻¹		(%)			cmc kg ⁻¹	(mg kg ⁻¹)										CFU g ⁻¹
23	51	26	Loam	38.9	15.8	7.1	6.95	8.22	0.73	1.26	12.2	15	0.07	303.8	2.31	245	2.5	3.1	0.3	0.7	2.8×10 ²		

نتایج و بحث

میانگین ارتفاع گیاه

مطابق با جدول ۳، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی باکتری، رطوبت و کود فسفوری که بر متوسط ارتفاع گیاهان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود؛ اثرات متقابل دوجانبه باکتری و رطوبت نیز در سطح احتمال پنج درصد بر این صفت معنی‌دار شد. تیمارهای کودی F0 و F4 به ترتیب بیشترین و کمترین میانگین ارتفاع گیاه را به خود اختصاص دادند. تیمار کودی F4 نسبت به F1 و تیمارهای کودی F2، F3، F4 و F5 نسبت به F0 بطور معنی‌داری این صفت را افزایش دادند. عبارت دیگر تیمارهای دارای کود سوپر فسفات تریپل با همدیگر اختلاف معنی‌داری نداشتند و نسبت به شاهد و تیمار خاک فسفات باعث افزایش معنی‌دار این صفت شده‌اند (جدول ۴). مصرف کود شیمیایی سوپر فسفات تریپل در خاکی که فسفر قابل جذب آن کمتر از حد بحرانی است باعث افزایش رشد و عملکرد گندم می‌شود (۱۷)؛ ولی سطوح مختلف مصرف این کود (بسته به شرایط آزمایش) ممکن است از نظر بعضی از شاخص‌های رشد مانند ارتفاع بوته، نتواند تفاوت معنی‌داری ایجاد کند (۱۹ و ۴۱). همچنین هر یک از تیمارهای باکتریایی در سطح رطوبتی W80 نسبت به W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند. در سطح رطوبتی W80 باکتری‌های B2 و B3 نسبت به B0، این صفت را افزایش دادند؛ ولی در سطح رطوبتی W55 هیچیک از تیمارهای باکتریایی B0، B1، B2 و B3 اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشتند (جدول ۵). در تنش‌های شوری و کم‌آبی رشد گیاهان مخصوصاً ارتفاع آنها کاهش پیدا می‌کند. ولی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در اغلب

موارد مایه‌کوبی گیاهان با PGPR ارتفاع گیاهان افزایش می‌یابد (۶، ۷، ۱۶ و ۳۴). البته این میکروارگانیسم‌ها همیشه و در همه حال اثرات مفید و معنی‌دار بر گیاهان ندارد و ممکن است در شرایط مختلف آزمایشی از مایه‌کوبی این میکروارگانیسم‌ها با گیاهان اثرات مختلفی را شاهد باشیم (۳). با توجه به جدول ۲، خاک استفاده شده در این آزمایش جزء خاک‌های شور طبقه‌بندی می‌شود، بنابراین در تمام واحدهای آزمایشی گیاهان با تنش شوری مواجه بودند. در حقیقت باکتری‌های B2 و B3 نسبت به شاهد (B0) در شرایط تنش شوری و بدون اعمال تنش کم‌آبی (W80) توانستند ارتفاع گیاه گندم را بطور معنی‌داری افزایش دهند؛ ولی در شرایط تنش شوری و تنش کم‌آبی (W55) این توانایی را نداشتند. به نظر می‌رسد که وجود چنین تفاوت‌های عملکردی در شرایط مختلف از ماهیت زیستی این میکروارگانیسم‌ها نشأت می‌گیرد به همین دلیل در شرایط مختلف شاهد رفتارهای متفاوت از مایه‌کوبی گیاهان با این میکروارگانیسم‌ها هستیم.

تعداد خوشه بارور

تجزیه واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که تنها اثرات اصلی باکتری، رطوبت و کود فسفوری بر تعداد خوشه‌های بارور گیاهان در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). تیمار باکتری‌های B3 و B2 به ترتیب بیشترین و کمترین تعداد خوشه بارور را به خود اختصاص دادند البته تیمار باکتری‌های B1 و B3 اختلاف معنی‌داری با B0 نداشتند (شکل ۱).

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات اندازه‌گیری شده در گیاه

Table 3- ANOVA of measured traits in plant

	Source	B	W	F	B×W	B×F	W×F	B×W×F	Error	CV%
	DV	df 3	1	5	3	15	5	15	96	
Mean squares (MS)	PIH	93.80**	25262.50**	69.70**	60.30*	9.60 ^{ns}	20.60 ^{ns}	6.60 ^{ns}	13.10	6.62
	FCI	8.13**	156.25**	3.68**	0.16 ^{ns}	0.48 ^{ns}	0.33 ^{ns}	0.35 ^{ns}	0.62	14.08
	R/Sh	0.01**	0.11**	0.00 ^{ns}	0.01**	0.00 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.00 ^{ns}	0.00	13.06
	TWP	79.60**	11399.50**	32.30**	44.50**	4.10 ^{ns}	2.70 ^{ns}	1.60 ^{ns}	3.50	6.95
	GrN	499 ^{ns}	151127**	2851**	2877**	276 ^{ns}	202 ^{ns}	151 ^{ns}	233	12.18
	TGW	162.66**	1824.78**	0.13 ^{ns}	53.97**	0.08 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.10 ^{ns}	2.97	5.1
	RPC	0.31**	1.54**	0.18**	0.13**	0.01**	0.01**	0.01**	0.00	3.66
	SPC	0.00**	0.01**	0.00**	0.01**	0.00**	0.00**	0.00**	0.00	3.46
	GPC	0.09**	0.44**	0.05**	0.04**	0.00**	0.00**	0.00**	0.00	3.11

تیمارهای باکتریایی (B)، محتوی آب خاک (W)، کودهای فسفوری (F) متغیرهای وابسته (DV)، ارتفاع گیاه (PIH)، خوشه‌های بارور (FCI)، نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی (R/Sh)، وزن خشک کل گیاه (TWP)، تعداد دانه (GrN)، وزن هزار دانه (TGW)، غلظت فسفر ریشه (RPC)، غلظت فسفر اندام هوایی (SPC)، غلظت فسفر دانه (GPC)، *** و ^{ns} به ترتیب نشان دهنده معنی داری در $p < 0.05$ ، $p < 0.01$ و غیر معنی داری $p < 0.05$

Bacterial treatments (B), Soil Water Content (W), Phosphorus Fertilizers (F), Dependent Variable (DV), Plant Height (PIH), Fertile Clusters (FCI), Root dry weight /shoot dry weight ratio (R/Sh), Total Dry Weight of Plant (TWP) Grain Number (GrN), Thousand Grain Weight (TGW), Root Phosphorus Concentration (RPC), Shoot Phosphorus Concentration (SPC), Grain Phosphorus Concentration (GPC). *, ** and ^{ns} indicate significant at $p < 0.05$, $p < 0.01$ and non significant at $p < 0.05$, respectively.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات اصلی کود فسفوری بر صفات رشد و عملکردی گیاه گندم

Table 4- Mean comparison of main effects of P-fertilizers on yield and growth traits of wheat

تیمارهای کود فسفوری P fertilizers treatments	میانگین ارتفاع گیاه Average of plant height (cm pot ⁻¹)	تعداد خوشه بارور Fertile cluster (number pot ⁻¹)	وزن خشک کل گیاه Total dry weight of plant (g pot ⁻¹)	تعداد دانه Grain Number (number pot ⁻¹)
F0	52.13 c	4.96 c	25.11 c	107.96 b
F1	52.81 bc	5.25 bc	25.80 bc	115.29 b
F2	55.39 ab	5.67 ab	27.27 ab	129.46 a
F3	55.82 ab	5.92 a	27.58 a	133.38 a
F4	56.10 a	5.88 ab	28.08 a	134.29 a
F5	55.53 ab	5.83 ab	27.47 a	130.75 a

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) نمی‌باشند.

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns ($P < 0.05$).

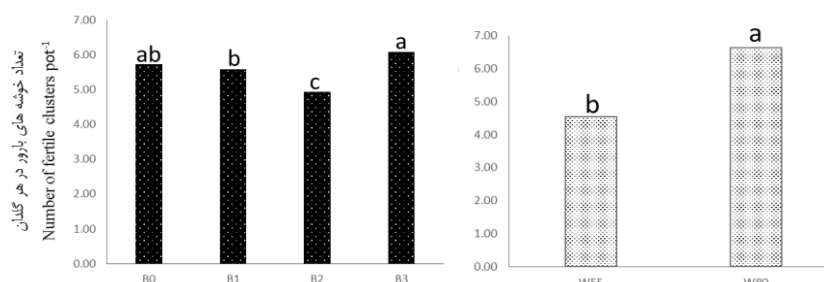
جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای رطوبتی و باکتری بر صفات رشد و عملکردی گیاه گندم

Table 5- Mean comparison of mutual effects of soil water content and bacterial treatments on yield and growth traits of wheat

		نسبت وزن خشک ریشه			تعداد دانه در	
محتوی آب خاک	تیمارهای باکتریایی	میانگین ارتفاع گیاه	بر وزن خشک اندام هوایی	وزن خشک کل گیاه	هر گلدان	وزن هزار دانه
soil water content	Bacterial treatments	Average of plant height (cm pot ⁻¹)	Root dry weight /shoot dry weight ratio	Total dry weight of plant (g pot ⁻¹)	Grain Number (number pot ⁻¹)	Thousand grain weight (g)
W55	B0	41.37 c	0.16 d	17.13 d	90.11 d	29.87 de
	B1	41.14 c	0.19 c	17.83 cd	92.06 cd	28.43 e
	B2	39.85 c	0.20 c	17.83 cd	83 d	31.44 d
	B3	43.17 c	0.22 bc	19.15 c	106 c	31.08 d
W80	B0	64.27 b	0.25 ab	32.25 b	161.22 a	33.62 c
	B1	67.98 ab	0.25 a	36.72 a	167.06 a	35.84 b
	B2	68.92 a	0.25 a	38.03 a	157.94 ab	39.16 a
	B3	70.32 a	0.25 a	36.12 a	144.11 b	40.68 a

اعداد با حروف مشترک در هر ستون دارای اختلاف معنی دار ($P < 0.05$) نمی‌باشند.

Numbers followed by the same letter are not significantly differentns ($P < 0.05$).



شکل ۱- مقایسه میانگین اثرات اصلی تیمارهای رطوبتی و باکتریایی بر تعداد خوشه‌های بارور گندم

Figure 1- Mean comparison of main effects of soil water content and bacterial treatments on fertile clusters

نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی گیاه شد. به نظر می‌رسد PGPR با افزایش رشد ریشه (از طریق مکانیسم‌های مختلف مخصوصاً تولید هورمون‌های رشد گیاه (۴))، سطح تماس ریشه با خاک را افزایش می‌دهد (دسترسی به حجم بیشتری از خاک برای جذب آب و عناصر غذایی) و از این طریق مقاومت گیاه به تنش کم‌آبی را افزایش می‌دهند.

وزن خشک کل گیاه

اثرات اصلی باکتری، رطوبت و کود فسفری، و اثرات متقابل دوجانبه باکتری و رطوبت بر وزن کل گیاه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). تیمارهای کودی F3، F4 و F5 نسبت به F1 و F0 به‌طور معنی‌داری این صفت را افزایش دادند (جدول ۴). خیلی راد و میرسید حسینی (۱۴) گزارش کردند که مصرف کود فسفری نسبت به عدم مصرف آن (در خاکی که فسفر قابل جذب آن ۴/۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و pH آن نیز برابر ۷/۴۵ بود) به‌طور معنی‌داری وزن خشک گیاه را افزایش داد. همچنین نتایج حاصل از پژوهش موسوی و سپهر (۲۰) نشان داد که مصرف خاک فسفات نسبت به شاهد (عدم مصرف کود) در ۳ رقم جو اختلاف معنی‌داری از نظر این صفت ایجاد نکرد؛ که نتایج بدست آمده در این پژوهش تأیید کننده نتایج پژوهش‌های مذکور می‌باشد. با توجه به جدول ۲، چون فسفر قابل استفاده خاک بسیار پایین می‌باشد بنابراین معقول به نظر می‌رسد که با مصرف کود شیمیایی سوپرفسفات تریپل رشد و تولید ماده خشک گیاهان افزایش یابد. از طرفی، چون درصد کربنات کلسیم معادل و نیز pH خاک استفاده شده در این آزمایش زیاد بود (جدول ۲)، بنابراین مصرف خاک فسفات در افزایش وزن خشک گیاه تأثیر معنی‌داری نداشت. زیرا مصرف خاک فسفات در خاک‌هایی با pH خنثی تا قلیایی، کارایی لازم را در عرضه فسفر برای گیاه را ندارد (۹). در هر یک از تیمارهای باکتریایی، سطح رطوبتی W80 نسبت به W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش وزن خشک گیاه شد. همچنین در سطح رطوبتی W80 تیمارهای باکتریایی B1، B2 و B3 نسبت به B0 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند؛ ولی در سطح

نتایج حاصل از پژوهش کادر و همکاران (۱۰) نیز نشان می‌دهد که مایه کوبی گندم با PGPR نسبت به شاهد (عدم مایه کوبی) باعث افزایش معنی‌دار این صفت نشد. بعضی از باکتری‌ها علی‌رغم دارا بودن خصوصیات PGPR در شرایط درون شیشه‌ای، در کشت خاکی گیاهان بدلیل حاکم بودن شرایط و برهمکنش‌های پیچیده آب، خاک، گیاه و میکروب‌ها در ریزوسفر (۳۰)، نمی‌توانند اثرات محرک رشدی بر روی تمام شاخص‌های رشد و نمو گیاهان داشته باشند. سطح رطوبتی W80 نسبت به W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شد (شکل ۱). به‌صورت کلی شوری و کم‌آبی دو تنش بزرگ محیطی هستند که از طریق تنش‌های ثانویه مانند تنش‌های اسمزی، اکسیداتیو و تنش یونی باعث کاهش بعضی از صفت‌های رشدی گیاه می‌شوند (۱۳ و ۲۲). بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت قابل استفاده گیاه تعداد خوشه‌های گیاه نیز افزایش یابد (۲۷). تیمارهای کودی F2، F3، F4 و F5 نسبت به F0 به‌طور معنی‌داری این صفت را افزایش دادند (جدول ۴). معمولاً با مصرف کود فسفری تعداد پنجه‌ها افزایش می‌یابد (۴۲). زیرا غلظت فسفر قابل جذب یکی از عوامل محدود کننده رشد و نمو گیاهان در اغلب خاک‌ها بوده و مصرف کود فسفری از منبع مناسب آن (مانند سوپر فسفات تریپل) می‌تواند اجزاء عملکرد گیاهان را مانند تعداد خوشه‌های بارور را افزایش دهد.

نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی

علاوه بر اثرات اصلی باکتری و رطوبت، اثرات متقابل دوجانبه باکتری و رطوبت بر نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). هر یک از تیمارهای باکتریایی در سطح رطوبتی W80 نسبت به سطح W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند. همچنین در سطح رطوبتی W80 تیمارهای باکتری B1، B2 و B3 نسبت به B0 از نظر این صفت اختلاف معنی‌داری نداشتند؛ ولی در سطح رطوبتی W55 هر سه تیمار باکتری (B1، B2 و B3) نسبت به B0 این صفت را افزایش دادند (جدول ۵). رزاقی و همکاران (۳۱) نیز اظهار داشتند که در شرایط تنش مایه‌کوبی گیاه با *Staphylococcus* باعث افزایش

معنی‌دار شد (جدول ۳). هر یک از تیمارهای باکتریایی در سطح رطوبتی W80 نسبت به سطح W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند. همچنین در سطح رطوبتی W80 تیمارهای باکتری B1، B2 و B3 نسبت به B0 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند؛ ولی در سطح رطوبتی W55 هیچ‌یک از این تیمارها نسبت به شاهد اختلاف معنی‌داری از نظر این صفت نداشتند (جدول ۵). اغلب پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مایه کوبی گیاهان با PGPR، باعث بهبود شاخص‌های کمی و کیفی گیاهان می‌شود؛ که افزایش وزن هزار دانه (یعنی تولید دانه‌های درشت‌تر و با وزن بیشتر) یکی از این شاخص‌هاست (۲۳). ولی پژوهش کادر و همکاران (۱۰) نشان داد که باکتری‌های محرک رشد همیشه و در همه حال اثرات مثبت معنی‌دار بر این صفت ندارد.

غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه

تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تمامی اثرات اصلی باکتری، رطوبت و کود فسفری، اثرات متقابل دو جانبه باکتری و رطوبت، باکتری و کود فسفری، رطوبت و کود فسفری، و اثرات متقابل سه جانبه باکتری، رطوبت و کود فسفری بر غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۳). در سطح رطوبتی W55، تیمار باکتری B3 نسبت به B0، B1 و B2، در هر یک از سطوح کود فسفری به‌طور معنی‌داری این صفت‌ها را افزایش داد. علاوه بر این استفاده از باکتری B3 بدون مصرف کود فسفری (F0) نسبت به تیمارهای باکتری B0، B1 و B2 با سطح حداکثری کود فسفری (F4) از نظر غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه اختلاف معنی‌داری نداشت. در سطح رطوبتی W80، تیمارهای باکتری B2 و B3 در هر یک از سطوح کود فسفری، و تیمار باکتری B1 اغلب در سطوح کودی F0، F1، F2 و F3 نسبت به B0 این صفت‌ها را افزایش دادند. استفاده از باکتری B3 با سطح کودی F2 نیز نسبت به تیمار باکتری B0، B1 و B2 با سطح کودی F4 از نظر غلظت فسفر ریشه و دانه اختلاف معنی‌داری نداشت. همچنین استفاده از باکتری‌های B2 و B3 با سطح کودی F2 و B1 با سطح کودی F3، نسبت به تیمار B0 با سطح کودی F4 از نظر غلظت فسفر اندام هوایی اختلاف معنی‌داری نداشت. که در کل این نتایج نشان دهنده کارآمدی باکتری B3 بدون استفاده از کودهای فسفری در شرایط تنش کم‌آبی، و نیز کارآمدی باکتری‌های B1، B2 و B3 در استفاده حداقلی از کودهای فسفری در شرایط بدون تنش کم‌آبی برای تأمین فسفر در بخش‌های مختلف گیاه است (شکل ۲). افزایش قابلیت دسترسی عناصر ضروری مخصوصاً فسفر توسط PGPR برای گیاهان به اثبات رسیده است (۴، ۵)؛ که معمولاً از طریق کاهش pH، و تولید فیتازها، فسفاتازهای اسیدی و قلیایی سبب افزایش دسترسی گیاه به

رطوبتی W55 تنها تیمار باکتری B3 نسبت به B0 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت گردید (جدول ۵). پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در شرایط تنشی و غیر تنشی باکتری‌های محرک رشد با مکانیسم‌های مختلف می‌توانند رشد و نمو گیاهان را بهبود بخشند (۴ و ۱۱). البته PGPR همیشه و در هر شرایطی باعث بهبود رشد و نمو گیاهان نمی‌شود (۳).

تعداد دانه

مطابق با جدول ۳، تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که علاوه بر اثرات اصلی رطوبت و کود فسفری اثرات متقابل دوجانبه باکتری و رطوبت بر تعداد دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. تیمارهای کودی F2، F3، F4 و F5 نسبت به F0 و F1 به‌طور معنی‌داری این صفت را افزایش دادند (جدول ۴). استفاده از کود شیمیایی فسفری مانند سوپر فسفات تریپل باعث افزایش تعداد دانه در سنبله گندم می‌شود ولی میزان استفاده از آن برای ایجاد اختلاف معنی‌دار نسبت به شاهد (عدم مصرف کود) در شرایط مختلف متفاوت است (۱۹)؛ که باید برای ارقام، خاک‌ها و شرایط آب و هوایی متنوع جداگانه آزمایش و تعیین شود. هر یک از تیمارهای باکتریایی در سطح رطوبتی W80 نسبت به سطح W55 به‌طور معنی‌داری باعث افزایش این صفت شدند. همچنین در سطح رطوبتی W55 تنها تیمار باکتری B3 نسبت به B0 تعداد دانه را به‌طور معنی‌داری افزایش داد (جدول ۵). با کاهش آب قابل دسترس، قابلیت دسترسی به عناصر غذایی و جذب آنها بوسیله گیاه کاهش می‌یابد، بنابراین یکی از مشکلات گیاه در شرایط تنش کم‌آبی کمبود عناصر غذایی می‌باشد. در میان عناصر غذایی نیز فسفر به عنوان یکی از عناصر پر مصرف، دارای نقشی اساسی و مهم در رشد گیاه است که جذب آن در شرایط کمبود آب کاهش می‌یابد (۲۸). به نظر می‌رسد در شرایط رطوبتی مطلوب (W80) قابلیت دسترسی به آب، عناصر غذایی و قابلیت استفاده از کود فسفری، افزایش یافته و در نهایت باعث تولید محصول بیشتر در گندم شده است. همچنین در اغلب موارد، مایه کوبی گندم با PGPR در شرایط تنش باعث افزایش عملکرد گیاه می‌شود. زیرا این میکروارگانیسم‌ها با مکانیسم‌هایی رشد گیاهان را بهبود می‌بخشند و در مقابل تنش‌ها مقاوم می‌کنند در نتیجه تولید محصول افزایش می‌یابد (۴ و ۱۱). البته لازم به ذکر است که در بعضی مواقع اثرات غیرمعنی‌دار یا حتی کاهش رشد گیاهان در اثر مایه کوبی با برخی از این میکروارگانیسم‌ها مشاهده می‌شود (۳۵).

وزن هزار دانه

علاوه بر اثرات اصلی باکتری و رطوبت، اثرات متقابل دوجانبه باکتری و رطوبت بر وزن هزار دانه در سطح احتمال یک درصد

گردید. با توجه به اهمیت تولید محصول با وزن هزار دانه بیشتر (تولید دانه‌های سالم‌تر و درشت‌تر با وزن بیشتر) نسبت به دیگر صفات‌های اندازه‌گیری شده، می‌توان گفت: هر عاملی که بتواند نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی، غلظت فسفر (ریشه، دانه و اندام هوایی)، تعداد دانه، تعداد خوشه بارور، گیاه و مخصوصاً وزن خشک کل و ارتفاع گیاه گندم را افزایش دهد باعث افزایش وزن هزار دانه گندم خواهد شد؛ زیرا صفات‌های ذکر شده همبستگی بین ۵۴ تا ۸۴ درصدی با وزن هزار دانه گندم داشتند.

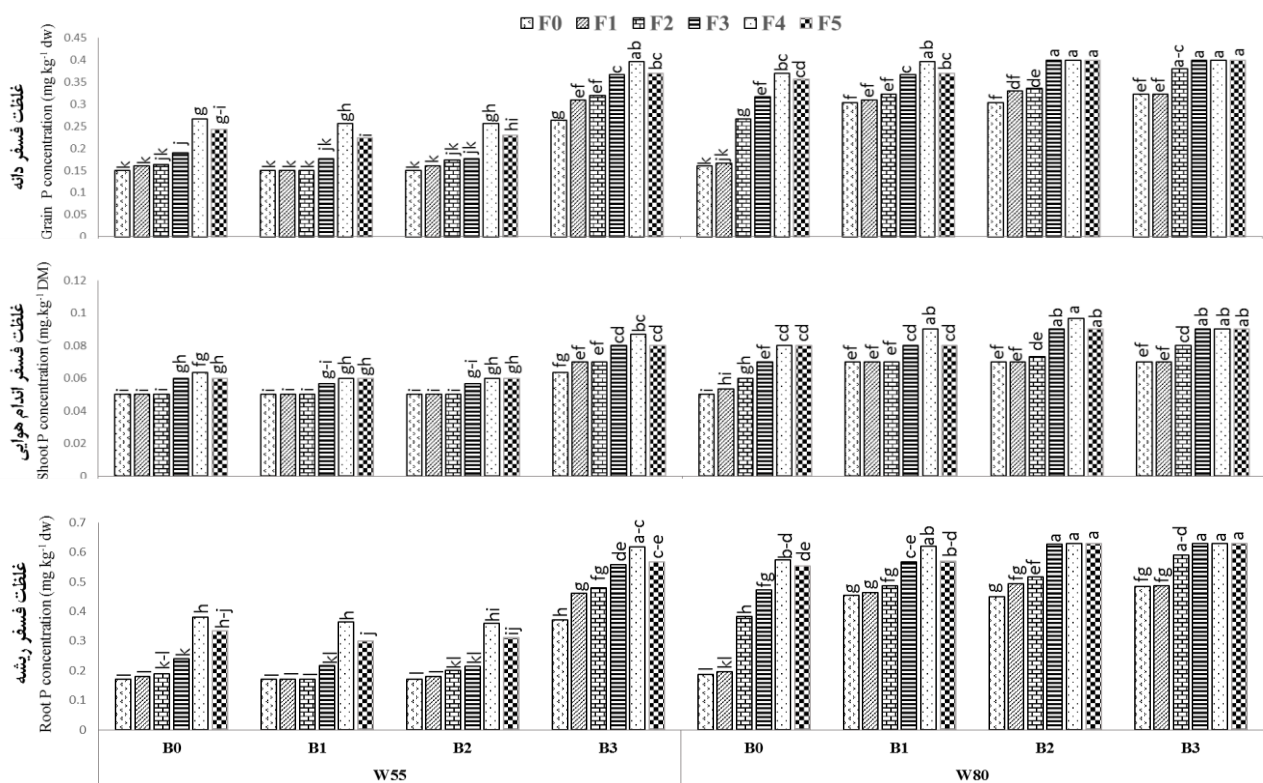
نتیجه‌گیری

سطح رطوبتی ۸۰ درصد نسبت به ۵۵ درصد ظرفیت زراعی (FC) باعث افزایش ارتفاع، وزن خشک گیاه، نسبت وزن خشک ریشه بر وزن خشک اندام هوایی، تعداد خوشه بارور، تعداد دانه، وزن هزار دانه، و همچنین افزایش غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه شد. تمام سطوح تیمارهای دارای کود سوپر فسفات تریپل نیز نسبت به شاهد (بدون کود فسفوری) باعث افزایش کمی اغلب صفات مذکور گردید؛ ولی تیمار خاک فسفات نسبت به شاهد فاقد چنین اثری بود.

فسفر می‌شوند (۱۲). مک‌بیث و همکاران (۱۸) نیز بیان می‌کنند که بین میزان رطوبت خاک و تغذیه فسفر برای گیاهان یک رابطه هم‌افزایی وجود دارد؛ همچنین مصرف فسفر بصورت کود باعث بهبود استفاده گیاه از فسفر خاک می‌شود. با توجه به اینکه هر چه از رطوبت اشباع به سمت رطوبت‌های کمتر پیش می‌رویم جریان رطوبت بصورت مایع کاهش می‌یابد و فقط محدود به یکسری منافذ خیلی ریزتر می‌شود و در نتیجه انتشار فسفر محدودتر می‌گردد. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که با افزایش رطوبت قابلیت جذب فسفر نیز افزایش یابد.

همبستگی بین صفات‌ها

بطور کلی، تمام صفات اندازه‌گیری شده با یکدیگر همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد داشتند. (جدول ۶). قوی‌ترین همبستگی‌ها (بیشتر از ۹۵ درصد) میان غلظت‌های فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه، و همچنین میان ارتفاع گیاه و وزن خشک کل گیاه بود؛ ضعیف‌ترین همبستگی‌ها (کمتر از ۵۵ درصد) نیز میان وزن هزار دانه و نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی مشاهده



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل تیمارهای باکتری، رطوبت و کود فسفوری بر غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه
Figure 2- Mean comparison of mutual effects of bacterial treatments, soil water content and P-fertilizer on phosphorus concentration of root, shoot and grain

جدول ۶- همبستگی پیرسون بین صفات اندازه‌گیری شده

Table 6- Pearson correlation among measured traits

Traits	PIH	FCL	R/Sh	TWP	GrN	TGW	RPC	SPC	GPC
PIH	1**								
FCL	0.78**	1**							
R/Sh	0.68**	0.56**	1**						
TWP	0.98**	0.76**	0.68**	1**					
GrN	0.89**	0.73**	0.66**	0.89**	1**				
TGW	0.83**	0.60**	0.54**	0.84**	0.64**	1**			
RPC	0.71**	0.65**	0.60**	0.72**	0.71**	0.67**	1**		
SPC	0.68**	0.61**	0.57**	0.69**	0.67**	0.64**	0.96**	1**	
GPC	0.70**	0.64**	0.60**	0.71**	0.70**	0.67**	0.99**	0.96**	1**

ارتفاع گیاه (PIH)، خوشه‌های بارور (FCL)، نسبت وزن خشک ریشه به اندام هوایی (R/Sh)، وزن خشک کل گیاه (TWP)، تعداد دانه (GrN)، وزن هزار دانه (TGW)، غلظت فسفر ریشه (RPC)، غلظت فسفر اندام هوایی (SPC)، غلظت فسفر دانه (GPC)، ** نشان دهنده همبستگی معنی‌دار در $p < 0.01$

Plant Height (PIH), Fertile Clusters (FCL), Root dry weight /shoot dry weight ratio (R/Sh), Total Dry Weight of Plant (TWP), Grain Number (GrN), Thousand Grain Weight (TGW), Root Phosphorus Concentration (RPC), Shoot Phosphorus Concentration (SPC), Grain Phosphorus Concentration (GPC). **, indicates significant correlation at $p < 0.01$

مختلف گیاه شد و همچنین اغلب شاخص‌های رشد و عملکردی گیاه گندم را بهبود بخشید. بنابراین برای کشت گندمی که ممکن است در یک یا چند مرحله از رشد و نمو خود با تنش رطوبتی مواجه شود (مانند کشت گندم در دیمن‌زارها) استفاده از تیمار باکتری *Staphylococcus succinus* R12N2 مناسب به نظر می‌رسد؛ ولی برای توصیه در قالب کود زیستی مناسب دیمن‌زارهای گندم نیازمند آزمایشات تکمیلی در شرایط طبیعی (دیمن‌زارهای گندم) است.

البته مصرف خاک فسفات به همراه هر یک از تیمار باکتری‌های *S. succinus* R12N2 و *B. safensis* W73، *B. pumilus* W72 سطح رطوبتی ۸۰ درصد FC، و نیز تیمار باکتری *S. succinus* R12N2 در سطح رطوبتی ۵۵ درصد FC، باعث افزایش غلظت فسفر ریشه، اندام هوایی و دانه گندم شد. به طور کلی، تیمار باکتری‌های *S. succinus* R12N2 و *B. pumilus* W72 تنها در سطح رطوبتی ۸۰ درصد FC، ولی تیمار باکتری *S. succinus* R12N2 در هر دو سطح رطوبتی ۵۵ و ۸۰ درصد FC، باعث افزایش غلظت فسفر بخش‌های

منابع

- Ahmadi K., Ebadzadeh H.R., Abdshah H., Kazemian A., and Rafiey M. 2018. Agricultural Statistics Vol. I: Crops in 2016-17 years. 1st ed. Publication of Ministry of Agriculture, Deputy of Planning and Economics, Tehran, Iran. (In Persian)
- Barnawal D., Bharti N., Pandey S.S., Pandey A., Chanotiya C.S., and Kalra A. 2017. Plant growth-promoting rhizobacteria enhance wheat salt and drought stress tolerance by altering endogenous phytohormone levels and TaCTR1/TaDREB2 expression. *Physiologia Plantarum* 161: 502-514.
- Delfim J., Schoebitz M., Paulino L., Hirzel J., and Zagal E. 2018. Phosphorus availability in wheat, in volcanic soils inoculated with phosphate-solubilizing *Bacillus thuringiensis*. *Sustainability* 144: 1-15.
- Etesami H., and Maheshwari D.K. 2018. Use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPRs) with multiple plant growth promoting traits in stress agriculture: Action mechanisms and future prospects. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 156: 225-246.
- Glick B. 2012. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica* 1-15.
- Heydarian Z., Yu M., Gruber M., Glick B.R., Zhou R., and Hegedus D.D. 2016. Inoculation of soil with plant growth promoting bacteria producing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase or expression of the corresponding *acdS* gene in transgenic plants increases salinity tolerance in *Camelina sativa*. *Frontiers in Microbiology* 7: 1-17.
- Hokmalipour S., Panahyan Kivi M. and Shiri Janaghard M. 2018. The Effect of Seed Inoculation with *Azotobacter* and *Azospirillum* on Yield and some Qualitative and Quantitative Characteristics of Safflower at Different Planting Date. *Journal of Water and Soil* 32(5): 931-942. (In Persian with English abstract)
- Inwati D.K., Yadav J., Yadav J.S., Pandey G., and Pandey A. 2018. Effect of different levels, sources and methods of application of nitrogen on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7: 2398-2407.
- Johnston A.E., and Syers J.K. 1998. Nutrient Management for Sustainable Crop Production in Asia. Wallingford, UK, CAB International. 394 pp.
- Kader M.A., Main M.H., and Hoque M.S. 2002. Effects of *Azetobacter* inoculant on the yield and nitrogen uptake by wheat. *Journal of Biological Sciences* 2: 259-261.

- 11- Kadmiri I.M., Chaouqui L., Azaroual S.E., Sijilmassi B., Yaakoubi K., and Wahby I. 2018. Phosphate-solubilizing and auxin-producing rhizobacteria promote plant growth under saline conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering* 44: 3403-3415.
- 12- Kaur G., and Reddy M.S. 2015. Effects of phosphate-solubilizing bacteria, rock phosphate and chemical fertilizers on maize-wheat cropping cycle and economics. *Pedosphere* 25: 428-437.
- 13- Kaushal M., and Wani S.P. 2016. Rhizobacterial-plant interactions: Strategies ensuring plant growth promotion under drought and salinity stress. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 231: 68-78.
- 14- Khalili-Rad R., and Mirseyed Hosseini H. 2016. Assessing some root morphological properties and efficiency indexes in several phosphorus efficient and inefficient cultivars of wheat *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 6(3): 65-82. (In Persian with English abstract)
- 15- Klute A. (Ed), (1986). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. Agronomy, ASA and SSSA, Wisconsin, USA: Madison.
- 16- Li H., Lei P., Pang X., Li S., Xu H., Xu Z., and Feng X. 2017. Enhanced tolerance to salt stress in canola (*Brassica napus* L.) seedlings inoculated with the halotolerant *Enterobacter cloacae* HSNJ4. *Applied Soil Ecology* 119: 26-34
- 17- Malekutey M.J., and Gheybi M.N. 1997. Determination of Critical Level of Nutritional Elements in Strategic Products and the Correct Recommendation of Fertilizer in the country. Agriculture Education Publication, Karaj, 56 pp. (In Persian)
- 18- McBeath T.M., McLaughlin M.J., Kirby J.K., and Armstrong R.D. 2012. The effect of soil water status on fertiliser, topsoil and subsoil phosphorus utilisation by wheat. *Plant and Soil* 358: 337-348.
- 19- Moradi M., Siadat S.A., Khavazi K., Naseri R., Maleki A., and Mirzaei A. 2011. Effect of application biofertilizer and phosphorus fertilizers on qualitative and quantitative traits of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Crop Ecophysiology* 18: 51-66. (In Persian with English abstract)
- 20- Musavi R., and Sepehr E. 2014. Phosphorus efficiency of some barley genotypes in the presence of phosphate-solubilizing microorganisms. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture* 16: 27-40. (In Persian with English abstract)
- 21- Nadeem S.M., Zaheer Z.A., Naveed M., and Nawaz S. 2013. Mitigation of salinity-induced negative impact on the growth and yield of wheat by plant growth-promoting rhizobacteria in naturally saline conditions. *Annals of Microbiology* 63: 225-232.
- 22- Nakbanponte W., Pantlurtumpai N., Sangdee A., Sakulpone N., Sirisom P., and Pimthong A. 2014. Salt tolerant and plant-growth-promoting-bacteria isolated from Zn/Cd contaminated soil: identification and effect on rice under saline conditions. *Journal of Plant Interactions* 9: 379-387.
- 23- Naseri R., and Mirzaei A. 2010. Response of yield and yield components of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) to seed inoculation with *Azotobacter* and *Azospirillum* and different nitrogen levels under dry land condition. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 9: 445-449.
- 24- Oksinska M.P., Wright S.A.I., and Pietr S.J. 2011. Colonization of wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) by strains of *Pseudomonas* spp. with respect to their nutrient utilization profiles. *European Journal of Soil Biology* 47: 364-373.
- 25- Ova E.A., Kutman U.B., Ozturk L., and Cakmak I. 2015. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant and Soil*, DOI: 10.1007/s11104-015-2483-8.
- 26- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. (Eds.). 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. 2nd ed. Agronomy, ASA and SSSA, Wisconsin, USA: Madison.
- 27- Parvazi-Shandi S., Pazoki A., Asgharzadeh A., and Azadi A. 2013. Effects of irrigation intervals, plant growth promoting Rhizobacteria and humic acid on yield and yield components of wheat (Kavir cultivar). *Modern Science of Sustainable Agriculture* 9: 9-16. (In Persian with English abstract)
- 28- Payne W.A., Hossner L.R., Onken A.B., and Wendt C.W. 1995. Nitrogen and phosphorus uptake in pearl millet and its relation to nutrient and transpiration efficiency. *Agronomy Journal* 87: 425-431.
- 29- Pereyra M.A., Garcia P., Colabelli M.N., Barassi C.A., and Creus C.M. 2012. A better water status in wheat seedlings induced by *Azospirillum* under osmotic stress is related to morphological changes in xylem vessels of the coleoptile. *Applied Soil Ecology* 53: 94-97.
- 30- Pinton R., Varanini Z., and Nannipieri P. 2007. *The Rhizosphere Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface*. CRC Press Taylor & Francis Group, LLC
- 31- Razzaghi B.K., Alikhani H.A., Etesamia H., and Khoshkholgh-Sima N.A. 2019. Improved growth and salinity tolerance of the halophyte *Salicornia* sp. by co-inoculation with endophytic and rhizosphere bacteria. *Applied Soil Ecology* 138: 160-170.
- 32- Saleemi M., Kiani M.Z., Sultan T., Khalid A., and Mahmood S. 2017. Integrated effect of plant growth-promoting rhizobacteria and phosphate-solubilizing microorganisms on growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed condition. *Agriculture and Food Security* 6(46): 1-8.

- 33- Salem G., Stromberger M.E., Byrne P.F., Manter D.K., El-Fekid W., Weir T.L. 2018. Genotype-specific response of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) to irrigation and inoculation with ACC deaminase bacteria. *Rhizosphere* 8: 1–7.
- 34- Sapre S., Gontia-Mishra I., and Tiwari S. 2018. *Klebsiella* sp. confers enhanced tolerance to salinity and plant growth promotion in oat seedlings (*Avena sativa*). *Microbiological Research* 206: 25–32.
- 35- Shool A., Shamshiri M.H., Akhgar A.R., and Esmaeilizadeh M. 2014. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi and *Pseudomonas fluorescens* on vegetative growth of pistachio seedlings (*Pistacia vera* cv. Qazvini) under four different irrigation regimes. *Iranian Journal of Horticultural Science* 45: 297-307. (In Persian with English abstract)
- 36- Sperber J.I. 1958. The incidence of apatite-solubilizing organisms in the rhizosphere and soil. *Australian Journal of Agricultural Research* 9: 778.
- 37- Timmusk S., Abd El-Daim I.A., Copolovici L., Tanilas T., Kannaste A., Behers L., Nevo E., and Seisenbaeva G., Stenström E., and Niinemets Ü. 2014. Drought-tolerance of wheat improved by rhizosphere bacteria from harsh environments: enhanced biomass production and reduced emissions of stress volatiles. *PLoS One* 9: e96086.
- 38- Upadhyay S.K., Singh J.S., and Singh D.P. 2011. Exopolysaccharide-Producing plant growth-promoting rhizobacteria under salinity condition. *Pedosphere* 21: 214–222.
- 39- USDA. 2019. World Agricultural Production. Foreign Agricultural Service. Circular Series WAP 5-19.
- 40- Westerman L.R. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Society of America, INC. Madison, Wisconsin, USA.
- 41- Ziaeyan H., Farahbakhsh A.R., Besharati H. and Joukar L. 2016. Interaction effects of phosphate solubilizing bacteria and mycorrhiza on the growth and phosphorus uptake of Sorghum. *Journal of Water and Soil* 30(5): 1478-1488. (In Persian with English abstract)
- 42- Zabihi H.R., Savagebi G.R., Khavazi K., and Ganjali A. 2009. Response of wheat growth and yield to application of plant growth promoting rhizobacteria at various levels of phosphorus fertilization. *Iranian Journal of Field Crops Research* 1: 41-51. (In Persian with English abstract)



Effect of Super Strains of *Bacillus* and *Staphylococcus* Isolated from Dryland Farming on Quantitative and Qualitative Indices of Wheat under Stress Condition

E. Shirmohammadi¹- H.A. Alikhani^{*2}- A.A. Pourbabaee³- H. Etesami⁴

Received: 11-11-2019

Accepted: 31-10-2020

Introduction: Stresses of drought, salinity and deficiency of nutrients especially phosphorus (P) are the most important challenges for wheat production in Iran. One of the ways to achieve more wheat yield production is increasing of this plants tolerance to stresses of water-deficit, salinity and deficiency of essential elements such as P; and/or alleviate destructive effects of these stresses. In this respect, use of PGPR can be useful. Research has shown that PGPR with multiple mechanisms reduces the negative effects of water-deficit and salinity stresses, and also increases the resistance of plants to these stresses, which ultimately leads to increase of plants growth. This study was designed and carried out to investigate the effect of three superior PGPR on qualitative and quantitative indices of wheat under water-deficit stress in saline soil.

Materials and Methods: The soil used in this experiment was collected from longitude of 49° 26' 25" E, latitude of 35° 52' 26" N and elevation of 1534 m (located in the Qazvin province of Iran) from depth of 0-30 cm of soil. According to the experimental design, 3.5 kg of soil with applying P-fertilizers treatments was filled to the pots. The factorial arrangement based on completely randomized design (CRD) was used in this study. The treatments were replicated three times. The first factor: soil water content at two levels including 80% and 55% FC (W80 and W55); the second factor: Bacterial inoculants at four levels including control or non-inoculated seeds with bacterium (B0), inoculated seeds with *Bacillus pumilus* strain W72 (B1), inoculated seeds with *B. safensis* strain W73 (B2), inoculated seeds with *Staphylococcus succinus* strain R12N2 (B3); and the third factor: P-fertilizers at six levels including control or non-treated plants with P-fertilizers (F0), and plants treated with (rock phosphate) RP - (F1), RP + 19 mg triple superphosphate (TSP) / kg of soil (F2), RP + 38 mg TSP / kg of soil (F3), RP + 57 mg TSP / kg of soil (F4), with 57 mg TSP / kg of soil (F5), generally there were 144 experimental units (pots). Also, 192 mg RP (containing 13.8% P₂O₅ or 6.13% P) was mixed per kg of soil in each of RP treatments. Statistical analysis of data was performed using SAS software and comparison of means was evaluated by using the Tukey's test (HSD) at $p < 0.05$ level. There were 5 plants in each pot and irrigated up to 80% FC with distilled water. With the beginning of stem elongation stage, water-deficit stress was applied and continued until the harvest. During the experiment, pots were kept in greenhouse at 25/20±2°C day/night temperatures and 16 h photoperiod with 23,000 lux light intensity. At the end of the experiment, plants height, fertile clusters, root dry weight /shoot dry weight ratio, total dry weight of plant, grain number, thousand grain weight, also, root, shoot and grain P-concentration were measured.

Results and Discussion: Generally, it can be said that the moisture level of W80 compared to W55 increased all of measured traits in wheat plant. Due to the unique properties of water and its role in biological and non-biological reactions, by reducing soil water content to near of the permanent wilting point (W55), water absorption by the plant hardly occurs. Therefore, the plant needs to consume more energy for water absorption or grow with less water than normal status, which these factors disturb the metabolism of cells and eventually decreases natural activity and growth plant. Also, it seems that under water stress condition, wheat plant by formation of "Rhizosheaths" around their own roots, enters to the defensive phase and by this strategy prevents expansion of their own rhizosphere. With attention to the special importance of the rhizosphere in the supply of water, nutrients and activity of microorganisms, as well as the effect of microorganisms secretion and root exudates on the solubility and availability of nutrients. Thus, it is reasonable that qualitative and quantitative traits of plants decrease by reduction of the rhizosphere diameter due to the water-deficit stress. There was no significant difference between application of rock phosphate and control (F0) for most of measured traits of soil and plant;

1- Assistant Professor, Department of Soli Science, Faculty of Water & Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

2- Professor, Department of Soli Science, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

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

3 and 4- Associate Professor and Assistant Professor, Department of Soli Science, Faculty of Agricultural Engineering & Technology, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, respectively.

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.83826

but, application of RP with bacterial treatments (B1 and B2 at W80 and B3 at both level of W55 and W80) compared to the control, often increased measured traits. Moreover, each level of TSP compared to the control, increased this trait frequently. Research indicate that RP can be used as a P-fertilizer, but its efficiency depends on its reactivity in the soil. There is ample evidence that RP has not enough efficiency in neutral and alkaline soils; but, it can be used as the P-fertilizer with proper efficiency in acidic soils or alkaline soil with application of PGPR. Basically, all of three bacterial treatments (B1, B2 and B3) at level of W80 and B3 treatment at level of W55, compared to control (without bacterial inoculation) improved qualitative and quantitative traits of plant. Research also shows that under stressful and non-stressful conditions, PGPR can improve plant growth by different strategies. However, this microorganism does not always improve plant growth under all conditions. It seems that this could be due to differences in genetic and function of bacteria and with conditions change, each bacterium may behave differently.

Conclusions: In general, for wheat cultivation that may get exposed to moisture stress at one or more stages of its growth (such as dry-farming of wheat), the use of B3 bacterial inoculant (*Staphylococcus succinus* strain R12N2) seems appropriate for crop management. Because in this study at both W80 (non-water-deficit stress) and W55 (severe water-deficit stress) levels of soil water content, B3 treatment increased qualitative and quantitative of wheat traits. In other words, because of the natural conditions of the dryland farming, the probability of precipitation is different; it seems that B3 treatment can increase wheat production under these conditions. However, the use of this bacterium as a biofertilizer for dryland wheat farming in Iran or other places of the world requires further testing and evaluation in dryland farms of that countries.

Keywords: Phosphate solubilizing bacteria (PSB), PGPR, Water deficit stress



مقاله علمی-پژوهشی

معرفی کیلیت‌های اسید آمینه و کیتوسان آهن به عنوان منبع قابل دسترس آهن در محلول غذایی برای گیاهان با استراتژی I و II

آتنا میربلوک^۱ - میر حسن رسولی صدقیانی^{۲*} - ابراهیم سپهر^۳ - امیر لکزیان^۴ - محمد حکیمی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

فراهمی مقدار کافی از عنصر آهن قابل دسترس برای گیاهان در محلول‌های غذایی یک چالش بزرگ است. کیلیت‌کننده‌های رایج که در محلول‌های غذایی برای فراهمی عنصر آهن استفاده می‌شوند، مضرات زیادی دارند و می‌توانند اثرات منفی روی رشد گیاهان داشته باشند. در این تحقیق کیلیت‌های اسیدهای آمینه و آهن شامل گلايسین-آهن (Fe-Gly)، فنیل آلانین-آهن (Fe-Phe)، تیروزین-آهن (Fe-Tyr) و متیونین-آهن (Fe-Met) و کیلیت‌های کیتوسان به دو فرم هیدرولیز شده‌ی اسیدی [Fe-C(A.hyd)] و آنزیمی [Fe-C(E.hyd)] سنتز و ویژگی‌های شیمیایی آنها با اسپکتروسکوپی IR و آنالیز CHN انجام شد. سپس کارایی این منابع آهن در مقایسه با Fe-EDDHA برای دو گیاه لوبیا (استراتژی I) و ذرت (استراتژی II) در محیط آبکشت بررسی گردید. کاربرد برخی از کیلیت‌های آلی اسیدهای آمینه و کیتوسان به طور معنی‌داری وزن خشک اندام هوایی گیاهان را در مقایسه با Fe-EDDHA افزایش داد. بیشترین مقدار آهن در اندام هوایی گیاهان ذرت و لوبیا در کاربرد کیلیت‌های Fe-Met، Fe-Tyr و [Fe-C(A.hyd)] مشاهده گردید. کاربرد کیلیت‌های مورد مطالعه منجر به تجمع آهن در ریشه‌ها گردید، لیکن بیشترین مقدار انتقال آهن به اندام‌های هوایی در گیاهانی که در معرض کیلیت‌های [Fe-C(A.hyd)] و Fe-Tyr بودند، اتفاق افتاد. بیش از ۵۰ درصد آهن در کمپلکس با Fe-Tyr در گیاه لوبیا و در کمپلکس با Fe-C(A.hyd) در ذرت و لوبیا از ریشه به اندام‌های هوایی انتقال یافتند. استفاده از کیلیت‌های آلی آهن در محیط رشد گیاه فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز (FCR) برگ را در دو گیاه لوبیا و ذرت در مقایسه با Fe-EDDHA افزایش داد. با این حال میانگین کلی فعالیت این آنزیم در گیاه لوبیا بیشتر از ذرت بود. نتایج به دست آمده نشان داد که استفاده از برخی کیلیت‌های آلی آهن در محلول‌های غذایی در مقایسه با Fe-EDDHA می‌تواند مقادیر کافی از آهن را برای جذب گیاه فراهم کند و همچنین رشد اندام هوایی و ریشه گیاه لوبیا و ذرت را بهبود بخشد. بر طبق نتایج این کیلیت‌ها می‌تواند به عنوان یک جانشین برای فراهمی آهن به جای Fe-EDDHA در محلول‌های غذایی به کار روند.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آمینه، ذرت، فاکتور انتقال، فریک کیلیت رداکتاز، کیلیت، کیتوسان، لوبیا

مقدمه

می‌شود و جذب آهن به کمک پروتئین‌های ناقل موجود در غشاء به داخل گیاه صورت می‌گیرد، این مکانیسم در گیاهان غیر لگوم فعال است (۲۳). در گیاهان گونه‌های گرامینه این فرایند با تولید فیتوسایدروفورها به وسیله ریشه انجام می‌شود که آهن (III) با سایدروفور کیلیت شده و بدون اینکه به آهن (II) احیا شود به وسیله ناقلین موجود در ریشه جذب می‌شود، این مکانیسم استراتژی (II) نامیده می‌شود (۳۱). برای افزایش کارایی جذب آهن به وسیله گیاهان از کیلیت‌های سنتزی زیادی مخصوصاً از خانواده آمینوپولی کربوکسیلات‌ها مثل EDTA، DTPA و EDDHA به میزان گسترده‌ای استفاده می‌شود (۵۲). این کیلیت‌ها قابلیت دسترسی و

آهن (Fe) یکی از عناصر ضروری مهم برای گیاهان است که واکنش‌های سلولی مهمی مثل سنتز کلروفیل، تولید کلروپلاست و فرایندهای آنتی اکسیدانی سلول را کنترل می‌کند (۳۲). علی‌رغم فراوانی این عنصر در خاک‌ها، آهن اصولاً به فرم نامحلول فریک [Fe(III)] و غیر قابل دسترس برای گیاهان در خاک وجود دارد. گیاهان برای دستیابی به آهن خاک به دو مکانیسم مختلف عمل می‌کنند. در گیاهان دارای استراتژی (I) کاهش Fe(III) به Fe(II) به کمک آنزیم فریک کیلیت رداکتاز (FCR) موجود در ریشه انجام

۴- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۵- استاد گروه شیمی، دانشگاه پیام نور مرکز مشهد

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری و استادان گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

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

زیست فراهمی آهن را در ناحیه ریزوسفر گیاه افزایش می‌دهند، اما مضرات زیادی دارند که استفاده از آنها را دچار تردید کرده است. زیست تجزیه پذیری کم و پایداری بالای این کیلیت‌ها در محیط زیست (۱۹) منجر به ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی می‌شود. کاربرد این کیلیت‌ها در کشت هیدروپونیک، باعث می‌شود که بعد از جذب آهن توسط گیاه، لیگاند‌های آزاد در محلول افزایش یابد و این لیگاند‌ها با دیگر عناصر فلزی در محلول مثل مس و منگنز کمپلکس‌های قوی ایجاد کرده و قابلیت دسترسی آنها را برای گیاه کاهش می‌دهند (۳). در محلول‌پاشی، کیلیت‌های سنتزی می‌توانند یون‌های کلسیم موجود دیواره سلولی گیاه را به دام ببندازند و منجر به تخریب بافت برگ گیاه شوند (۳۴). کیلیت‌های سنتزی نسبت به تجزیه نوری غیر مقاوم هستند و نیمه عمر ترکیباتی چون Fe-EDTA و Fe-DTPA در مقابل نور فرابنفش ۸ تا ۱۱ دقیقه گزارش شده است (۵۱). هانگاتر و استاسینوپولوس (۱۷) مشاهده کردند که Fe-EDTA در مقابل نور سفید به ترکیبات گلیو زایلک اسید و فرم‌الدهید تجزیه می‌شود که این دو ترکیب ممانعت کننده از رشد گیاه می‌باشند. با توجه به مضرات این کیلیت‌ها، جایگزین کردن ترکیباتی با مضرات کمتر ضروری به نظر می‌رسد. اخیراً کیلیت‌های آلی فلزی که تحت عنوان ترکیبات دوستار محیط زیست شناخته شده‌اند در حال یافتن جایگاه مناسبی در بین کودهای مورد استفاده در کشاورزی هستند.

مطالعات نشان می‌دهد که کاربرد ترکیبات آلی مثل اسیدهای آمینه و پلی ساکاریدها به عنوان عوامل کیلیت کننده عناصر فلزی مورد نیاز گیاه می‌تواند در بهبود کیفیت تغذیه‌ای آهن برای گیاهان مورد استفاده قرار گیرد و این کیلیت‌ها غلظت آهن و قابلیت دسترسی آن را برای گیاه افزایش می‌دهند (۴۸). این ترکیبات آلی ویژگی‌هایی دارند که استفاده از آنها را برای کاربری کشاورزی به عنوان کیلیت کننده فلزات و افزایش قابلیت دسترسی آنها مناسب کرده است. زیست تجزیه پذیری پایین این ترکیبات در خاک‌ها، سمیت کم، حساسیت کم آنها به تجزیه نوری و تأثیر مثبت روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها و همچنین شاخص‌های رشد گیاه این ترکیبات را برای کاربری کشاورزی منحصر به فرد کرده است (۲۱). قاسمی و همکاران (۱۵) با اضافه کردن کیلیت‌های اسیدهای آمینه و فلز روی به محیط رشد گیاه کاهو مشاهده کردند که علاوه بر افزایش رشد و عملکرد گیاه، انتقال موثر عنصر روی به اندام‌های هوایی نسبت به شاهد در گیاه اتفاق می‌افتد. اسیدهای آمینه همچنین با کمک به بهبود فرایند فتوسنتز، ساخت پروتئین‌ها و رونویسی mRNA قادر به افزایش رشد و عملکرد گیاه می‌باشند. مطالعات نشان داده است که کاربرد آرچنین (۱۳) و گلوتامین (۴۵) به طور معنی‌داری رشد و عملکرد

گیاه را افزایش می‌دهد. در بین پلی ساکاریدها، کیتوسان^۱ (پلی مری از جنس کیتین) به دلیل داشتن گروه‌های زیاد آمین^۲ و کربوکسیل^۳، کیلیت کننده مناسب برای فلزات و منبع کربن و نیتروژن برای رشد و عملکرد گیاه می‌باشد. ولی کیتوسان به دلیل وزن مولکولی بالا، حلالیت کمی در آب دارد و در محیط‌های اسیدی ضعیف قابل حل شدن است. کیتوسان می‌تواند به زنجیره‌های کوتاه تر دپلی‌مریزه شود که این عمل منجر به افزایش حلالیت آن و همچنین افزایش گروه‌های عامل برای واکنش با فلزات می‌شود. هیدرولیز کیتوسان به دو روش اسیدی و آنزیمی قابل انجام است. در روش اسیدی از اسیدهایی چون HCl، H₂SO₄ و HNO₃ برای شکستن پیوندها و تولید کیتوسانی با وزن مولکولی کم استفاده می‌شود. در هیدرولیز آنزیمی کیتوسان می‌توان از آنزیم‌های اختصاصی مثل کیتیناز و آنزیم‌های غیر اختصاصی مثل سولاز و پکتیناز استفاده کرد (۲). کیتوسان امروزه در امور مختلفی به عنوان جاذب (۲۲)، سیستم انتقال دارو در بدن (۴۲) و کنترل بیماری‌های گیاهی (۲۵) مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات نشان می‌دهد که شاخص‌های بیوشیمیایی مثل فعالیت آنزیم‌های حاوی آهن می‌تواند برای ارزیابی کارایی جذب آهن در گیاه استفاده شود (۴۷). در گیاهان، بعد از جذب آهن در ریشه‌ها، انتقال آهن در آوندهای چوبی به کمک حامل‌هایی مثل سیترات، نیکوتین آمین و میوجینیک اسید انجام می‌شود (۲۸)، که این فرم آهن (III) بعد از انتقال به اندام‌های هوایی باید به آهن (II) کاهش یابد تا قادر به انتقال به سلول‌های مزوفیل برگ باشد. این عمل به کمک آنزیم فریک کیلیت رداکتاز (Fe chelate reductase (FCR)) در سلول‌های برگ انجام می‌شود (۷). شواهد اولیه برای حضور این سیستم کاهشی در غشاء پلاسمایی سلول‌های مزوفیل، اولین بار به وسیله ی بروگمن و همکاران ارائه شد؛ آنها نشان دادند که یک مرحله‌ی کاهشی جذب آهن در سلول‌های مزوفیل برگ گیاه *Vigna unguiculata* اتفاق افتاد. مطالعات فیزیولوژیکی نیز بر اساس تقاضای آهن در سلول‌های برگ، سیستم کاهش آهن در برگ را تأیید می‌کنند. در مطالعات زیادی کاهش در فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ در پاسخ به کمبود آهن در گیاهان مطالعه شده است. این مطالعات بر روی گیاه آفتابگردان (۲۴)، انگور (۴۹)، کیوی (۴۶)، جو و سورگوم (۳۵) نشان دادند که فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ اغلب در گیاهان دارای کمبود آهن نسبت به گیاهانی که آهن را به حد کافی دریافت کرده‌اند، کمتر است. این مطالعات نشان می‌دهد که فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ می‌تواند به عنوان یک شاخص بیوشیمیایی وضعیت تغذیه‌ای آهن را در گیاه نشان دهد. در این پژوهش، ابتدا کیلیت‌های اسیدهای آمینه (متیونین،

تعیین ویژگی‌های کیلیت‌های آلی-آهن

اسپکتروسکوپی IR با استفاده از دستگاه FT-IR-8400 Shimadzu در رنج 400 تا 4000 cm^{-1} با صفحه‌ی KBr انجام شد. مقدار کربن، نیتروژن و هیدروژن ترکیبات با استفاده از دستگاه Thermo Finnigan Flash 1112EA elemental analyzer اندازه‌گیری شدند. غلظت آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030, USA تعیین شد. عملکرد واقعی واکنش یعنی مقدار محصول بدست آمده در یک واکنش شیمیایی (با در نظر گرفتن خطاهای آزمایشگاهی) که بر حسب گرم یا به صورت مول بیان می‌شود. درصد عملکرد در واقع کارایی فرایند سنتز را نشان می‌دهد و از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Percent yield} = \frac{\text{actual yield}}{\text{theoretical yield}} \times 100 \quad (1)$$

که عملکرد نظری (عملکرد نظری در واقع ماکزیمم مقدار محصول تولید شده در یک واکنش شیمیایی که بر اساس فرمول شیمیایی می‌تواند بدست بیاید، است) با استفاده از محاسبات استیکیومتری بر اساس تعداد مول‌های شرکت‌کننده در واکنش محاسبه می‌شود (۲۶). اندازه کیلیت‌ها با استفاده از نرم‌افزار Hyperchem تعیین شد.

به منظور تعیین حلالیت عناصر و مقدار عنصر کمپلکس شده با کیلیت از روش ویلن و همکاران (۲۰۰۷) استفاده شد. برای تعیین حلالیت عناصر، ۵ گرم از هر ترکیب با ۴۰۰ میلی لیتر آب مقطر دوبار تقطیر به مدت ۳۰ دقیقه شیک شدند و سپس حجم محلول به ۵۰۰ میلی لیتر رسانیده شد. محلول‌ها فیلتر شدند و بعد از حذف ترکیبات آلی (فیلتر ۰/۴۵ میکرون) غلظت عنصر آهن به کمک دستگاه جذب اتمی (Perkin Elmer 3030, USA) اندازه‌گیری شد. به منظور تعیین غلظت عنصر کمپلکس شده، ۵ گرم از هر کمپلکس در آب مقطر دوبار تقطیر حل شد و به حجم ۵۰۰ میلی لیتر رسانیده شد. ۲۰ میلی لیتر از هر محلول برداشته شد و دو قطره H_2O_2 (۳۳ درصد) به آن اضافه گردید و سپس pH محلول با NaOH (۰/۵ مولار) به ۹ رسانیده شد. بعد از ۳۰ دقیقه دوباره pH در ۹ تنظیم شد و سپس در ظروف با پارافیلیم پوشیده شد. محلول‌ها یک روز در تاریکی باقی ماندند. سپس pH دوباره به ۹ تنظیم شد و نمونه‌ها به فلاسک‌های حجمی ۱۰۰ میلی لیتری انتقال پیدا کردند و با آب مقطر دوبار تقطیر به حجم رسانیده شدند. در انتها محلول‌ها از فیلتر ۰/۴۵ میکرون عبور داده شدند و عناصر کمپلکس شده با دستگاه جذب اتمی تعیین شدند. قبل از عبور از فیلتر ۰/۴۵ میکرون در صورت مشاهده‌ی رسوب در برخی از نمونه‌ها لازم است که محلول‌ها با دور ۷۵۰۰ rpm به مدت ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ شوند.

تیروزین، فنیل آلانین و گلایسین) و دو فرم کیتوسان (هیدرولیز شده اسیدی و آنزیمی) سنتز شد و سپس با دو هدف (۱) انتخاب مناسب‌ترین کیلیت آهن بر اساس استراتژی‌های مختلف جذب آهن در دو گیاه لوبیا و ذرت و (۲) مقایسه‌ی اثر تغذیه کیلیت‌های آلی آهن روی فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ در طول زمان، کارایی این منابع آلی تامین کننده‌ی آهن، بررسی شدند.

مواد و روش‌ها

آماده‌سازی کیلیت‌های کیتوسان-آهن

کیتوسان به دو روش اسیدی و آنزیمی هیدرولیز شد. برای ساخت کیتوسان هیدرولیز شده به روش آنزیمی ابتدا ۲۰۰ میلی لیتر کیتوسان ۲/۲ درصد (Medium Molecular Weight-Aldrich)، حل شده در بافر استات سدیم ۱۰۰ میلی مولار ($\text{pH} = 4.0$)، با ۲۰ میلی لیتر آنزیم خالص سلولاز (100 U/ml) مخلوط شد و در دمای ۴۲ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ ساعت نگهداری شد (۴۱). بعد از چهار ساعت برای توقف فعالیت آنزیم، محلول، ۱۰ دقیقه جوشانده شد و سپس در دمای اتاق قرار گرفت تا خشک شود. برای تهیه کیتوسان هیدرولیز شده‌ی اسیدی، ۵ گرم پودر کیتوسان در ۵۰ سی‌سی HCl یک مولار حل شد و سپس به مدت چهار ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد. کیتوسان هیدرولیز شده با اتانول در نسبت ۱ : ۳ (V/V) رسوب داده شد و سپس با فرایند مکش در حضور هیدروکسید سدیم خشک شد (۳۹). به منظور آماده‌سازی کیلیت‌های کیتوسان هیدرولیز شده با فلز آهن، ۰/۳ گرم کیتوسان هیدرولیز شده با $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ در نسبت مولاری چهار به یک در ۳۰ میلی لیتر اسید استیک (۵٪) حل شده و سپس با اضافه کردن $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ pH محلول به ۷ افزایش داده شد. مخلوط در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت حرارت داده شد و بعد از سرد شدن در دمای اتاق با ۲۰۰ میلی لیتر استون خالص خشک شد و پودر سفید رنگ کیلیت کیتوسان هیدرولیز شده اسیدی-آهن $[\text{Fe-C(A.hyd)}]$ و کیتوسان هیدرولیز شده آنزیمی-آهن $[\text{Fe-C(E.hyd)}]$ آماده شدند.

آماده‌سازی کیلیت‌های اسید آمینه-آهن

اسیده‌های آمینه متیونین (Met)، فنیل آلانین (Phe)، تیروزین (Tyr) و گلایسین (Gly) به عنوان لیگاند با نمک $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ با نسبت مولاری ۲ به ۱ مخلوط شدند (۳۹). مخلوط در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت روی هیتز قرار گرفت. کیلیت‌های اسید آمینه‌های با فلز آهن (II) با استفاده از اتانول ۹۵ درصد و هواخشک شدن تهیه شدند. در انتها کیلیت‌های گلایسین-آهن (II) (Fe-Gly) ، فنیل آلانین-آهن (II) (Fe-Phe) ، تیروزین-آهن (II) (Fe-Tyr) و متیونین-آهن (II) (Fe-Met) سنتز شدند.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی کی‌لیت‌های تهیه شده

Table 1- Chemical characteristics of chelates

ترکیب Compound	رنگ Color	pH محلول Solution pH	pH شروع رسوب Precipitation pH	حلالیت عنصر (گرم بر کیلوگرم) Soluble element (g kg ⁻¹)	عنصر کمپلکس شده (گرم بر کیلوگرم) Complexed element (g kg ⁻¹)	بخش کمپلکس شده (درصد) Complexed fraction (%)
Fe(Chi) ₂ -acid-hyd	Dark Brown	3.5	5.5	44.31	43.42	98
Fe(Chi) ₂ -enzymatic-hyd	Light Brown	3.8	5.0	39.50	29.50	74
[Fe(Gly)].(SO ₄) ₂ .5H ₂ O	Dark Red	4.5	5.0	181.2	108.6	60
[Fe(Phe)].(SO ₄) ₂ .5H ₂ O	Light Red	3.2	5.2	21.50	10.20	47
[Fe(Met)].(SO ₄).H ₂ O	Red	3.3	5.0	56.12	30.86	55
[Fe(Tyr) ₃].(SO ₄).0.5H ₂ O	Light green	3.6	6.5	14.21	07.10	50
Fe-EDDHA	Red	----	----	14.11	13.26	93

(۳۰).

طراحی آزمایش

دو گونه گیاهی ذرت (*Zea mays*) به عنوان گیاه استراتژی (I) و لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) به عنوان گیاه استراتژی (II) انتخاب شدند. دانه‌های گیاهان در محیطی شامل کوکوپیت، پرلیت و ورمی کمپوست (۱:۱:۱) در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۷۰ درصد در تاریکی جوانه زده و تا مرحله گیاهچه‌ای رشد کردند. سپس گیاهچه‌ها به گلدان‌های پلاستیکی که حاوی محلول‌های غذایی آماده شده طبق جدول ۲ بودند، انتقال یافتند. در محلول‌های غذایی به جای فلز آهن از کی‌لیت‌های سنتزی اسیدهای آمینه و کیتوسان شامل [Fe-C(A.hyd)]، [Fe-C(E.hyd)]، [Fe-Gly]، Fe-، Phe، Fe-Met، Fe-Tyr و Fe-EDDHA (به عنوان شاهد) استفاده شد. گلدان‌ها در گلخانه و در شرایط ثابت و کنترل شده، با ۸ ساعت نور در روز و دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۵ تا ۷۵ درصد قرار گرفتند. برای ثابت نگه داشتن غلظت، هر هفته محلول‌های غذایی تعویض شدند. بعد از ۸ هفته گیاهان برداشت شدند. ریشه و اندام‌های هوایی به طور جداگانه جداسازی و بعد از شستشو با آب مقطر در آون در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. نمونه‌های خشک شده پودر شدند و در کوره الکتریکی و دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد خاکستر شدند. خاکستر گیاهان در اسید کلریدریک ۲ مولار و با کمک حرارت هضم شدند و پس از رساندن به حجم مشخص، مقادیر آهن در نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Perkin Elmer 3030, USA تعیین شدند (۱۱). فاکتور انتقال^۱ با استفاده از رابطه‌ی زیر تعیین شد:

درصد فرکشن کمپلکس شده بر اساس رابطه‌ی زیر محاسبه شد

(۵۳).

$$\text{Complexed fraction} = \frac{\text{complexed}}{\text{soluble}} \times 100 \quad (۲)$$

در این رابطه عنصر کمپلکس شده در صورت کسر و عنصر محلول در مخرج کسر مشخص شده است.

به منظور ارزیابی pH نهایی محلول‌ها، محلول کمپلکس‌های آهن با غلظت ۵ میلی‌مولار آماده شدند. نمونه‌ها در یک شیکر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با دور ۵۰ rpm به مدت یک ساعت قرار گرفتند، سپس pH محلول‌ها با استفاده از pH متر مدل Metrohm 691, Switzerland تعیین شدند. برای تعیین pH رسوب کمپلکس‌های آلی آهن، NaOH و HCl به تدریج به محلول‌های ۵ میلی‌مولار کمپلکس‌های آلی آهن اضافه شدند، تا زمانی که رسوب مشاهده شود، سپس قرائت pH با pH متر انجام شد. نتایج حاصل از بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کمپلکس‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

به منظور تعیین پایداری کمپلکس‌های آلی آهن در محلول‌های غذایی، ۶ محلول غذایی (NS1-NS7، جدول ۳) با آب مقطر با محلول‌های استاندارد هوگلند (جدول ۳) آماده شدند. pH نهایی محلول با HCl و NaOH به ۵/۵ تا ۶ تنظیم گردید. آهن از ۶ منبع آهن شامل [Fe-C(A.hyd)]، [Fe-C(E.hyd)]، [Fe-Gly]، Fe-Phe، Fe-Met و Fe-Tyr با غلظت ۰/۱ میلی‌مولار اضافه شد. نمونه‌ها برای جلوگیری از تجزیه نوری در تاریکی قرار داده شدند و به مدت ۵ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با دور ۵۰ rpm شیک شدند. در پایان محلول رویی با استفاده از فیلترهای ۰/۴۵ میکرون فیلتر شدند و غلظت عنصر آهن با استفاده از دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد

جدول ۲- ترکیب محلول غذایی

Table 2- Composition of nutrient solution

ترکیب	غلظت (میلی مولار)	ترکیب	غلظت (میلی مولار)
Component	Concentration (mM)	Component	Concentration (mM)
KNO ₃	1.00000	H ₃ BO ₃	0.0200
Ca(NO ₃) ₂	1.00000	MnSO ₄	0.0020
NH ₄ H ₂ PO ₄	1.00000	ZnSO ₄	0.0020
MgSO ₄	1.00000	CuSO ₄	0.0005
KCl	0.05000	NiSO ₄	0.0010
H ₂ Mo ₇ O ₄	0.00002	Fe-Organic chelates or Fe-EDDHA	0.1000

نکته: در همه‌ی محلول‌های غذایی pH=5.5-6 بود.

مولاری ۲۲/۱۴ تعیین شد و با استفاده از وزن اندام هوایی تازه، فعالیت کاهشی آهن در برگ تعیین شد.

(۳) $TF = C_{shoot}/C_{root}$
 C_{shoot} ، غلظت فلز در اندام هوایی و C_{root} ، غلظت فلز در ریشه گیاه می‌باشد.

آنالیزهای آماری

مقایسه میانگین و آنالیز واریانس تیمارهای آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SPSS در سه تکرار تعیین شدند و میانگین‌ها در سطح معنی‌داری $p < 0.05$ با آزمون دانکن مقایسه شدند. نمودارها با کمک نرم‌افزار Excel رسم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های کی‌لیت‌های آلی-آهن

کی‌لیت‌های اسیدهای آمینه‌ی گلايسين، فیل آلانین، متیونین و تیروزین با $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ با نسبت مولی ۲ به ۱ و کیتوسان هیدرولیز شده اسیدی و آنزیمی با $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ با نسبت مولی ۴ به ۱ و با عملکرد بیش‌تر از ۸۰ درصد ساخته شدند. نتایج جدول ۳ نشان دادند که کی‌لیت‌های آلی آهن پایداری بالایی را در محلول‌های غذایی نشان دادند. درصد آهن باقی‌مانده در محلول‌های غذایی بعد از ۵ روز برای $Fe-Ch(A.hyd)$ و $Fe-Tyr$ بیش از ۹۰ درصد مشاهده شد.

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز (FCR)

فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در برگ گیاهان با استفاده از روش چنی و همکاران (۱۰) تعیین شد. برای این منظور برگ‌های تازه و انتهایی هر گیاه جدا شده و پس از انتقال به آزمایشگاه، وزن شدند و تقریباً ۱۰۰ میلی‌گرم برگ تازه در لوله‌های آزمایش حاوی $CaSO_4$ ۰/۲ میلی‌مولار برای مدت ۱۰ دقیقه شناور شدند. سپس این محلول با ۲ میلی‌لیتر محلول استاندارد شامل بافر MES [2-(4-Morpholino) ethane sulfonic acid] - با غلظت ۰/۲ میلی‌مولار و $pH=5.5$ ، Fe^{+3} -EDTA ۰/۱ مولار، $CaSO_4$ ۱۰ میلی‌مولار و سدیم باتو فانترویلین دی سولفونیک اسید [Na-BPDS] ۰/۳ میلی‌مولار جایگزین شد. نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در نور قرار داده شدند و سپس در یک شیکر درون آب گرم در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد با دور ۵۰ rpm به مدت ۱ ساعت در تاریکی نگهداری شدند. بعد از آنکوباسیون، ۱ میلی‌لیتر از محلول درون هر لوله آزمایش برداشته شد و با کمک دستگاه اسپکتروسکوپی و در طول موج ۵۳۵ نانومتر میزان جذب نور اندازه‌گیری شد. غلظت Fe^{+2} -BPDS با استفاده از ضریب

جدول ۳- درصد آهن باقی‌مانده در محلول بعد از ۵ روز اثرات متقابل در محلول‌های غذایی

تفاوت حروف نشان دهنده‌ی معنی‌داری بر اساس آزمون دانکن می‌باشد.

Table 3- Percentage of Fe remained in solution after 5 days of interaction in nutrient solution
Different letters denote significant differences following Duncan test ($n=3$, $p<5\%$)^a.

محلول غذایی	کی‌لیت‌های آلی آهن	درصد آهن باقیمانده در محلول
Nutrient solution	Fe-organic chelates	Percentage(%) of Fe remaining in solution
NS ₁	Fe-Chi(A.hyd)	92 ^a
NS ₂	Fe-Chi(E.hyd)	71 ^b
NS ₃	Fe-Gly	88 ^a
NS ₄	Fe-Phe	65 ^b
NS ₅	Fe-Met	85 ^a
NS ₆	Fe-Tyr	91 ^a
NS ₇	Fe-EDDHA	90 ^a

^a pH of nutrient solutions in all of samples adjusted in 6 on based Hoagland & Arnon, 1950.

جدول ۴- داده‌های آنالیتیکی برای کیلیت‌های سنتز شده‌ی آهن

Table 4- Analytical data for synthesized Fe-Chelates

کیلیت‌های آلی آهن Fe organic chelates	وزن مولکولی Molecular weight	اندازه کیلیت (نانومتر) Size of chelate (nm)	راندمان (%) Yield	مشاهده شده (محاسبه شده) (%) Found (Calculated) (%)		
				C	H	N
Fe(Chi) ₂ -acid-hyd	564.14	1.72	85.20	43.12 (44.28)	7.70 (7.45)	6.96 (6.01)
Fe(Chi) ₂ -enzymatic-hyd	523.12	2.24	84.00	44.31 (45.82)	6.32 (7.56)	5.78 (6.01)
[Fe(Gly) ₂ .SO ₄].5H ₂ O	413.11	0.51	83.15	6.30 (5.81)	4.17 (3.66)	2.97 (4.17)
[Fe(Phe) ₂ .SO ₄].4H ₂ O	721.80	1.30	83.11	43.3.1 (44.48)	6.91 (5.89)	5.41 (5.74)
[Fe(Met) ₂ .SO ₄].H ₂ O	468.35	1.12	80.25	25.98 (25.64)	5.95 (5.17)	5.50 (5.98)
[Fe(Tyr) ₃ .SO ₄].0.5H ₂ O	704.48	1.25	81.36	46.17 (46.03)	6.33 (4.86)	5.81 (5.96)

جدول ۵- باندهای IR انتخابی اسیدهای آمینه و کیتوسان با آهن (دیسک KBr)

Table 5- Selected IR bands (cm⁻¹) of amino acids and chitosan with Fe (KBr disk)

کیلیت‌های آلی - آهن Fe - Organic chelates	ν (NH ₂)	ν_{asym}^1 (COO ⁻)	ν_{sym}^2 (COO ⁻)	ν (C-N)	Δ ($\nu_{\text{asym}} - \nu_{\text{sym}}$)	Fe-N	Fe-O
Fe(Chi) ₂ -acid-hyd	3429.2	1610.5	1410.0	1103.2	200.5	450	617
Fe(Chi) ₂ -enzymatic-hyd	3465.0	1600.2	1415.0	1095.0	185.2	480	652
[Fe(Gly)].(SO ₄).5H ₂ O	3413.8	1593.1	1392.8	1080.1	200.3	509	624
[Fe(Phe) ₂].SO ₄ .4H ₂ O	3421.3	1682.2	1489.8	1148.1	192.4	482	675
[Fe(Met) ₂].(SO ₄).H ₂ O	3444.6	1608.5	1405.0	1107.1	203.5	570	617
[Fe(Tyr) ₃].(SO ₄).0.5H ₂ O	3205.5	1589.2	1380.0	1153.4	209.5	470	493

1- Asymmetric

2- Symetric

با فلز آهن می‌باشد. تغییرات در فرکانس پیوندهای گروه‌های آمین و کربوکسیل نشان دهنده‌ی واکنش فلز آهن با این گروه‌های عامل در ترکیبات آلی می‌باشد. باندهای جدیدی در کمپلکس‌های آلی آهن در مناطق بین ۴۵۰ تا ۶۷۵ مشاهده شد که به ترتیب مربوط به پیوندهای Fe-O و Fe-N می‌باشند.

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی کمپلکس‌های آهن در جدول ۱ نشان داده شده است. در کاربرد ترکیبات آلی مثل اسیدهای آمینه و کیتوسان برای کمپلکس کردن فلزات به دلیل تغییر زیاد در ساختار عوامل کمپلکس کننده و حضور مکان‌های باند شدن متغیر بر روی آنها، می‌توان از درصد کمپلکس شدن آنها با فلزات در محلول برای ارزیابی پایداری آنها در محیط‌های محلول استفاده کرد. در pH ثابت، کمپلکس‌های آهن فرکشن بالای کمپلکس شدن را نشان دادند و مخصوصاً کیتوسان هیدرولیز شده‌ی اسیدی که ۹۸ درصد با آهن تشکیل کمپلکس داد (جدول ۱). تفاوت بین ترکیبات در ایجاد کمپلکس با فلز آهن به ساختار مکان‌های باند شدن بر روی آنها بستگی دارد. کیتوسان غنی است از گروه‌های آمین و کربوکسیل که به راحتی دی‌پروتونه می‌شوند و ظرفیت کمپلکس شدن با فلز را افزایش می‌دهند. در کمپلکس‌های اسیدهای آمینه با آهن درصد کمپلکس شدن کاهش می‌یابد که ممکن است به دلیل جایگزینی آهن (Log_{FeL} = 5.52) از درون کمپلکس با دیگر فلزات مثل مس و روی (Log_{CuL} = 18.29) باشد (۵۰). نتایج دیگر محققین نشان

داده‌های آنالیتیکی برای کیلیت‌ها در جدول ۴ نشان داده شده است. همه کیلیت‌های آلی با فرمول شیمیایی [Fe(L-L')₂] سنتز شدند. اسیدهای آمینه و کیتوسان در حالت کریستالی به صورت یون‌های دوقطبی با چند گروه عامل^۱ وجود دارند و فرکانس‌های غالب برای لیگاند‌های آزاد با پیوندهای ν_s (Coo⁻), ν_a (Coo⁻), δ_d (NH₂), ν_s (CNN) و ν_a (CNN) همراه است (۸). در این ترکیبات، اسیدهای آمینه و کیتوسان به صورت لیگاند‌های دودندانه عمل می‌کنند و با یک اتم اکسیژن و یک اتم نیتروژن با فلزات پیوند می‌دهند. پیوندهای غالب در مشارکت با کیلیت‌های اسیدهای آمینه و کیتوسان با پیوندهای ν (C-N), ν (C=O), ν (NH₂) و δ (C=O) همراه بود و پیوندهای IR انتخاب شده برای کیلیت‌های آلی با فلز آهن در جدول ۵ نشان داده شده است. اسپکتروسکوپی IR کیلیت‌ها الگوی جذب مشابهی را در مقایسه با لیگاند‌های آزاد و در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ cm⁻¹ نشان دادند. برای گروه‌های -NH₂ پیوندهای ویبریشنال در کیلیت‌های آلی با فلز آهن در محدوده‌ی ۳۲۰۰-۳۵۰۰ cm⁻¹ مشاهده شدند که این پیوندها به واکنش‌های بین مولکولی در حالت جامد بسیار حساس بوده به طور گسترده‌ای پیک‌های واضح نشان می‌دهند. باندهای جذب کمپلکس‌ها در محدوده‌های ۱۶۰۰ و ۱۴۰۰ cm⁻¹ می‌تواند به ترتیب مربوط به ν_{asym} (COO⁻) و ν_{sym} (COO⁻) باشد. مقادیر Δ ($\nu_{\text{asym}} - \nu_{\text{sym}}$) > 200 cm⁻¹ نشان دهنده‌ی باندهای تک دندانه‌ی گروه‌های کربوکسیل

می‌دهد که فلز آهن در کمپلکس با اسید آمینه‌ی تیزورین و کیتوسان هیدرولیز شده‌ی اسیدی، درصد کمپلکس‌شدن بالایی را تقریباً نزدیک به Fe-EDDHA نشان داد. این موضوع پایداری بیشتر کمپلکس‌ها را در محیط‌های آبی نشان می‌دهد (۱۴).

می‌دهد که درصد کمپلکس‌شدن بالای ۵۰ درصد می‌تواند کارایی کمپلکس‌ها را در محلول تایید کند (۵). لیوسنا و چنی (۲۰۰۵ a) بیان کردند که کاربرد کی‌لیت‌هایی از ترکیبات آهن که پایداری خیلی بالایی داشته باشند، می‌توانند منجر به کاهش جذب آهن توسط گیاه مخصوصاً در محیط‌های کشت آبی گردند (۲۹). نتایج جدول ۱ نشان

جدول ۶- تجزیه واریانس کاربرد کی‌لیت‌های آلی آهن بر برخی پارامترهای رشد و مقدار آهن در اندام هوایی و ریشه ذرت (الف) و لوبیا (ب)
Table 6- Analysis of variance of application of Fe organic chelates on some growth indexes and Fe content in shoot and root of corn (A) and bean (B)

میانگین مربعات Mean square						
منابع تغییرات Source	درجه آزادی Bradford	وزن خشک اندام هوائی Shoot dry matter	وزن خشک ریشه Root dry matter	مقدار آهن در اندام هوائی Shoot Fe content	مقدار آهن در ریشه Root Fe content	فاکتور انتقال Translocation factor
تیمار Treatment	6	428.97***	30.91**	51916.89***	126104.74***	0.973***
خطا (Error)	14	18.5	4.01	285.62	9857.53	0.027
ضریب تغییرات (%) (CV)		8.06	15.22	6.86	9.63	8.21

میانگین مربعات Mean square						
منابع تغییرات Source	درجه آزادی (Bradford)	وزن خشک اندام هوائی Shoot dry matter	وزن خشک ریشه Root dry matter	مقدار آهن در اندام هوائی Shoot Fe content	مقدار آهن در ریشه Root Fe content	فاکتور انتقال Translocation factor
تیمار (Treatment)	6	38.83**	1.183**	57819.9***	91662.31***	0.748***
خطا (Error)	14	9.80	0.332	1188.85	91662.31***	0.008
ضریب تغییرات (%) (CV)		10.38	7.91	13.57	12.34	11.36

*** و ** به ترتیب معنی‌دار در سطح ۰/۱ و ۰/۵ درصد بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن
***0.1 significant and ** 0.5 significant correlations with Duncan's test

انجام می‌شود و همچنین فعالیت آنزیم‌های درگیر با آهن مثل FCR کاهش می‌یابد (۳۰). این نتایج می‌تواند دلیلی بر جایگزینی کی‌لیت‌های آلی آهن بجای کی‌لیت‌های سنتزی آن باشد. pH اولیه همه کی‌لیت‌ها بسیار کم و بین ۳/۲ تا ۴/۵ متغیر بودند.

ولی ترکیبات سنتزی مثل EDDHA تجزیه زیستی ضعیف‌تری نسبت به ترکیبات آلی داشته و ثابت پایداری بالاتری دارند. تحقیقات لیوسنا و چنی (۲۰۰۵ b) نشان دادند که هر چه ثابت پایداری کمپلکس‌های آهن بالاتر باشد، جذب آهن توسط گیاه با شدت کمتری

تعداد بیشتری از یون‌های فلزی پیوند برقرار می‌کنند (۱۸). از طرفی پس از شکسته شدن کیتوسان، وزن مولکولی آن کمتر شده و واکنش‌پذیری آن افزایش می‌یابد. همچنین هر چه اندازه مولکولی کیلیت‌ها کوچکتر باشد جذبشان راحت‌تر انجام می‌شود. گزارش شده است که به دلیل اندازه مولکولی بزرگ کیلیت‌های سنتزی مثل Fe-EDTA و Fe-EDDHA، جذب گیاهی این ترکیبات بسیار کمتر از کاتیون‌های فلزی آزاد است. نرم‌افزار Hyperchem نشان داد که قطر مولکولی کیلیت‌های آلی آهن خیلی کوچکتر از اندازه‌ی منافذ دیواره‌ی سلولی (کمتر از ۵ نانومتر) (۳۲) می‌باشد (جدول ۴). بنابراین منافذ موجود در دیواره‌ی سلولی مانعی برای جذب و حرکت کیلیت‌های آلی به فضای آزاد آپوپلاست نیست و بنابراین کیلیت‌های آلی آهن می‌توانند به راحتی از میان دیواره‌ی سلولی عبور کرده و وارد فضای آپوپلاست سلول‌های ریشه شوند. انتقال این کیلیت‌ها نیز از محلول غذایی به دیواره‌ی سلول‌های ریشه از طریق فرایندهای پخشیدگی و جریان توده‌ای اتفاق می‌افتد. تغییرات وزن خشک دو گیاه ذرت و لوبیا، در کاربرد کیلیت‌های مختلف متفاوت بود. تفاوت در پاسخ گیاهان به کیلیت‌های آلی می‌تواند به دلیل تفاوت‌های ژنتیکی، تفاوت در میزان نیاز هر گیاه به عنصر آهن و یا تفاوت در استراتژی‌های جذب آهن در هر گونه گیاهی باشد. قاسمی و همکاران (۲۰۱۲) در کاربرد کیلیت‌های اسیدهای آمینه و آهن روی دو واریته از گیاه گوجه فرنگی بیان کردند که در هر دو واریته کیلیت‌های گلايسين- آهن و هیستیدین-آهن منجر به افزایش رشد و عملکرد اندام هوایی و ریشه‌ی گیاهان شدند ولی کیلیت آرچنین-آهن فقط در یکی از واریته‌ها منجر به افزایش عملکرد شد. آنها بیان کردند که دلیل این امر احتمالاً تفاوت در تنوع ژنتیکی واریته‌های مختلف گوجه فرنگی می‌باشد و همچنین ممکن است یک واریته توانایی کمتری در جذب آهن به فرم کیلیت آرچنین-آهن داشته باشد (۱۵).

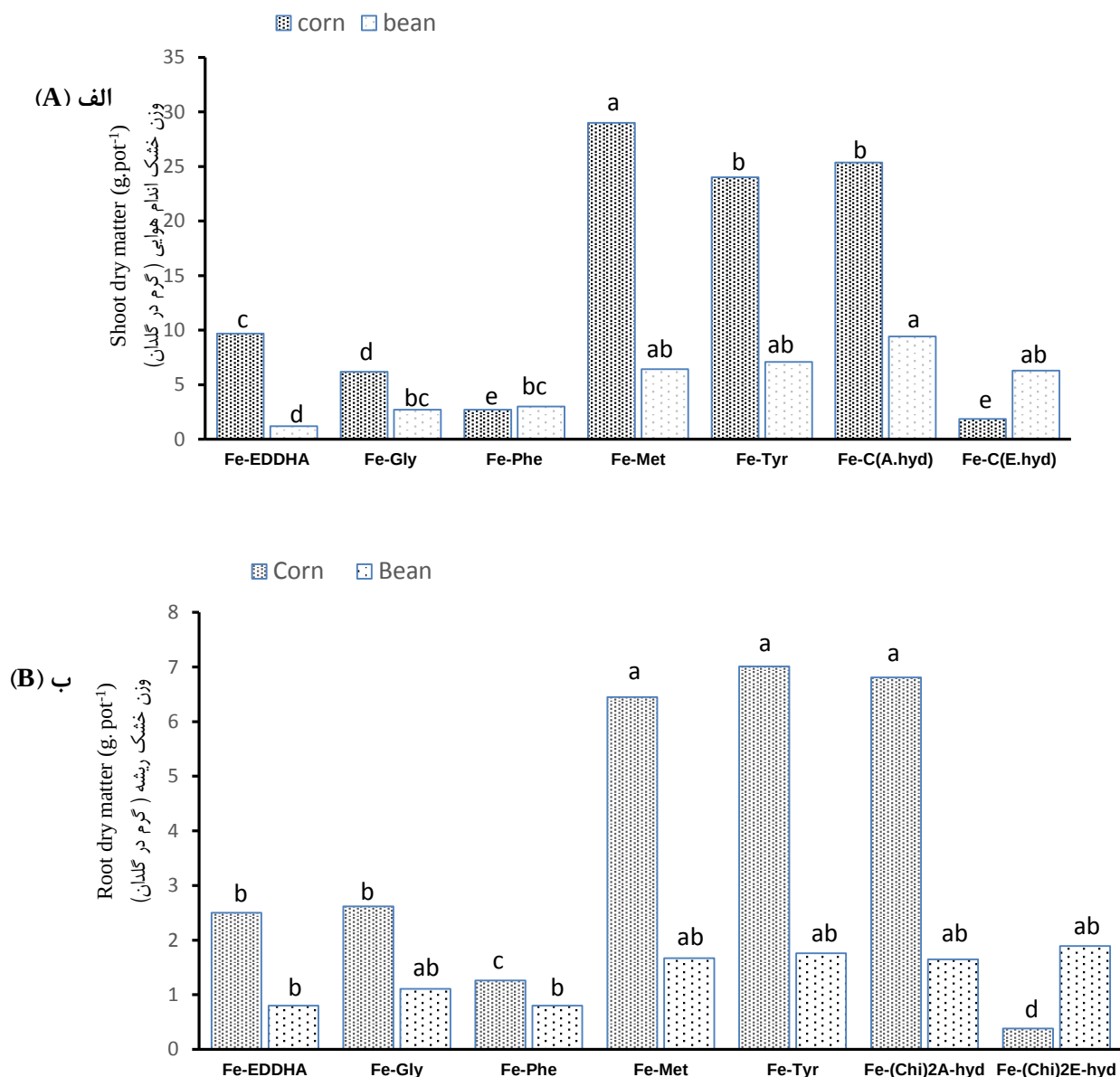
pH شروع رسوب در کیلیت‌های کیتوسان-آهن یا کیلیت‌های اسیدآمینه-آهن تفاوت زیادی نداشت. در کیلیت Fe-Tyr، pH شروع رسوب بیشترین بود، این امر نشان می‌دهد که تحمل به pH های بالا در این کیلیت بیشتر است ولی به طور کلی همه کیلیت‌های آلی آهن قادر به تحمل pH های بالا نبوده و رسوب می‌کنند. بعد از Fe-Tyr، [Fe-C(A.hyd)] در pH بالاتری نسبت به بقیه کیلیت‌ها شروع به رسوب کرد. نتایج نشان می‌دهند که کیلیت‌های سنتز شده‌ی آهن، شرایط اولیه را برای استفاده در امر تغذیه گیاه دارا هستند. هر چند مطالعات شیمیایی بیشتر مثل کریستالوگرافی و نمودارهای پایداری کیلیت‌ها می‌توانند اطلاعات دقیق‌تری را در اختیار قرار دهند.

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۶) نشان می‌دهد که کاربرد کیلیت‌های آلی آهن بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه در هر دو گیاه لوبیا و ذرت معنی‌دار بود.

استفاده از برخی کیلیت‌های آلی آهن در شرایط آبکشت به طور معنی‌داری وزن خشک اندام هوایی را در دو گیاه ذرت و لوبیا در مقایسه با کیلیت Fe-EDDHA (شاهد) افزایش داد (شکل ۱-الف). اثر کیلیت‌های مختلف آهن روی رشد گیاه به نوع گیاه و نوع کیلیت بستگی داشت.

در هر دو گیاه ذرت و لوبیا کاربرد کیلیت آلی کیتوسان در فرم هیدرولیز شده‌ی اسیدی، [Fe-C(A.hyd)]، به ترتیب منجر به ۲/۶ و ۴/۷ برابر افزایش در وزن خشک اندام هوایی نسبت به Fe-EDDHA شد. در بین کیلیت‌های اسیدهای آمینه-آهن، کاربرد Fe-Met و Fe-Tyr در گیاه ذرت منجر به افزایش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی نسبت به Fe-EDDHA گردید. در گیاه لوبیا کیلیت‌های اسیدهای آمینه-آهن نیز وزن خشک اندام هوایی را به طور معنی‌داری نسبت به Fe-EDDHA افزایش دادند ولی تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای اسیدهای آمینه-آهن مشاهده نشد. شکل ۱-ب تغییرات وزن خشک ریشه را در گیاه ذرت و لوبیا در مقایسه با Fe-EDDHA نشان می‌دهد. وزن خشک ریشه گیاهان نیز تحت تاثیر کاربرد کیلیت‌های مختلف آهن بود. کاربرد کیلیت‌های آلی [Fe-C(A.hyd)، Fe-Met و Fe-Tyr] در گیاه ذرت به طور معنی‌داری وزن خشک ریشه را نسبت به Fe-EDDHA افزایش دادند. در گیاه لوبیا تفاوت معنی‌داری بین کیلیت‌های آلی آهن و Fe-EDDHA در افزایش وزن خشک ریشه‌ها مشاهده نشد. ترکیبات آلی ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که آنها را برای کمک به افزایش عملکرد گیاهان ایده آل می‌کند. کیتوسان با داشتن گروه‌های عامل نیتروژنی و کربنی و همچنین خاصیت کیلیت‌کنندگی فلزات، یک ترکیب پایدار و موثر در تغذیه گیاهان می‌باشد (۴۳). فرم هیدرولیز شده‌ی کیتوسان سطوح واکنش‌پذیر بالاتری را ایجاد کرده و گروه‌های عامل آن با



شکل ۱- مقایسه میانگین وزن خشک اندام هوایی (الف) و ریشه (ب) دو گیاه ذرت و لوبیا در محلول‌های غذایی مختلف آهن (مقایسه میانگین‌ها برای دو گیاه به صورت جداگانه توسط آزمون دانکن و در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام شده است).

Figure 1- Comparison of means of shoot (A) and root (B) dry matter of corn and bean in different iron nutrient solution (mean comparison was down with Duncan test ($P < 0.05$) for each plant separately)

متیونین در خاک به دلیل افزایش میزان اکسین و اتیلن و همچنین تاثیر بر افزایش جمعیت میکروبی منجر به بهبود رشد و عملکرد گیاه می‌شود. همچنین اسیدهای آمینه منجر به سنتز mRNA، پروتئین‌ها و قندها در گیاه شده و کیفیت و عملکرد گیاه را افزایش می‌دهند (۳۶). مطالعات دیگر نیز نشان داده است که شدت جذب اسیدهای آمینه به گونه گیاهی و ویژگی‌های اسیدهای آمینه بستگی دارد. در ساختار

تاثیر اسیدهای آمینه روی افزایش رشد و عملکرد گیاه نیز به دلیل داشتن نیتروژن فراوان در ساختار مولکولی آن‌ها است. گزارش شده است که برخی از اسیدهای آمینه در ریزوسفر ریشه نیز فراوان هستند (۲۰) و نقش مهمی را تغذیه انسان و گیاهان دارند. مطالعات نشان داده است که پایداری کمپلکس‌های اسیدهای آمینه در آب نیز بالا می‌باشد. محمد و فرانکن برگر (۱۹۹۰) دریافتند که کاربرد تریپتوفان و

راحتی نمی‌توان تشخیص داد که افزایش رشد گیاه به دلیل جذب آهن بوده است یا فراهمی بیشتر نیتروژن به فرم اسیدهای آمینه و یا حتی به دلیل تاثیر هورمونی اسیدهای آمینه. مطالعات نشان داده است که با افزایش غلظت نیتروژن در محیط رشد گیاه غلظت آهن در اندام‌های هوایی گیاه نیز افزایش می‌یابد (۱). افزایش در مقدار آهن در اندام‌های هوایی گیاهان با افزایش مقدار نیتروژن توسط کوتمن و همکاران (۲۰۱۰) نیز در گیاه گندم گزارش شده است (۲۷). دلیل این امر می‌تواند افزایش رشد به دلیل تاثیر نیتروژن باشد. تغذیه نیتروژنی همچنین می‌تواند تاثیرات مثبتی روی تجمع آهن در گیاهان داشته باشد. در این مطالعه مشاهده شد که میانگین افزایش نسبی در مقدار آهن در اندام‌های هوایی ذرت در کاربرد کی‌لیت‌های آلی نسبت به شاهد بین ۵/۲ تا ۳ برابر در کاربرد کی‌لیت‌های کیتوسان تا اسیدهای آمینه بود، در حالی که میانگین افزایش در وزن خشک اندام هوایی در کاربرد همین کی‌لیت‌ها نسبت به شاهد بین ۲/۳ تا ۲/۷ برابر مشاهده شد. ولی در گیاه لوبیا میانگین افزایش در مقدار آهن بین ۲/۶ تا ۱/۷ ولی میانگین افزایش در وزن خشک اندام هوایی بین ۴/۷ تا ۳ برابر مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که در گیاه ذرت افزایش در رشد دلیل اصلی افزایش مقدار آهن در اندام‌های گیاهان نیست و مکانیسم‌های دیگری در جذب توسط ریشه و انتقال از ریشه به اندام‌های هوایی درگیر هستند. مطالعات نشان داده است که مکانیسم‌هایی مثل تنظیم تعادل بار در گیاهان وجود دارد که فراهمی نیتروژن منجر به جذب بیشتر آهن و دیگر فلزات از ریشه گیاهان می‌شود. کوتمن و همکاران (۲۰۱۰) بیان کردند که تحریک ریشه‌ها با نیتروژن منجر به افزایش و فعالیت ناقلین پروتئینی و ترکیبات نیتروژنی مثل نیکوتین آمیدها نیز می‌شود که به جذب و انتقال بیشتر عناصر از ریشه‌ها کمک می‌کند. همچنین تغذیه نیتروژنی مناسب، فعالیت و فراوانی ناقلین پروتئینی آهن مثل yellow stripe 1 (YS1) در غشاء سلول‌های ریشه را افزایش می‌دهد (۳۸). در گیاه لوبیا افزایش وزن خشک اندام هوایی متناسب با افزایش مقدار آهن در گیاه بود. دلیل تفاوت موجود در دو گیاه ممکن است به استراتژی‌های متفاوت جذب آهن در دو گیاه نیز مربوط باشد.

شکل ۳ مقدار آهن را در ریشه‌های دو گیاه ذرت و لوبیا نشان می‌دهد. در گیاه ذرت مقدار آهن در ریشه در کاربرد همه کی‌لیت‌های آلی آهن بیشتر از شاهد بود. بیشترین تجمع آهن در ریشه‌های در معرض Fe-Tyr و [Fe-C(E.hyd)] مشاهده شد که نسبت به Fe-EDDHA به ترتیب ۷/۲ و ۵/۵ برابر بیشتر بود. در گیاه لوبیا بیشترین مقدار آهن در ریشه‌ها با کاربرد کی‌لیت Fe-Met مشاهده شد که ۱/۷ برابر نسبت به کی‌لیت Fe-EDDHA بالاتر بود. در اینجا نیز تفاوت بین تیمارها را می‌توان به مدیریت تغذیه نیتروژن روی تعداد و فعالیت پروتئین‌های ناقل آهن در دیواره سلولی ریشه نسبت داد که منجر به افزایش جذب و انتقال آهن به

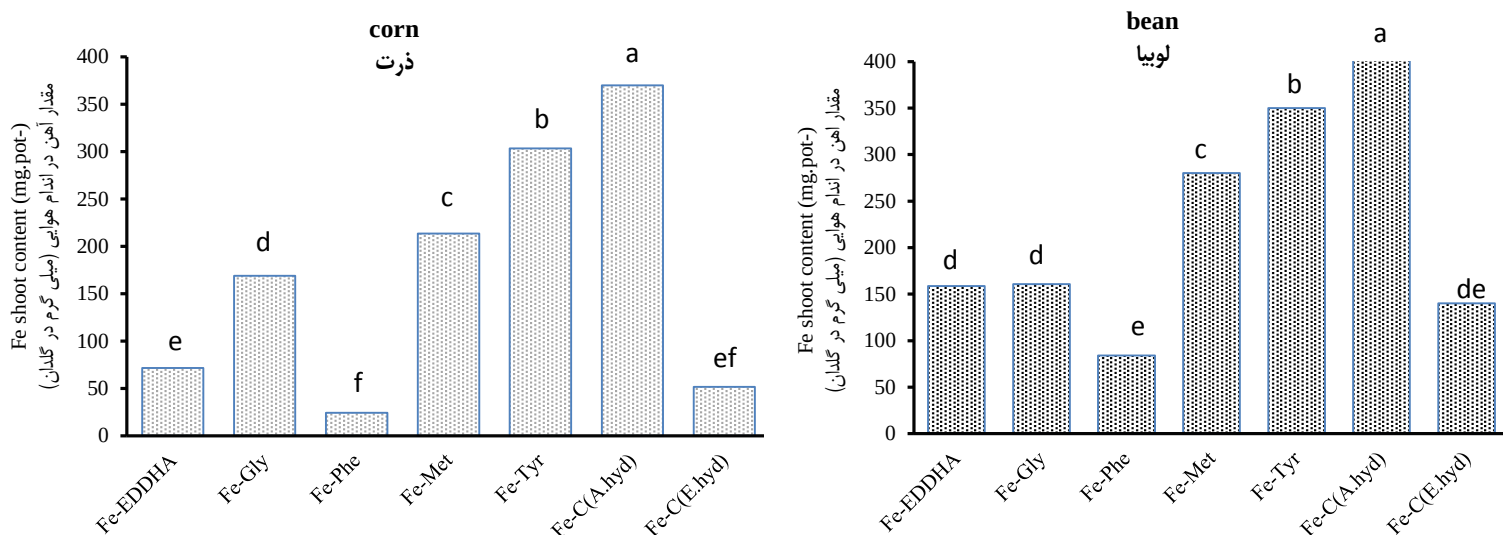
ترکیبات آلی گروه‌های آمین، کربوکسیل و فنولیک به طور قوی با فلز آهن باند می‌شوند و گروه‌های کربوکسیل و سولفونیک حلالیت بالایی را به ترکیبات می‌دهند در حالیکه H و متیل ویژگی‌های واکنش پذیری با گروه‌های قطبی را به آنها می‌دهند. هر یک از این ویژگی‌های خاص در توانایی آن اسید آمینه به عنوان یک کی‌لیت کننده تاثیر گذار است. افزایش رشد و عملکرد گیاه ذرت و لوبیا در کاربرد دو اسید آمینه متیونین و تیروزین نشان می‌دهد که پایداری این کی‌لیت‌ها در محلول‌های غذایی بیشتر است و همچنین این کی‌لیت‌ها می‌توانند با کارایی بهتری آهن را در محلول غذایی نگه‌داری کرده و در اختیار ریشه گیاه قرار دهند. اسید آمینه تیروزین به دلیل داشتن گروه‌های فنولیک قادر است با پایداری بالایی با فلز آهن تشکیل کمپلکس دهد و داشتن H در سطح کی‌لیت منجر به انسجام ساختار کمپلکس می‌شود و با توجه به اندازه مولکولی کوچک اسیدهای آمینه نسبت به روزنه‌های غشاء سلول‌های ریشه، این کی‌لیت‌ها به راحتی توسط گیاه جذب می‌شوند. همچنین pH شروع رسوب در کی‌لیت Fe-Tyr در محدوده‌ی pH محلول‌های غذایی است و این امر به پایدار ماندن کی‌لیت در محلول‌های غذایی و فرصت برای جذب بیشتر آن توسط گیاه کمک می‌کند. غیر قطبی بودن ترکیبات نیز یکی از عواملی است که به جذب راحت‌تر آنها از روزنه‌های ریشه کمک می‌کند، اسید آمینه متیونین به دلیل غیر قطبی بودن به راحتی از معابر سلول‌های ریشه با فرایند انتشار جذب می‌شود (۴) و از طرفی با داشتن دو گروه کربوکسیل و یک گروه آمین قابلیت پیوند با چندین اتم آهن را داشته و همزمان می‌تواند به ورود چندین اتم آهن به طور همزمان از غشاء سلول‌های ریشه کمک کند.

جذب و انتقال کی‌لیت‌های آهن

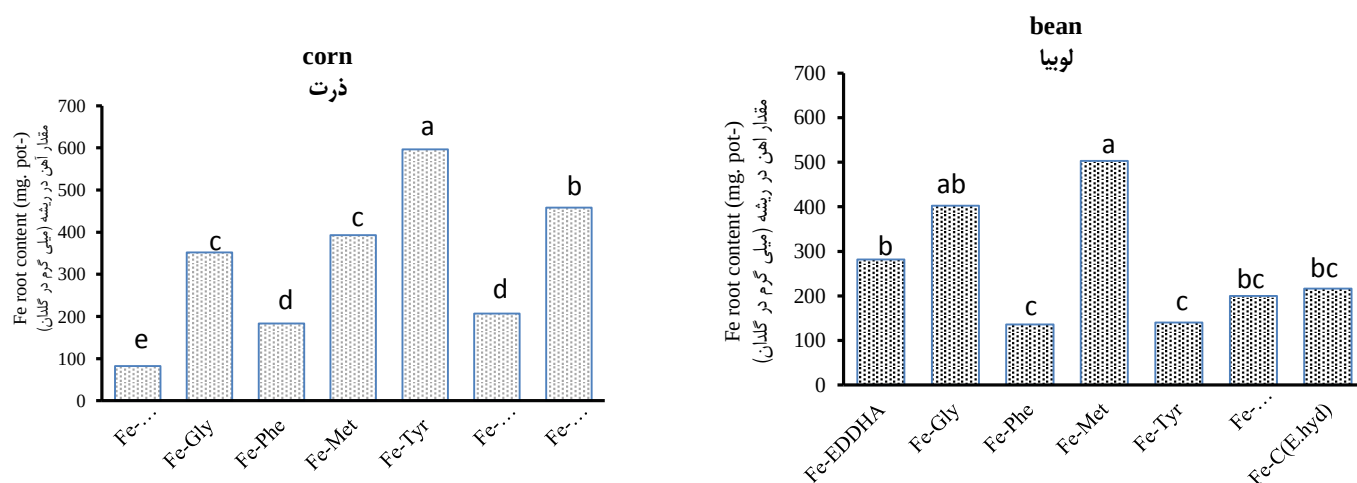
نتایج حاصل از آزمایش نشان داد که کاربرد کی‌لیت‌های اسیدهای آمینه و کیتوسان در محلول‌های آبی می‌تواند منجر به افزایش غلظت آهن در اندام‌های گیاهان مورد آزمایش شود (شکل ۲). در هر دو گیاه ذرت و لوبیا کی‌لیت‌های [Fe-C(A.hyd)]، Fe-Tyr و Fe-Met به ترتیب منجر به افزایش معنی‌دار در مقدار آهن گیاهان نسبت به Fe-EDDHA شدند. در گیاه ذرت کاربرد [Fe-C(A.hyd)]، Fe-Tyr، Fe-Met و Fe-Gly به ترتیب ۳۰۰، ۲۴۰، ۱۴۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در گلدان، مقدار آهن اندام هوایی را نسبت به Fe-EDDHA افزایش دادند. در گیاه لوبیا این افزایش در کاربرد کی‌لیت‌های آلی [Fe-C(A.hyd)]، Fe-Tyr و Fe-Met به ترتیب ۲۶۰، ۲۰۰ و ۱۲۰ میلی‌گرم در گلدان در مقایسه با شاهد بود. در حقیقت بیشترین مقدار آهن در اندام هوایی، در نمونه‌هایی مشاهده شد که بالاترین عملکرد را نیز در کاربرد کی‌لیت‌های آلی نشان دادند. می‌توان نتیجه گرفت که در گیاهانی با عملکرد بیشتر، جذب آهن نیز بیشتر اتفاق افتاده است. از طرفی در میان اسیدهای آمینه‌ی به کار رفته در مطالعه حاضر به

نتایج نشان می‌دهند که با وجود اینکه کاربرد کی‌لیت‌هایی مثل Fe-Gly در گیاه ذرت و Fe-C(E.hyd) در گیاه منجر به تجمع آهن در ریشه‌ها شد ولی مقدار آهن در اندام هوایی در گیاهانی که در معرض این کی‌لیت بوده اند، زیاد نبود. دلیل این امر می‌تواند عدم انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی در کاربرد برخی کی‌لیت‌های آلی آهن باشد.

بافت‌های گیاهی می‌شود. تفاوت در جذب کی‌لیت‌های آهن توسط ریشه‌ها رابطه مستقیم با نوع ناقلین پروتئینی در غشاء سلول‌های ریشه دارد. مطالعات نشان داده است که گرچه گیاهان، نیتروژن را به فرم‌های آمونیومی و نیتراتی جذب می‌کنند ولی شواهدی وجود دارد که اسیدهای آمینه می‌توانند به طور مستقیم توسط گیاهان جذب شوند (۳۷).



شکل ۲- مقایسه میانگین مقدار آهن در اندام هوایی لوبیا و ذرت در محلول‌های غذایی مختلف آهن ($P<0.05$)
Figure 2- Comparison of means of Fe content in bean and corn shoot in different iron nutrient solution



شکل ۳- مقایسه میانگین مقدار آهن در ریشه‌ی لوبیا و ذرت در محلول‌های غذایی مختلف آهن ($P<0.05$)
Figure 3- Comparison of means of Fe content in bean and corn root in different iron nutrient solution

وسيله‌ی ترکیبات اسیدی بسیار مقرون به صرفه‌تر از ترکیبات آنزیمی می‌باشد. در گیاهان دارای استراتژی II ممکن است فیتوسایدروفورها بتوانند با Fe-Phe و Fe-C(E.hyd) رقابت کنند اما Fe-C(A.hyd) کارایی خوبی را در انتقال آهن به اندام‌های هوایی گیاهان نشان داد. نکته مهم دیگر در انتقال کی‌لیت‌های آلی در گیاهان این است که اسیدهای آمینه می‌توانند از طریق هر دو آوند چوبی و آبکش به اندام‌های هوایی انتقال یابند این انتقال اسیدهای آمینه در آوندهای چوبی و آبکش به چرخه نیتروژن بین ریشه و اندام‌های هوایی کمک و انتقال مجدد عناصر غذایی مخصوصا عناصر غیر متحرک مثل آهن و روی را در گیاهان تسهیل می‌کند (۱۲). در مورد فرایند انتقال کیتوسان و مشتقات آن هنوز تحقیقی انجام نشده است و شناخت این موضوع نیازمند روش‌های رادیو ایزوتوپی است.

به طور کلی می‌توان گفت که گیاهان به دنبال جذب کی‌لیت‌هایی هستند که کمترین مصرف انرژی را برای آن‌ها داشته باشد، کی‌لیت‌هایی که ساختاری ساده‌تر دارند مورد انتخاب گیاهان هستند. در تحقیقی روی جذب آهن توسط سردان و همکاران گزارش شد که جذب آهن از کی‌لیت‌های Fe-EDDHA در دو فرم مزو با پایداری کمتر و راسمیک با پایداری بیشتر اتفاق افتاد و گیاهان دارای استراتژی I بیشتر از استراتژی II آهن را جذب کردند و جذب کی‌لیت‌ها در فرم مزو بیشتر از راسمیک‌ها بود (۹).

تغییرات فعالیت آنزیم FCR برگ در طول زمان کشت

بر اساس نتایج بدست آمده از چندین مطالعه (۴۷ و ۵۴) مشخص شده‌است که شاخص‌های بیوشیمیایی مثل فعالیت آنزیم‌هایی که در متابولیسم‌های مربوط به جذب و انتقال آهن در گیاهان درگیر هستند، می‌توانند وضعیت تغذیه‌ای آهن را بهتر از اندازه‌گیری غلظت آهن در اندام‌های هوایی نشان دهند. اثر کی‌لیت‌های آلی اسیدهای آمینه و کیتوسان روی فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ در دو گیاه ذرت و لوبیا در شکل ۵ نشان داده شده است.

میانگین کلی فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ در گیاه دارای استراتژی I (لوبیا) بیشتر از استراتژی II (ذرت) بود ولی شدت تغییرات فعالیت‌های آنزیمی در گیاه ذرت بیشتر بود. به طوری که از روزهای ۱۵ ام تا ۴۵ ام دوره‌ی رشد گیاه افزایش معنی‌داری در فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در گیاه ذرت مشاهده شد. در هر دو گیاه، کاربرد Fe-C(A.hyd) و Fe-Tyr فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز را در برگ گیاه نسبت به Fe-EDDHA افزایش داد. اثر Fe-Met روی فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ در گیاه ذرت مثبت بود و مقدار آن تا روز ۴۵ ام افزایش یافت اما در گیاه لوبیا فعالیت این آنزیم با گذشت زمان تغییر نکرد. افزایش کی‌لیت‌های Fe-Phe، Fe-Met و Fe-Gly روی فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در گیاه لوبیا تاثیری

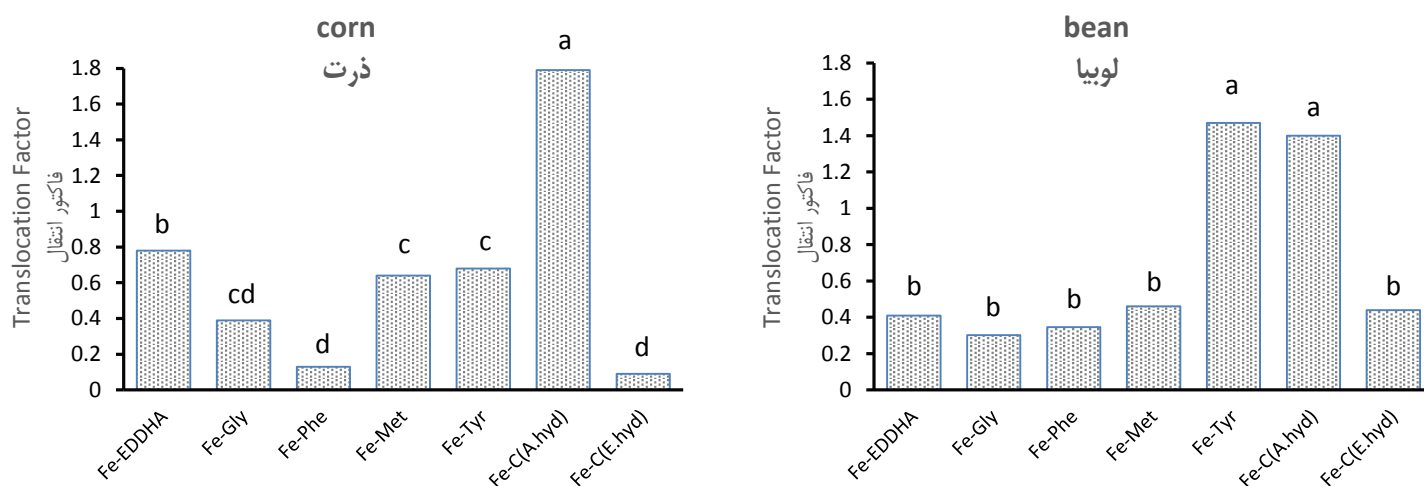
عناصری مثل آهن در آوندهای چوبی به شکل کمپلکس حرکت می‌کنند، در واقع آنها به فرم‌های محلول هستند که با پروتئین‌های کوچک پیوند برقرار کرده‌اند. تحقیقات نشان داده است که از ترکیباتی که در انتقال عنصر آهن در آوندهای چوبی نقش دارند، اسیدهای آمینه هستند. اینکه کمپلکس‌های آلی آهن در این تحقیق مستقیما جذب گیاه شده‌اند و به اندام هوایی انتقال یافته‌اند و یا اینکه عنصر آهن جدا شده و به همراه ترکیبات آلی دیگر به بخش‌های مختلف گیاه انتقال پیدا کرده‌است، نیاز به مطالعات ردیابی دارد. زانگ و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که اضافه کردن ترکیبات آلی مثل اسیدهای آمینه به محلول‌های غذایی جذب و انتقال عنصر آهن را از ریشه به اندام هوایی افزایش داد (۵۵). به منظور بررسی این عامل فاکتور انتقال آهن از ریشه به اندام هوایی در دو گیاه ذرت و لوبیا تعیین شد (شکل ۴). بیش از ۵۰ درصد آهن در کمپلکس با Fe-Tyr در گیاه لوبیا و در کمپلکس با Fe-Chi(A.hyd) در ذرت و لوبیا از ریشه به اندام‌های هوایی انتقال پیدا کردند. نتایج نشان دادند که در کاربرد Fe-Chi(A.hyd) و Fe-Tyr در محلول‌های غذایی، پایداری این ترکیبات تا ۹۰ درصد حفظ شد. پایداری بالا و اندازه مولکولی کوچک این ترکیبات (کوچکتر از ۵ نانومتر) می‌تواند در انتقال آسان آنها در آوندهای چوبی نقش داشته باشد (۳۳). اکاموتو و همکاران (۲۰۰۴) گزارش کردند که شدت جذب اسیدهای آمینه به نوع اسیدهای آمینه و گونه‌ی گیاهی بستگی دارد (۴۰). تفاوت‌های مشاهده شده در گیاهان استراتژی I و استراتژی II به دلیل مکانیسم‌های متفاوت جذب آهن برای هر گونه‌ی گیاهی می‌باشد. مکانیسم جبرانی برای کمبود آهن در گیاهان استراتژی I برای اساس کاهش Fe^{+3} و رهایی H^{+} است که منجر به کارایی بهتر در جذب آهن در گیاهان دارای استراتژی I در محیط‌های آبی می‌شود. آزاد شدن H^{+} منجر به برقراری تعادل در pH محلول شده و حلالیت کی‌لیت‌های آلی مخصوصا کیتوسان را افزایش می‌دهد. رامیرز و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که کیتوسان و مشتقات آن در محیط‌هایی با pH های اسیدی ضعیف تا خنثی بیشترین حلالیت را دارند و می‌توان گفت که استفاده از ترکیبات کیتوسان در گیاهان دارای استراتژی I کارایی بهتری خواهد داشت، به عبارتی گیاهان دارای استراتژی I انرژی کمتری را در جذب آهن برای کی‌لیت‌های کیتوسان نسبت به اسیدهای آمینه مصرف خواهند کرد (۴۴). در مقایسه بین دو گونه‌ی هیدرولیز شده کیتوسان نیز مشاهده می‌شود که آهن در کی‌لیت با کیتوسان هیدرولیز شده‌ی آنزیمی توسط ریشه گیاهان جذب شده است ولی انتقال آن به اندام هوایی با کارایی بالا اتفاق نیفتاده است. هیدرولیز ترکیبات منجر به شکسته شدن پیوندها و تولید ساختارهای ساده‌تر می‌شود. ولی نتایج نشان می‌دهد که هیدرولیز اسیدی کیتوسان نسبت به هیدرولیز آنزیمی آن کارایی بالاتری در جذب توسط گیاهان دارد و از طرفی خرد کردن پیوندها به

فریک کیلیت رداکتاز به طور چشم‌گیری کاهش یافت (۱۲). نتایج این تحقیق نیز نشان داد که در بین کی‌لیت‌های آلی مختلف به کار رفته در محیط رشد محلول گیاه، فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در کاربرد کی‌لیت‌هایی که فراهمی آهن را برای گیاه افزایش دادند، بیشترین مقدار بود. بنابراین فعالیت این آنزیم می‌تواند به عنوان یک شاخص برای بررسی وضعیت آهن در سلول‌های برگ در گیاهان استراتژی I و استراتژی II استفاده شود.

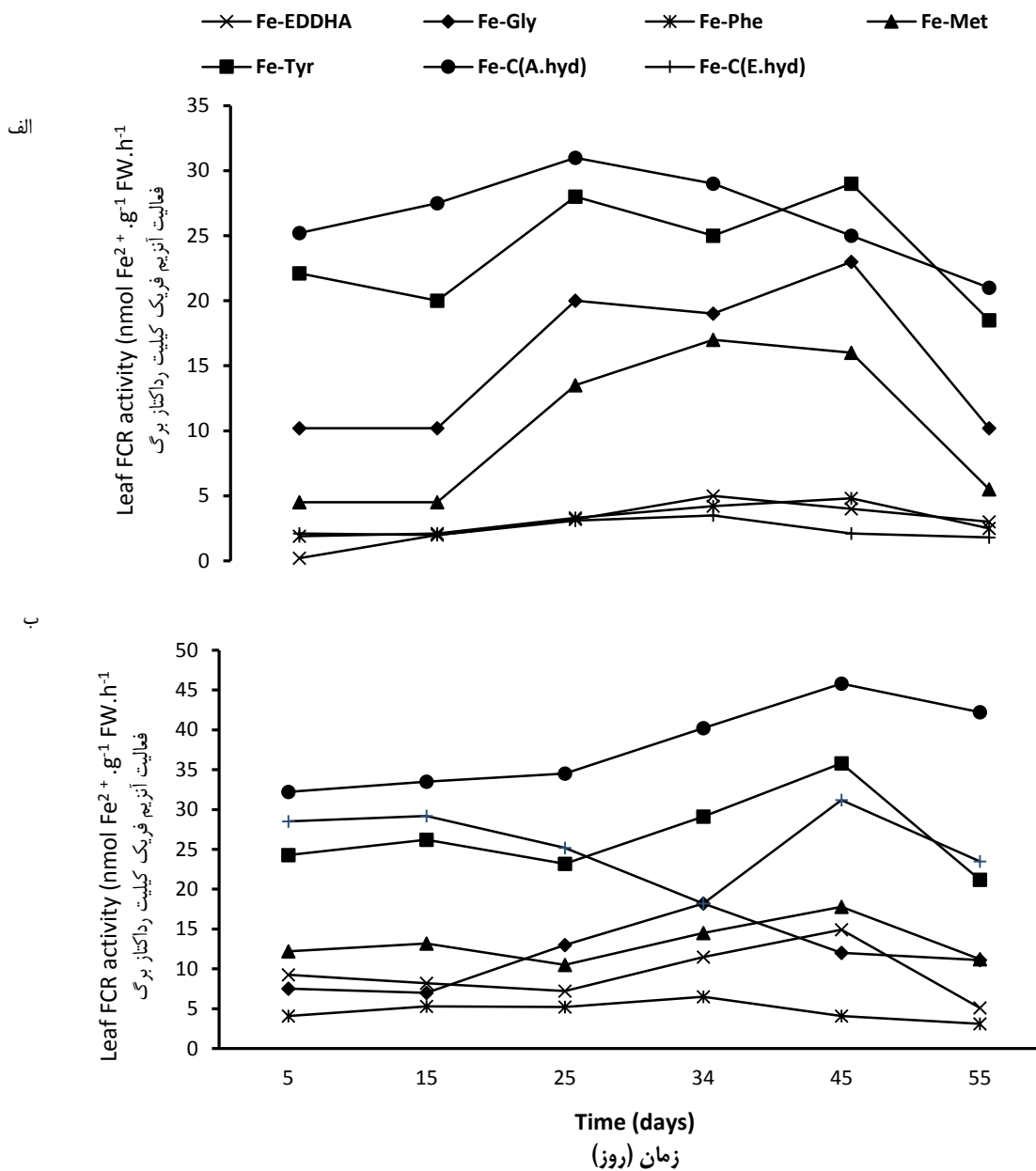
نتیجه‌گیری

کی‌لیت‌های آلی آهن در محلول غذایی سنتز شدند و ویژگی‌های ساختاری و شیمیایی آنها با روش‌های آزمایشگاهی تعیین شد. تشکیل کمپلکس بین عنصر آهن و لیگاند‌های آلی تایید شد و همه کی‌لیت‌های آلی آهن پایداری بالایی را در محلول غذایی در یک دوره زمانی مشخص نشان دادند. نتایج همچنین نشان دادند که استفاده از کی‌لیت‌های آلی آهن می‌تواند مقدار کافی از عنصر آهن را در مقایسه با Fe-EDDHA برای جذب گیاه فراهم کند و رشد ریشه و اندام هوایی گیاهان لوبیا (استراتژی I) و ذرت (استراتژی II) را بهبود ببخشد. کی‌لیت‌های Fe-C(A.hyd)، Fe-Tyr، Fe-Met و Fe-EDDHA در هر دو گیاه ذرت و لوبیا منجر به افزایش معنی‌داری در وزن خشک اندام هوایی نسبت به Fe-EDDHA شدند. در بین کی‌لیت‌های آلی آهن، کاربرد کی‌لیت‌های Fe-C(A.hyd) > Fe-Tyr > Fe-Met به ترتیب در هر دو گیاه ذرت و لوبیا منجر به بیشترین افزایش در مقدار آهن در اندام هوایی شدند.

نداشتند. کاهش در فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز از روز ۴۵ ام در همه تیمارها مشاهده شد. بررسی نتایج نشان داد که فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز برگ به غلظت آهن در گیاهان بستگی دارد و در گیاهانی که جذب آهن در آنها کمتر اتفاق افتاد فعالیت این آنزیم نیز کاهش یافت. می‌توان گفت که حضور آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در برگ‌های لوبیا و ذرت ممکن است یک نیاز برای کاهش Fe^{+3} به Fe^{+2} باشد قبل از اینکه شکل کاهش یافته آهن بتواند از پلاسما در سلول‌های برگ عبور نماید. نتایج بدست آمده توسط رومبولا نیز مشابه با نتایج این تحقیق بود (۴۶). گزارشات این محقق در گیاه کیوی و گیاه آفتابگردان نشان داد که فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در گیاهان دچار کمبود آهن نسبت به گیاهانی که مقدار کافی آهن دریافت کرده‌اند، کمتر بود. محققین دیگری نیز بیان کردند که برای تحریک فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در سلول‌های برگ، عنصر آهن مورد نیاز است. دو دلیل برای تایید این نتایج ذکر شده است، اول اینکه آهن به عنوان یک ترکیب در آنزیم‌های کاهنده مورد نیاز است، زیرا فریک کیلیت رداکتاز یک فلاووسیتوکروم می‌باشد و دوم اینکه وقتی فراهمی آهن برای رشد گیاهان ناکافی باشد آهن خودش به عنوان یک پیام برای فعال‌سازی مکانیسم‌های کاهشی آهن عمل می‌کند. در تحقیق دیگری، محققین نشان دادند که فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در گیاهانی که مقدار آهن در آنها در حد کفایت بود، بیشتر بود. آنها این بررسی را با اندازه‌گیری میزان کلروفیل در برگ‌های گیاهان بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مقدار کلروفیل با مقدار Fe^{+2} قابل دسترس در گیاهان رابطه مستقیم دارد و در گیاهانی که دچار کلروز ناشی از کمبود آهن شدند فعالیت آنزیم



شکل ۴- فاکتور انتقال (TF) در گیاه لوبیا (St.I) و ذرت (St.II) در محلول‌های غذایی مختلف آهن ($P < 0.05$)
Figure 4- Translocation Factor in bean (St.II) and corn (St.I) in different iron nutrient solution



شکل ۵- اثر کی‌لیت‌های آهن در محلول غذایی روی فعالیت آنزیم کیلیت رداکتاز (FCR) در ذرت (الف) و لوبیا (ب) با گذشت زمان
Figure 5- Effect of Fe chelates in nutrient solution on activity of ferric chelate reductase (FCR) in corn (A) and bean (B) by time

این کی‌لیت‌ها در رفع مشکلات تغذیه‌ای کمبود آهن در خاک‌ها نیاز به تحقیقات بیشتری می‌باشد.

میانگین فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز (FCR) برگ در گیاهان دارای استراتژی I (لوبیا) بیشتر از گیاه استراتژی II (ذرت) بود. نتایج نشان دادند که گیاهانی که دارای آهن برگ‌های بیشتری بودند، فعالیت آنزیم فریک کیلیت رداکتاز در برگ‌ها بیشتر بود. بر طبق نتایج بدست آمده کی‌لیت‌های آلی کیتوسان و اسیدهای آمینه با آهن می‌توانند به عنوان یک جایگزین برای کی‌لیت‌های سنتزی آهن در تغذیه گیاهان در محیط آبکشت استفاده شوند. برای بررسی توانایی

منابع

1. Aciksoz S.B., Atila Y., and Levent O. 2011. "Biofortification of wheat with iron through soil and foliar application of nitrogen and iron fertilizers. *Journal Plant and Soil* 349(1-2): 215-225.
2. Águila-Almanza E., René S., Zully V.G., Edgar G.H., and Heriberto H.C. 2019. Enzymatic Depolymerization of Chitosan for the Preparation of Functional Membranes. 2019. *Journal of Chemistry*.
3. Albano Joseph P., and William B Miller. 2001. Photodegradation of FeDTPA in nutrient solutions. I. Effects of irradiance, wavelength, and temperature. *HortScience* 36 (2): 313-316.
4. Álvarez-Fernández A., García-Laviña P., Fidalgo C., Abadía J., and Abadía A. 2004. Foliar fertilization to control iron chlorosis in pear (*Pyrus communis* L.) trees. *Journal Plant and Soil* 263(1): 5-15.
5. Belokon Yuri N., Vladimir I Bakhmutov., Nina I Chernoglazova., Konstantin A Kochetkov., Sergei V Vitt., Natalia S Garbalinskaya., and Vasili M %J Belikov, Perkin. 1988. General method for the asymmetric synthesis of α -amino acids via alkylation of the chiral nickel (II) Schiff base complexes of glycine and alanine. *Journal of the Chemical Society* (2): 305-312.
6. Bradford Marion M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Journal Analytical Biochemistry* 72(1-2): 248-254.
7. Brüggemann W., Klaudia M.K., and Petra R. 1993. Iron uptake by leaf mesophyll cells: the role of the plasma membrane-bound ferric-chelate reductase. *Journal Planta Moog* 190(2): 151-155.
8. Caiqin Q., Xiao L., Du Y., Shi X., and Chen J. 2002. A new cross-linked quaternized-chitosan resin as the support of borohydride reducing agent. *Reactive and Functional Polymers* 50(2):165-171.
9. Cerdán M., Antonio Sánchez-Sánchez, Margarita J., Juan J Sánchez-Andreu, Juana D Jordá., and Dolores B. 2007. Partial replacement of Fe (o ,o-EDDHA) by humic substances for Fe nutrition and fruit quality of citrus. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170(4): 474-478.
10. Chaney Rufus L., John C Brown., and Lee O Tiffin. 1972. Obligatory reduction of ferric chelates in iron uptake by soybeans. *Plant Physiology* 50(2): 208-213.
11. Chapman Homer D., and FP Pratt. 1961. Methods of analysis for soils, plants and waters, Univ. of California Div." *Journal Agrculture Science* 168-169.
12. Chen L., Adriana O.L., Alan J., and Daniel R Bush. 2001. ANT1, an aromatic and neutral amino acid transporter in Arabidopsis. *Plant Physiology* 125(4): 1813-1820.
13. El Bassiouny HMS., and HA Mostafa. 2008. "Physiological responses of wheat plant to foliar treatments with arginine or putrescine".
14. Garcia-Brugger A., Olivier L., Elodie V., Stéphane B., Lecourieux D., Poinssot B., Wendehenne D., and Alain P. 2006. Early signaling events induced by elicitors of plant defenses. *Molecular Plant-Microbe Interactions* 19(7): 711-724.
15. Ghasemi S., Khoshgoftarmanesh A.H., Hadadzadeh H., and Afyuni M. 2013. Synthesis, characterization, and theoretical and experimental investigations of zinc (II)-amino acid complexes as ecofriendly plant growth promoters and highly bioavailable sources of zinc. *Journal of Plant Growth Regulation* 32(2): 315-323.
16. Ghasemi S., Khoshgoftarmanesh A.H., Hadadzadeh H., and Jafari M. 2012. Synthesis of iron-amino acid chelates and evaluation of their efficacy as iron source and growth stimulator for tomato in nutrient solution culture. *Journal of Plant Growth Regulation* 31(4): 498-508.
17. Hangarter Roger P., and Triant C Stasinopoulos. 1991. "Effect of Fe-catalyzed photooxidation of EDTA on root growth in plant culture media. *Plant Physiology* 96(3): 843-847.
18. Hoell Ingunn A., Gustav V.K., and Vincent GH Eijnsink. 2010. Structure and function of enzymes acting on chitin and chitosan. *Biotechnology and Genetic Engineering Reviews* 27(1): 331-366.
19. Hsu Hsin-Hung. 1986. Chelates in Plant Nutritio.
20. Jones D.L., Hodge A., and Kuzyakov Y. 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist* 163(3): 459-480.
21. Jones DL., and Hodge A. 1999. Biodegradation kinetics and sorption reactions of three differently charged amino acids in soil and their effects on plant organic nitrogen availability. *Soil Biology and Biochemistry* 31(9): 1331-1342.
22. Kang Seong I., and You Han Bae. 2003. A sulfonamide based glucose-responsive hydrogel with covalently immobilized glucose oxidase and catalase. *Journal of Controlled Release* 86(1): 115-121.
23. Kobayashi T., and Naoko K Nishizawa. 2012. "Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Biology* 63: 131-152.

24. Kosegarten H., Hoffmann B., and Mengel K. 2001. The paramount influence of nitrate in increasing apoplastic pH of young sunflower leaves to induce Fe deficiency chlorosis, and the re-greening effect brought about by acidic foliar sprays. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164(2): 155-163.
25. Kulikov S.N., Svetlana A Lisovskaya., Pavel V Zelenikhin., Evgeniya A Bezrodnykh., Diana R Shakirova., Inesa V Blagodatskikh., and Vladimir E Tikhonov. 2014. Antifungal activity of oligochitosans (short chain chitosans) against some *Candida* species and clinical isolates of *Candida albicans*: Molecular weight-activity relationship. *European Journal of Medicinal Chemistry* 74: 169-178.
26. Kulikov S., Tikhonov V., Blagodatskikh I., Bezrodnykh E., Lopatin S., Khairullin R., Philippova Y., and Sergey Abramchuk. 2012. Molecular weight and pH aspects of the efficacy of oligochitosan against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *Carbohydrate Polymers* 87(1): 545-550.
27. Kutman U Baris., Yildiz B., Ozturk L., and Cakmak. 2010. Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen. *Ismail Journal Cereal Chemistry* 87(1): 1-9.
28. López M., Flor A., Michael A Grusak., Anunciación A., and Javier A. 2013. Iron deficiency in plants: an insight from proteomic approaches. *Frontiers in Plant Science* 4:254.
29. Lucena Juan J. 2006. Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. In *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms*. 103-128. Springer.
30. Lucena Juan J., Agustín G., and Villén M. 2010. Stability in solution and reactivity with soils and soil components of iron and zinc complexes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173(6): 900-906.
31. Manthey JA., DL McCoy., and DE Crowley. 1994. Stimulation of rhizosphere iron reduction and uptake in response to iron deficiency in citrus rootstocks. *Plant Physiology and Biochemistry*.
32. Marschner H. 1995. Function of mineral nutrients: micronutrients. *Mineral nutrition of higher plants*.
33. Marschner H. 2011. *Marschner's mineral nutrition of higher plants*: Academic press.
34. Metsärinne S., Rantanen P., Aksela R., and Tuhkanen T. 2004. Biological and photochemical degradation rates of diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA) in the presence and absence of Fe (III). *Chemosphere* 55(3): 379-388.
35. Mikami Y., Saito A., Miwa E., Higuchi K. 2011. Allocation of Fe and ferric chelate reductase activities in mesophyll cells of barley and sorghum under Fe-deficient conditions. *Plant Physiology and Biochemistry* 49(5): 513-519.
36. Muhammad A., WT Frankenberger Jr. 1990. Response of *Zea mays* and *Lycopersicon esculentum* to the ethylene precursors, smallcap ¹⁴L-methionine and smallcap ¹⁴L-ethionine applied to soil. *Plant and Soil* 122(2): 219-227.
37. Näsholm T., Kielland K., and Ganeteg U. 2009. Uptake of organic nitrogen by plants. *New Phytologist* 182(1): 31-48.
38. Ngatia EM., Gathece LW., Macigo FG., Mulli TK., Mutara LN., and Wagaiyu LG. 2008. Nutritional and oral health status of an elderly population in Nairobi. *East African Medical Journal* 85(8): 378-385.
39. Nomiya K., and Yokoyama H., Transactions D. 2002. Syntheses, crystal structures and antimicrobial activities of polymeric silver (I) complexes with three amino-acids [aspartic acid (H₂ asp), glycine (Hgly) and asparagine (Hasn)]. *Journal of the Chemical Society* (12): 2483-2490.
40. Okamoto M., and Okada K. 2004. Differential responses of growth and nitrogen uptake to organic nitrogen in four gramineous crops. *Journal of Experimental Botany* 55(402): 1577-1585.
41. Pantaleone D., and Yalpani M. 1992. Unusual susceptibility of chitosan to enzymic hydrolysis. *Carbohydrate Research Scollar* 237(1): 325-332.
42. Prabakaran M., and JF Mano. 2004. Chitosan-based particles as controlled drug delivery systems. *Drug Delivery* 12(1): 41-57.
43. Ramírez MA., T Rodríguez A., Alfonso L., and Peniche C. 2010a. Chitin and its derivatives as biopolymers with potential agricultural applications. *Biotechnología Aplicada* 27(4): 270-276.
44. Ramírez MA., T Rodríguez A., Alfonso L., and Peniche C. 2010b. Chitin and its derivatives as biopolymers with potential agricultural applications. *Biotechnología Aplicada* 27(4): 270-276.
45. Rashad El-Sh M., El-Abagg HM., and Amin AA. 2003. Physiological effects of some bioregulators on growth and productivity of two broad bean cultivars. *Egypt Journal Appl Science* 18: 132-149.
46. Rombolà AD., Brüggemann W., Tagliavini M., Marangoni B., and Moog PR. 2000. Iron source affects iron reduction and re-greening of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) leaves. *Journal of Plant Nutrition* 23(11-12): 1751-1765.
47. Ruiz Juan M., Baghour M., and Romero L. 2000. Efficiency of the different genotypes of tomato in relation to foliar content of Fe and the response of some bioindicators. *Journal of Plant Nutrition* 23(11-12): 1777-1786.
48. Sánchez A.S., Margarita J., Sánchez-Andreu J., Jordá J., and Bermúdez D. 2005. Use of humic substances and amino acids to enhance iron availability for tomato plants from applications of the chelate FeEDDHA. *Journal of Plant Nutrition* 28(11): 1877-1886.
49. Smith Brandon R., and Cheng L. 2007. Iron assimilation and carbon metabolism in 'Concord' grapevines grown at different pHs. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 132(4): 473-483.

50. Smith Robert M., and Arthur E Martell. 1987. Critical stability constants, enthalpies and entropies for the formation of metal complexes of aminopolycarboxylic acids and carboxylic acids. *Science of the Total Environment* 64(1-2): 125-147.
51. Svennerstam H., Ulrika G., and Näsholm T. 2008. Root uptake of cationic amino acids by *Arabidopsis* depends on functional expression of amino acid permease 5. *New Phytologist* 180(3): 620-630.
52. Vadas Timothy M., Zhang X., Ashley M Curran., and Beth A Ahner. 2007. Fate of DTPA, EDTA, and EDDS in hydroponic media and effects on plant mineral nutrition. *Journal of Plant Nutrition* 30(8): 1229-1246.
53. Villén M., Lucena J.J., Carmen Cartagena M., Raquel B., Josemaría García-M., and Ignacia Martín de la Hinojosa M. 2007. Comparison of two analytical methods for the evaluation of the complexed metal in fertilizers and the complexing capacity of complexing agents. *Journal of Agricultura and Food Chemistry* 55(14): 5746-5753.
54. Yildiz Dasgan H., Levent O., Abak K., and Cakmak. 2003. Activities of Iron-Containing Enzymes in Leaves of Two Tomato Genotypes Differing in Their Resistance to Fe Chlorosis. *Journal of Plant Nutrition* 26(10-11): 1997-2007.
55. Zhang Y., Rongli Shi., Karim Md R., Fusuo Z., Chunqin Z. 2010. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58(23): 12268-12274.



Introducing Amino Acid and Chitosan Iron Chelates as Available Sources of Iron in Nutrient Solutions by Strategy I and II Plants

A. Mirbolook¹ - M.H. Rasouli Sadaghiani^{2*} - E. Sepehr³ - A. Lakzian⁴ - M. Hakimi⁵

Received: 23-12-2019

Accepted: 28-04-2020

Introduction: Iron (Fe) is an important micronutrient that plays a role in several crop physiological processes such as photosynthesis, respiration, and synthesis of heme proteins, DNA, RNA, and hormones. The most common Fe source used in agriculture is Fe-EDDHA. However, the usage of this chelate may be problematic for plant growth. In the recent years, organic chelates have gained attention as they increase the microelements solubility and prevent iron precipitation in nutrient solution. Organic chelates such as amino acids and polysaccharides have many physicochemical (reactive OH, COOH and NH₂ groups) and biological (biocompatible and biodegradable) properties that make these attractive materials usable for the agricultural practice. Biodegradability, low toxicity, immune system stimulation, the ability to coordinate metal, less sensitivity to photodegradation, and the effect on physical properties of rhizosphere and root growth dynamic are ideal properties of these components. The objective of this study was to evaluate Fe-organic-chelates efficiency as Fe sources for bean (Strategy I) and corn (Strategy II) growth in the hydroponic system.

Materials and Methods: In this research, we synthesized Fe-amino acid chelates including Fe-Glycine (Fe-Gly), Fe-Phenylalanine (Fe-Phe), Fe-Tyrosine (Fe-Tyr), Fe-Methionine (Fe-Met), and Fe chitosan chelates in two forms of acidic hydrolyzed chitosan [Fe-C(A.hyd)] and enzymatic hydrolyzed chitosan [Fe-C(E.hyd)] and characterized by FTIR and CHN analyzer. The efficiency of these iron sources for bean (Strategy II) and corn (Strategy I) in hydroponic system was then evaluated. Seeds of bean and corn were washed with distilled water and transplanted into special containers containing coco peat, perlite and vermicompost (1:1:1) at 25 °C for germination and initial growth. The seedlings were transferred to polyethylene plastic lids fitting tightly over 8-L polyethylene containers under controlled conditions in the greenhouse with a light period of 8 hours per day, the temperature of 20 to 25°C and relative humidity of 65 to 75%. The pots were stacked in black color to prevent light reaching the root of the plant and the solution. In each pot, one plant seedling was placed and the basic nutrient solution was prepared in deionized water. The plants were harvested after 8 weeks, their root and shoot were separated and dried after washing with distilled water in an oven at 75 °C. The dried samples were ground to fine powder to pass through a 20-mesh sieve. The analysis of Fe in samples was performed using atomic absorption spectrophotometer.

Result and Discussion: Application of organic chelates of amino acids and chitosan increased the shoot dry matter per plant compared to Fe-EDDHA. Fe content in shoot of corn and bean was highest using Fe-Tyr, Fe-Met and [Fe-C(A.hyd)]. Uptake and accumulation of Fe in roots were observed by using all chelates, but the highest translocation factor was found for the treatments including [Fe-C(A.hyd)] and Fe-Tyr. Translocation factor in bean plants was higher than corn, and around half of Fe in bean plants was translocated from root to shoot. The use of iron chelates in plant growth medium increased the activity of ferric chelates reductase enzymes in bean and corn compared to Fe-EDDHA. However, the mean of this enzyme activity in bean was higher than that in corn. Therefore, the activity of this enzyme can be used as an indicator for determining the iron availability in leaf cells in Strategy I and Strategy II plants. In general, the plants need less energy to absorb Fe when the chelates with a simpler structure are used.

Conclusion: The results indicated that using Fe organic chelates in the hydroponic system could supply sufficient amounts of iron for the plant uptake and also improve the root and the shoot growth of bean and corn. Overall, the effect of Fe organic chelates on Fe content of bean and corn shoots was in the following order: Fe-Chi(A.hyd) > Fe-Tyr > Fe-Met > Fe-Gly >. Activity of leaf ferric chelate reductase in bean was higher than that

1, 2 and 3- Ph.D. and Professors Soil Science, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, respectively.

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

4- Professor Soil Science, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

5- Professor Chemistry, Chemistry Department, Payam Noor University of Mashhad, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.84738

in corn.

Keywords: Amino acids, Bean, Chelate, Chitosan, Corn, Leaf ferric chelate reductase, Translocation factor

مقاله علمی-پژوهشی

مقایسه دو سامانه آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵) در رده‌بندی خاک‌های مناطق ایران‌شهر و دلگان، استان سیستان و بلوچستان

صالح سنجری^۱ - محمد هادی فرپور^{۲*} - مجید محمودآبادی^۳ - سعید برخوردار^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۳۱

چکیده

طبقه‌بندی خاک، ابزاری مفید برای فهم و مدیریت صحیح خاک‌ها می‌باشد. در این پژوهش، مقایسه دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و جهانی در ارتباط با خاک‌های خشک و فراخشک منطقه ایران‌شهر و دلگان واقع در استان سیستان و بلوچستان مورد بحث قرار گرفته است. پس از تفکیک سطوح ژئومورفیک در این منطقه، تعدادی خاک‌ها در هر کدام حفر و تشریح گردید. در نهایت تعداد ۱۰ خاک‌ها با در نظر گرفتن تنوع خاکی (خاک‌های جوان، گچی، آهکی، شور و سدیمی)، برای این مطالعه انتخاب شد. افاق‌های مشخصه کلسیک، جیسیک، انهدیریتیک، آرچیلیک، ناتریک و سالیک پس از مطالعات صحرایی و نتایج آزمایشگاهی شناسایی شدند. بر اساس یافته‌های این پژوهش، اضافه کردن زیرگروه‌های جدید یرمیک توری‌فلوونتر، یرمیک توری‌ارتنتز، کلسیک جیسی آرچیدز، جیسیک ناترسالیدز، ناتریک جیسی سالیدز، انهدیریتیک جیسی سالیدز و انهدیریتیک کلسی سالیدز به سامانه رده‌بندی آمریکایی از یک سو و افزودن توصیف‌کننده انهدیرایت و همچنین توصیف‌کننده اکوییک برای خاکی با گروه مرجع سولونچاک در سامانه رده‌بندی جهانی، می‌تواند در همبستگی بالاتر این دو سامانه رده‌بندی مؤثرتر باشد. از طرفی، درصد کربنات کلسیم معادل برای افاق کلسیک در ارتباط با خاک‌هایی با بافت درشت و سنگریزه به مانند سامانه رده‌بندی آمریکایی، برای سامانه رده‌بندی جهانی نیز پیشنهاد می‌شود. همچنین برای سامانه رده‌بندی آمریکایی، تعریف افاق سالیک، مشابه آنچه که در سامانه رده‌بندی جهانی آمده توصیه می‌گردد. نتایج پژوهش نشان داد که سامانه رده‌بندی جهانی برای تفسیر خاک‌های شور، سدیمی، گچی، آهکی و جوان، به دلیل استفاده از توصیف‌کننده‌های مختلف و انعطاف‌پذیری بالاتر در انعکاس خصوصیات خاک‌ها کارایی بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: ایران، آهکی، شور، گچی، همبستگی خاک

مقدمه

خصوصیات ژنتیکی و مورفولوژیکی خاک‌ها برای طبقه‌بندی استفاده می‌کنند (۹)؛ اما میزان همبستگی این سامانه‌ها با یکدیگر و تلاش برای همسان‌سازی آن‌ها، همواره یکی از دغدغه‌های خاکشناسان بوده است.

در همین راستا سامانه‌های طبقه‌بندی آمریکایی و جهانی توسط پژوهشگران مختلف در جهان مقایسه شده‌اند. ارتباط کمی بین این دو سامانه طبقه‌بندی توسط دیکرز و همکاران (۵) گزارش شد. آن‌ها بیان کردند که در رابطه با خاک‌های حاره‌ای، به‌جز گروه‌های مرجع هیستوسول، ورتیسول و آندوسول برای مابقی گروه‌های مرجع خاک، همبستگی نسبتاً کمی بین دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و جهانی وجود دارد. دلایلی از جمله عدم تساوی تعداد سطوح موجود در سلسله مراتب سامانه‌های مزبور (شش سطح سامانه رده‌بندی آمریکایی، در مقابل دو سطح سامانه رده‌بندی جهانی)، عدم تساوی تعداد گروه‌های خاک در بالاترین سطح از سلسله مراتب این سامانه‌ها (۱۲ رده خاک

افزایش تقاضا برای یک سامانه طبقه‌بندی بین‌المللی به‌عنوان یک زبان منحصر به فرد در علوم خاک باعث توسعه سامانه‌های طبقه‌بندی مختلف شده است. همچون بسیاری از کشورها، رده‌بندی خاک آمریکایی^۵ و طبقه‌بندی جهانی^۶ از محبوب‌ترین سامانه‌های رده‌بندی خاک در ایران هستند. هر دو سامانه طبقه‌بندی مذکور، از

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادان، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۴- استادیار مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت
(*) - نویسنده مسئول: (Email: farpoor@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86203
5- Soil Taxonomy
6- World Reference Base; WRB

(۲۰۱۴: ۳) تعیین بهترین سامانه طبقه‌بندی به‌منظور توصیف خاک‌های منطقه ایرانشهر و دلگان به‌عنوان بخشی از استان سیستان و بلوچستان.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران با حدود ۱۸۰ هزار کیلومتر مربع وسعت، بیش از ۱۱ درصد وسعت کشور را در بر می‌گیرد. منطقه مورد مطالعه از ایرانشهر (۵۹۰ متر ارتفاع از سطح دریا) مرکز استان شروع شده و تا شهرستان دلگان (۳۹۰ متر ارتفاع از سطح دریا) واقع در غرب استان ادامه دارد (شکل ۱). فاصله این دو شهر در حدود ۱۵۰ کیلومتر از یکدیگر می‌باشد. میانگین بارندگی و دمای سالیانه منطقه، به‌ترتیب ۱۰۵ میلی‌متر و ۲۵/۸ درجه سلسیوس می‌باشند. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه، به‌ترتیب اریدیک و هایپرترمیک می‌باشد، به‌جزء خاکرخ هفت که در منطقه‌ای با رژیم حرارتی ترمیک (رژیم رطوبتی این خاکرخ مشابه سایر منطقه مورد مطالعه می‌باشد) واقع شده است (۳).

مطالعات صحرایی

اشکال اراضی مخروط‌افکنه، پدیمت سنگی، پدیمت پوشیده، منطقه مرطوب پلایا و تپه در منطقه مورد مطالعه در طی مطالعات صحرایی و با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی (۱/۵۰۰۰) و تصاویر گوگل ارث شناسایی شدند. ده خاکرخ شاهد به‌منظور پوشش حداکثری تغییرات خاک در منطقه مورد مطالعه، از میان خاکرخ‌های حفر شده، مورد توصیف (۱۴) و نمونه‌برداری قرار گرفتند. شکل ۱ موقعیت خاکرخ‌های شاهد را نشان می‌دهد.

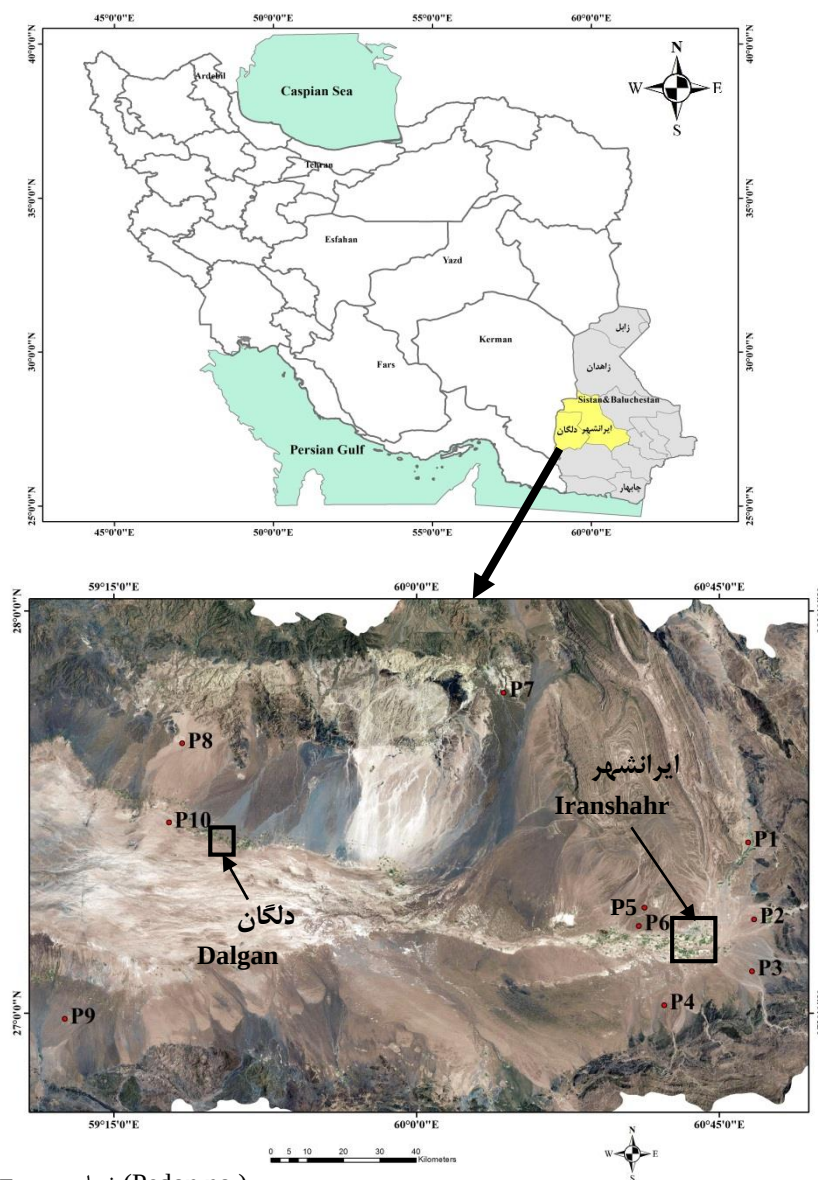
بررسی‌های آزمایشگاهی

نمونه خاک‌های هوا خشک شده و کوبیده شده، از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند و ذرات درشت آن‌ها (بزرگتر از دو میلی‌متر) تعیین گردید (۱۶). روش پیت برای تعیین توزیع اندازه ذرات استفاده شد (۸). از دستگاه پ‌هاش‌متر و هدایت‌سنج الکتریکی به‌ترتیب برای اندازه‌گیری پ‌هاش خمیر اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک استفاده شد. با قرار دادن خاک اشباع در حرارت ۱۰۵ درجه سلسیوس به‌مدت ۲۴ ساعت، درصد وزنی رطوبت اشباع (SP) مشخص گردید. برای اندازه‌گیری گچ+انهیدریت از روش ترسیب با استون (۱۱) استفاده شد و گچ به روش آون (۱) اندازه‌گیری شد. انهیدریت از کم کردن میزان گچ از گچ+انهیدریت محاسبه گردید (۱۸).

سامانه رده‌بندی آمریکایی، در مقابل ۳۲ گروه مرجع خاک سامانه رده‌بندی جهانی، وسیع و گسترده بودن اغلب تعریف‌های ارائه شده برای افق‌های مشخصه مشابه موجود در دو سامانه مذکور و عدم استفاده از معیارهای اقلیمی در سامانه طبقه‌بندی جهانی، به‌عنوان توجیهی بر اندک بودن این همبستگی توسط پژوهشگران مزبور گزارش گردیده است. گراسیموف (۹) عقیده دارد که برتری سامانه جهانی نسبت به سامانه آمریکایی، در ارتباط با خاک‌های متأثر از فعالیت‌های انسانی می‌باشد؛ چرا که در سامانه جهانی، دو گروه مرجع خاک آنتروپوسول و تکنوسول در این ارتباط مد نظر قرار گرفته‌اند. سکو و همکاران (۱۵) اظهار می‌دارند از آنجا که سامانه طبقه‌بندی جهانی تلاش می‌کند تا تمامی انواع خاک‌های موجود در جهان را پوشش دهد؛ بنابراین از تنوع افق بالاتری نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی برخوردار بوده و تأکید بیشتری بر مورفولوژی و تشکیل خاک دارد.

در همین راستا مطالعاتی نیز در جهت کارایی این دو سامانه در خاک‌های ایران صورت پذیرفته است. اسفندیارپور و همکاران (۶) به بررسی کارایی این دو سامانه طبقه‌بندی در خاک‌های شور استان کرمان پرداختند. آنان بیان کردند که به‌کارگیری سامانه طبقه‌بندی جهانی برای گروه‌بندی خاک‌های شور موجود در مناطق خشک، به‌دلیل استفاده از توصیف‌کننده‌های مختلف و انعطاف‌پذیری بالاتر در انعکاس خصوصیات مؤثر در نام‌گذاری خاک‌ها، بهتر می‌تواند واقعیات صحرا را در هر دو بعد افقی و عمودی خاک به نمایش گذارد. از طرفی، بهمنی و همکاران (۲) نیز بیان کردند که سامانه رده‌بندی جهانی در توصیف ویژگی‌های خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک تاحدی گویاتر است. هم‌چنین، اسفندیارپور و همکاران (۷) هم‌خوانی بین رده‌بندی خاک آمریکایی و سامانه طبقه‌بندی جهانی در گروه‌بندی خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه‌خشک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که سامانه طبقه‌بندی جهانی، با کاربرد ترکیبی از توصیف‌کننده‌ها، توانایی بالاتری در منعکس کردن ویژگی‌های این خاک‌ها دارد. سرمست و همکاران (۱۳) با مقایسه دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی و جهانی برای خاک‌های آهکی و گچی ایران مرکزی بیان کردند با توجه به تنوع توصیف‌کننده‌ها در سامانه طبقه‌بندی جهانی، این سامانه می‌تواند نسبت به سامانه آمریکایی کاربردی‌تر باشد.

نظر به اینکه تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای بر روی خاک‌های مناطق ایرانشهر و دلگان واقع در استان سیستان و بلوچستان صورت نپذیرفته و یا گزارش مدونی در اختیار نمی‌باشد، لذا پژوهش حاضر برای رسیدن به اهداف زیر انجام پذیرفت: (۱) مقایسه طبقه‌بندی خاک‌های منطقه مطالعاتی بر اساس دو سامانه رده‌بندی جامع آمریکایی (۲۰۱۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵: ۲) نام‌گذاری خاکی با افق انهیدریت که اضافه شده به سامانه رده‌بندی جامع آمریکایی



P= شماره پدون (Pedon no.)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه محل حفر خاک‌های شاهد

Figure 1- Location of the study area along with the place of excavated representative pedons

آمریکایی (۱۶) و جهانی (۱۹) نهایی شد.

نتایج و بحث

جدول ۱ برخی از خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها نیز در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول‌های ۱ و ۲، طبقه‌بندی خاک‌های مطالعاتی بر اساس دو سامانه رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵) تعیین گردید (جدول ۳).

اندازه‌گیری کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی انجام شد. کربن آلی به روش اکسیداسیون تر با دی کرومات پتاسیم اندازه‌گیری شد (۱۲). به منظور تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی از جایگزینی استات سدیم توسط استات آمونیوم در pH=7 استفاده شد (۴). مقدار عددی نسبت جذبی سدیم، با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول (mmol(+) L⁻¹) و بر اساس معادله ذیل محاسبه شد:

$$SAR = Na / (\sqrt{[(Ca^{2+} + Ma^{2+})/2]})$$

در نهایت، براساس نتایج آزمایشگاهی و با توجه به مشاهدات صحرایی، طبقه‌بندی خاک‌ها براساس دو سامانه رده‌بندی جامع

رده‌بندی جامع آمریکایی به اهمیت افق ناتریک نسبت به سالیك در این نوع خاک‌ها توجه شود و هم‌چنین برای زیررده خاک‌های سالیك، زیرگروه جیپسیک ناترسالیدز پیشنهاد می‌گردد.

خاکرخ ششم در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت تیپیک کلسی جیپسوز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی به‌صورت کلسیک جیپسی سولز نام‌گذاری شد (جدول ۳). همان‌گونه که در طبقه‌بندی جهانی مشاهده می‌شود از توصیف‌کننده هایپوجیپسیک استفاده شده که اهمیت میزان تجمع گچ را نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی نشان می‌دهد؛ زیرا میزان حضور گچ بر مدیریت این خاک‌ها تأثیرگذار می‌باشد. سرمست و همکاران (۱۳) و تومانیان و همکاران (۱۷) به نقش این نوع توصیف‌کننده‌ها پرداخته‌اند.

خاکرخ هفتم دارای افق‌های کلسیک، آرجیلیک، سالیك، جیپسیک و ناتریک می‌باشد (جدول ۱). با توجه به رده‌بندی این خاک در دو سامانه مورد بحث، سامانه طبقه‌بندی جهانی با توجه به تنوع توصیف‌کننده، دارای کارایی بهتری نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی می‌باشد. از طرفی با توجه به تعریف افق سالیك در سامانه طبقه‌بندی جهانی (میزان قابلیت هدایت الکتریکی حداقل ۱۵ دسی زیمنس بر متر و حاصلضرب ضخامت در میزان قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر از ۴۵۰)، و نقشی که نمک در محدود کردن گیاه بازی می‌کند، پیشنهاد می‌شود این تعریف برای افق سالیك در رده‌بندی آمریکایی نیز لحاظ گردد تا همبستگی بین این دو سامانه بیشتر شود. دکرز و همکاران (۵) به تعریف گسترده برخی از تعاریف افق‌های مشخصه (مانند سالیك) به‌عنوان همبستگی ضعیف بین دو سامانه مزبور در چنین شرایطی اشاره کرده‌اند.

خاکرخ هشتم دارای افق‌های کلسیک، جیپسیک، انهیدریتیک و سالیك می‌باشد (جدول ۱)، که در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت انهیدریتیک هاپلوسالیدز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی به‌صورت کلسیک جیپسیک سالیك سولونچاک نام‌گذاری شد (جدول ۳). بنابراین به‌نظر می‌رسد که رده‌بندی آمریکایی قادر نیست این خاک را به‌درستی تفسیر کند؛ اما از طرف دیگر سامانه طبقه‌بندی جهانی قادر خواهد بود با توصیف‌کننده‌های متنوع این خاک را تفسیر کند. به‌طور کلی، عدم وجود تمایزکننده‌های دقیق‌تر در خاک‌های شور مشاهده شده در پژوهش حاضر از نقاط ضعف رده‌بندی آمریکایی می‌باشد. چنین نتیجه‌ای قبلاً توسط اسفندیارپور و همکاران (۶) و سرمست و همکاران (۱۳) نیز گزارش شده است.

از طرفی، در خاکرخ هشتم افق انهیدریتیک در رده‌بندی آمریکایی (۲۱۰۴) در نظر گرفته شده است که با توجه به اینکه چنین افقی در طبقه‌بندی جهانی آورده نشده است، نقطه ضعفی برای این سامانه در برابر سامانه رده‌بندی آمریکایی می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود که افق انهیدریتیک به افق‌های سامانه طبقه‌بندی جهانی اضافه گردد.

خاکرخ اول دارای افق‌های کلسیک، جیپسیک و آرجیلیک می‌باشد (جدول ۱)، که در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت تیپیک جیپسی آرچیدز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی، اسکلتیک لوویک کلسی سول رده‌بندی شد (جدول ۳). پیشنهاد می‌شود در رده‌بندی آمریکایی افق کلسیک هم در رده‌بندی در نظر گرفته شود که برای رفع این نقص، زیرگروه کلسیک جیپسی آرچیدز اضافه شود. از طرفی، در رده‌بندی جهانی نیز اهمیت و نقش افق جیپسیک برای این نوع خاک‌ها در عمق ۱۵۰ سانتی‌متری به‌عنوان یک توصیف‌کننده در نظر گرفته شود.

خاکرخ‌های دوم و نهم، خاک آبرفتی جوان می‌باشند که با توجه به تنوع توصیف‌کننده‌ها (برای مثال؛ توصیف یرمیک نشان‌دهنده وجود سنگ‌فرش در سطح اراضی این منطقه است) برای تفسیر این نوع خاک‌ها، طبقه‌بندی جهانی کارایی بهتری نسبت به رده‌بندی آمریکایی دارد. به‌علاوه، خاکرخ سوم هم یک خاک جوان و سنگریزه‌دار می‌باشد که طبقه‌بندی جهانی نیز این خاک‌ها را بهتر تفسیر می‌کند. پیشنهاد می‌شود که واژه سنگ‌فرش بیابانی به‌عنوان بخشی از مواد مشخصه برای توصیف بهتر به زیرگروه خاک‌های جوان آبرفتی (یرمیک توری‌فلوونتر برای خاکرخ سه و یرمیک توری‌آرتنتر برای خاکرخ چهار) اضافه شود.

خاکرخ چهارم در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت تیپیک هیلوکلسیدز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی، کلکریک اسکلتیک کمپیسول رده‌بندی گردید (جدول ۳). نکته قابل تأمل در این خاکرخ، توضیحی است که سامانه رده‌بندی جامع آمریکایی از تعریف افق کلسیک (برای خاک‌هایی با بافت درشت و سنگریزه‌دار میزان کربنات کلسیم معادل حداقل ۵ درصد در نظر گرفته شده است)، ارائه کرده است که پیشنهاد می‌شود این تعریف برای افق کلسیک در طبقه‌بندی جهانی نیز لحاظ گردد. سرمست و همکاران (۱۳) نیز چنین پیشنهادی را برای سامانه طبقه‌بندی جهانی ارائه کرده‌اند.

مهمترین مزیت طبقه‌بندی جهانی در تفسیر خاکرخ پنجم خودنمایی می‌کند. این خاک دارای افق آرجیلیک، جیپسیک، ناتریک و سالیك در ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک می‌باشد که در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت جیپسیک هاپلوسالیدز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی جیپسیک سالیك سولونتر رده‌بندی شد (جدول ۳). همان‌گونه که در نام‌گذاری آمریکایی تا سطح زیرگروه آمده، توجهی به افق ناتریک در خاک‌های شور و سدیمی نشده است، در حالی که در بحث مدیریتی گاه‌ها تأثیر افق ناتریک از افق سالیك در این نوع خاک‌ها مهم‌تر می‌باشد زیرا وجود افق ناتریک باعث پراکنده شدن ذرات خاک و تخریب ساختمان خاک می‌گردد و از طرفی اصلاح آن سخت‌تر از خاک‌های فقط شور می‌باشد. از سوی دیگر در طبقه‌بندی جهانی به‌درستی به جایگاه افق ناتریک نسبت به افق سالیك در خاک‌های شور و سدیمی توجه شده است. بنابراین توصیه می‌شود در

جدول ۱- برخی خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- Selected morphological properties of studied pedons

Table 2 Selected morphological properties of studied pedons									
افق Horizon	عمق Depth (cm)	مرز افق Boundaries ¹	رنگ Color		پایداری Consistency ²		ساختمان Structure ³	جوشش با اسید Effervescence ⁴	پوشش ها یا تجمعات Concentrations ⁵
			خشک Dry	مرطوب Moist	خشک Dry	مرطوب Moist			
Pedon 1 Rock pediment 793 m above sea level									
A	0-40	A, S	10YR 6/4	10YR 5/4	S	VFR	1fabk	ST, H2	FDC, TOT
Btk1	40-80	G, S	7.5YR 6/4	7.5YR 5/4	MH	FR	2mabk	ST, H2	c, 2, CAN, MAT
Btk2	80-105	A, S	10YR 6/4	10YR 5/4	MH	FR	2mabk	ST, H2	c, 2, CAN, MAT
C	105-110	A, S	10YR 7/3	10YR 6/3	L	L	sg	ST, H2	FDC, TOT
2Btk	110-125	C, S	10YR 7/3	10YR 6/3	MH	FR	2mabk	ST, H2	c, 2, CAM, MAT
2Bty	125-150	C, S	10YR 7/3	10YR 6/3	MH	FR	2mabk	SL, H2	m, 4, GYX, MAT
2Cy	150-170	-	10YR 7/3	10YR 6/3	SH	VFR	1fabk	SL, H2	m, 2, GYX, BRF
Pedon 2 Alluvial fan 632 m above sea level									
A	0-5	A, S	10YR 6/3	10YR 5/3	S	L	1fabk	SL, H2	FDC, TOT
C1	5-25	C, S	10YR 6/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C2	25-40	C, S	10YR 6/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C3	40-70	C, S	10YR 7/3	10YR 6/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C4	70-90	C, S	10YR 7/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C5	90-130	-	10YR 7/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
Pedon 3 Alluvial fan 676 m above sea level									
A	0-7	A, S	10YR 7/3	10YR 5/3	S	L	1fabk	SL, H2	FDC, TOT
C1	7-40	G, S	10YR 6/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C2	40-90	G, S	10YR 6/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C3	90-110	G, S	10YR 6/2	10YR 5/2	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C4	110-140	-	10YR 7/2	10YR 6/2	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
Pedon 4 Alluvial fan 635 m above sea level									
A	0-30	A, S	7.5YR 6/4	7.5YR 5/4	S	VFR	1fabk	SL, H2	FDC, TOT
Bk	30-55	C, W	7.5YR 6/4	7.5YR 5/4	SH	VFR	1fabk	ST, H2	c, 2, CAN, MAT
C1	55-85	C, S	10YR 6/4	10YR 5/4	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C2	85-110	C, S	10YR 6/4	10YR 5/4	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C3	110-135	C, S	10YR 6/3	10YR 5/3	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C4	135-165	-	10YR 6/4	10YR 5/4	L	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
Pedon5 Mantled pediment 613 m above sea level									
A	0-15	A, S	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	S	VFR	1fabk	ST, H2	FDC, TOT
Bty	15-45	G, S	7.5YR 8/4	7.5YR 6/4	SH	VFR	2mabk	SL, H2	m, 4, GYX, MAT
Btnyz1	45-75	G, S	7.5YR 8/4	7.5YR 5/4	MH	FR	2mabk	SL, H2	m, 4, GYX, MAT
Btnyz2	75-120	G, S	7.5YR 8/4	7.5YR 5/4	MH	FR	2mabk	SL, H2	m, 4, GYX, BRF
Btnyz3	120-155	G, S	7.5YR 8/4	7.5YR 6/4	MH	FR	2mabk	SL, H2	m, 4, GYX, BRF
Btny	155-185	-	7.5YR 8/4	7.5YR 6/4	H	FI	2mabk	ST, H2	m, 2, GNM, MAT
Pedon 6 Hill 560 m above sea level									
A	0-5	A, S	10YR 7/4	10YR 4/4	S	VFR	1fabk	SL, H2	FDC, TOT
Bk	5-40	C, S	7.5YR 7/4	7.5YR 5/4	SH	VFR	1fabk	ST, H2	c, 2, CAM, MAT
By1	40-75	C, S	10YR 7/4	10YR 6/4	S	L	sg	SL, H2	m, 2, GYX, BRF
By2	75-105	G, S	10YR 7/4	10YR 6/4	S	L	sg	SL, H2	c, 2, GYX, BRF
By3	105-140	-	10YR 7/3	10YR 6/3	S	L	sg	SL, H2	c, 2, GYX, BRF
Pedon 7 Mantled pediment 860 m above sea level									
A	0-15	A, S	7.5YR 6/4	7.5YR 5/4	S	VFR	1fabk	SL, H2	FDC, TOT
Bk	15-40	G, W	5YR 7/4	5YR 5/4	SH	VFR	1mabk	ST, H2	c, 2, CAN, MAT
Btk	40-55	C, W	5YR 7/6	5YR 6/6	SH	VFR	1mabk	ST, H2	c, 2, CAN, MAT
Btkyz	55-80	G, S	5YR 7/6	5YR 5/6	SH	VFR	1mabk	ST, H2	c, 2, CAM/GYX, MAT
Btnkyz1	80-140	G, S	5YR 6/4	5YR 5/4	S	VFR	1fabk	ST, H2	c, 2, CAM/GYX, MAT
Btnkyz2	140-175	-	5YR 7/4	5YR 7/4	S	VFR	1fabk	ST, H2	c, 2, CAM/GYX, MAT
Pedon 8 Mantled pediment 490 m above sea level									
A	0-10	A, S	10YR 7/4	10YR 6/4	S	VFR	1fabk	VE, H2	m, 1, CAM, MAT

Bkyzn1	10-35	G, S	2.5Y 7/4	2.5Y 5/4	S	VFR	1fabk	VE, H2	m, 1, 3, CAM/GYX, MAT
Bkyzn2	35-65	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	S	VFR	1fabk	VE, H2	m, 1, 3, CAM/GYX, MAT
Bkyzn3	65-110	G, S	10YR 7/4	10YR 6/4	S	VFR	1fabk	VE, H2	m, 1, 3, CAM/GYX, MAT
Bkyzn4	110-160	C, S	10YR 8/4	10YR 6/4	S	VFR	1fabk	VE, H2	m, 1, 3, CAM/GYX, BRF
Ck	160-190	-	10YR 8/4	10YR 6/4	S	L	sg	VE, H2	m, 2, CAM, BRF
Pedon 9 Alluvial fan 440 m above sea level									
A	0-10	A, S	10YR 6/4	10YR 5/4	S	VFR	1fabk	ST, H2	FDC, TOT
C1	10-20	C, S	10YR 7/3	10YR 5/3	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C2	20-40	C, S	10YR 7/2	10YR 6/2	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C3	40-90	C, S	10YR 7/2	10YR 6/2	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C4	90-100	C, S	10YR 7/4	10YR 5/4	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C5	100-140	-	10YR 7/3	10YR 5/3	S	L	sg	ST, H2	FDC, TOT
Pedon 10 Playa (wet zone) 371 m above sea level									
Azn	0-35	A, S	10YR 6/4	10YR 5/4	MH	VFI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn1	35-63	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	H	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn2	65-95	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	H	FI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn3	95-125	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	H	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn4	125-160	-	10YR 7/3	10YR 5/3	SH	VFI	2msbk	ST, H2	m, 1, SAX, MAT

^۱ مرز (Boundary): تمایز distinctness (A: ناگهانی abrupt, C: واضح clear, G: تدریجی gradual); توپوگرافی topography (S: صاف smooth, W: موجی wavy).

^۲ پایداری (Consistency): خشک dry (L: سست loose, S: نرم soft, SH: کمی سخت slightly hard, MH: سختی متوسط moderately hard, HA: سخت hard); مرطوب moist (L: سست loose VFR: خیلی شکننده very friable, FR: شکننده friable, FI: محکم firm, VFI: بسیار محکم very firm).

^۳ ساختمان (Structure): درجه grade (1: ضعیف, 2: متوسط); اندازه size (f: ریز fine, m: متوسط medium); نوع type (abk: مکعبی زاویه‌دار angular blocky, sbk: مکعبی بدون زاویه); توده‌ای massive (m: توده‌ای massive, sg: تک دانه single grain, sub angular blocky).

^۴ جوشش (Effervescence): کلاس class (sl: جوشش کم slightly effervescent, ST: جوشش زیاد strongly effervescent, VE: جوشش خیلی شدید Violently Effervescent); عامل شیمیایی chemical agent (H2: اسید هیدروکلریک نرمال normal hydrochloric acid).

^۵ میزان تجمعات (Concentrations): میزان quantity (c: متوسط common, m: زیاد many); اندازه size (1: ریز fine, 2: متوسط medium, 3: درشت coarse, 4: خیلی درشت very coarse); نوع kind (FDC: کرنات‌های ریز نامشهود finely disseminated carbonates, CAM: توده‌های کرناتی carbonate masses, GYM: توده‌های گچ gypsum, GYX: کریستال‌های گچی gypsum crystals, masses, GNM: خوشه‌های کریستالی گچ gypsum crystal clusters, CAN: نادل‌های کرناتی carbonate nodules, BRF: زیر سنگریزه beneath, through out, TOT: سرتاسر متن خاک, in the matrix, SAX: کریستال‌های نمکی salt crystals); موقعیت location (MAT: در ماتریکس خاک, rock fragments).

می‌توان گروه بزرگ اکوئی‌سالی‌دز را به‌منظور طبقه‌بندی این خاک بر مبنای رده‌بندی آمریکایی انتخاب کرد. هر چند سامانه طبقه‌بندی جهانی نیز از توصیف‌کننده‌های گلیک و استگنیک برای توصیف هر چه بهتر شرایط رطوبتی موجود در خاک‌های سولونچاک استفاده می‌کند، اما استفاده از این نوع توصیف‌کننده‌ها لازمه دارا بودن شرایط احیایی و مشاهده الگوهای رنگ مربوط به آن‌ها می‌باشد (۱۹). بنابراین به‌نظر می‌رسد که سامانه رده‌بندی آمریکایی شرایط اشباع خاک را صرف‌نظر از وجود یا عدم وجود شرایط احیایی، بهتر مد نظر قرار داده است. در نتیجه، به‌منظور هماهنگی بیشتر این دو سامانه، پیشنهاد می‌گردد توصیف‌کننده اکوئیک برای سامانه طبقه‌بندی جهانی به‌منظور نمایش واقعیت موجود در خاک‌های شور با چنین ویژگی، اضافه شود. اسفندیارپور و همکاران (۶) اضافه نمودن چنین توصیف‌کننده‌ای را به سامانه طبقه‌بندی جهانی (۲۰۰۷) برای خاک‌های شور پیشنهاد کرده‌اند.

هم‌چنین عدم توجه رده‌بندی آمریکایی در به‌کار بردن علامت مستقل برای افق انهیدریتیک نسبت به افق جیپسیک باعث گمراهی خوانندگان شده که پیشنهاد می‌شود به‌جای علامت By و Byy از علامت اختصاری دیگری برای افق انهیدریتیک استفاده شود. سرمست و همکاران (۱۳) علامت‌های اختصاری Ba و Baa را برای افق انهیدریتیک توصیه کردند که لزوم استفاده از آن در پژوهش حاضر نیز تأکید می‌گردد. از سوی دیگر، زیرگروه‌های انهیدریتیک جیپسی‌سالی‌دز و انهیدریتیک کلسی‌سالی‌دز نیز برای سامانه رده‌بندی آمریکایی پیشنهاد می‌شود

خاک‌رخ دهم که در سطح مرطوب پلایا حفر گردیده، در سامانه رده‌بندی آمریکایی به‌صورت تیپیک اکوئی‌سالی‌دز و در سامانه طبقه‌بندی جهانی به‌صورت سودیک سولونچاک رده‌بندی گردید (جدول ۳). این خاک شور در پلایا دارای سطح سفره آب زیرزمینی بالا می‌باشد. با توجه به اینکه خاک‌رخ مزبور در فاصله یک متری سطح خاک، در طول سال‌های نرمال، حداقل یک ماه اشباع از آب می‌باشد؛

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه
Table 2- Selected physical and chemical properties of studied pedons

افق Horizon	عمق Depth (cm)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	RF (%)	بافت خاک Textura I Class	pH	ECe (dS m ⁻¹)	CCE (%)		گچ Gypsum (%)	انهیدریت Anhydrite (%)	کربن آلی OC (%)	SAR (mmol L ⁻¹) ^{0.5}	CEC (cmol kg ⁻¹)
									≤2 mm	≤0.002 mm					
Pedon 1	Rock pediment	793 m above sea level													
A	0-40	56.4	34.6	9.0	54	SL	7.8	1.0	19.2	1.5	ng	ng	0.1	0.7	10.1
Btk1	40-80	50.4	34.6	15.0	43	L	7.8	0.8	20.0	1.36	ng	ng	0.2	1.2	10.1
Btk2	80-105	46.4	36.6	17.0	27	L	7.8	1.8	15.2	1.5	ng	ng	0.1	3.9	26.7
C	105-110	56.4	28.6	15.0	55	SL	7.8	2.1	16.5	0.67	ng	ng	0.1	3.4	24.0
2Btk	110-125	48.4	36.6	15.0	4	L	7.6	3.6	21	2.0	0.1	ng	0.1	4.1	23.1
2Bty	125-150	43.0	38.3	18.7	3	L	7.6	3.5	10.7	0.25	24.0	ng	0.1	3.8	23.1
2Cy	150-170	64.5	25.3	10.2	53	SL	7.7	3.8	14.0	ng	17.6	ng	0.1	5.3	24.0
Pedon 2	Alluvial fan	632 m above sea level													
A	0-5	80.4	10.6	9.0	51	LS	7.7	0.8	9	0.12	ng	ng	0.1	0.8	3.9
C1	5-25	80.4	12.6	7.0	56	LS	8.1	0.5	12.2	ng	ng	ng	0.1	1.5	3.9
C2	25-40	86.4	4.6	9.0	64	LS	8.1	0.5	12.5	ng	ng	ng	0.1	0.9	3.4
C3	40-70	82.4	6.6	11.0	62	LS	7.9	0.6	12	ng	ng	ng	0.1	1.5	4.3
C4	70-90	68.4	14.6	17.0	77	SL	7.8	0.8	12.5	ng	ng	ng	0.2	3.2	6.0
C5	90-130	58.4	22.6	19.0	66	SL	7.8	0.9	11.7	ng	ng	ng	0.2	4.1	8.7
Pedon 3	Alluvial fan	676 m above sea level													
A	0-7	59.8	24.6	15.6	56	SL	7.5	2.3	15.0	0.5	ng	ng	0.2	1.8	9.1
C1	7-40	77.8	14.6	7.6	50	LS	8.0	0.9	13.7	ng	ng	ng	0.1	6.3	5.6
C2	40-90	83.8	8.6	7.6	57	LS	7.6	12.7	15.2	ng	ng	ng	0.1	5.6	4.7
C3	90-110	89.8	0.6	9.6	59	LS	7.7	10.0	15.7	ng	ng	ng	0.1	8.8	4.3
C4	110-140	81.8	8.6	9.6	68	LS	7.5	12.3	14.2	ng	ng	ng	0.1	7.6	5.2
Pedon 4	Alluvial fan	635 m above sea level													
A	0-30	72.4	18.6	9.0	5	SL	8.2	0.7	9.0	0.75	ng	ng	0.1	4.6	6.9
Bk	30-55	78.4	12.6	9.0	38	SL	7.7	3.1	12.7	0.75	ng	ng	0.2	7.5	7.3
C1	55-85	80.4	8.6	11.0	53	SL	7.7	3.9	10.5	0.25	ng	ng	0.1	8.7	6.9
C2	85-110	88.4	2.6	9.0	72	LS	8.0	2.3	11.7	ng	ng	ng	0.2	8.1	6.9
C3	110-135	82.4	6.6	11.0	58	LS	8.0	2.6	11.7	ng	ng	ng	0.2	9.7	6.9
C4	135-165	62.4	12.6	25.0	83	SCL	8.1	2.2	11.7	ng	ng	ng	0.1	14.4	13.1
Pedon5	Mantle pediment	613 m above sea level													
A	0-15	70.0	16.0	14.0	10	SL	7.5	2.0	16.0	1.0	0.1	ng	0.1	2.4	15.3
Bty	15-45	38.0	38.0	24.0	1	L	7.7	6.1	5.7	0.72	40.7	ng	ng	6.5	14.4
Btnyz1	45-75	36.0	34.0	30.0	1	CL	7.6	43.5	10.0	ng	38.2	ng	0.1	70.0	21.4
Btnyz2	75-120	46.0	18.0	36.0	45	SC	7.6	58.6	8.0	ng	37.5	ng	0.1	80.0	23.1
Btnyz3	120-155	46.0	32.0	22.0	46	L	7.9	45.2	8.5	ng	25.5	ng	0.1	100.8	26.7
Btny	155-185	34.0	36.0	30.0	11	CL	8.2	24	16.7	ng	5.3	ng	0.1	73.6	27.5
Pedon 6	Hill	560 m above sea level													
A	0-5	60.4	28.6	11.0	38	SL	7.8	0.9	12.2	0.5	ng	ng	0.3	0.8	9.5
Bk	5-40	66.4	24.6	9.0	24	SL	7.7	2.1	16.0	ng	ng	ng	0.1	2.3	12.1
By1	40-75	76.5	15.3	8.2	3	SL	7.6	4.5	11.2	ng	15.6	ng	0.1	3.4	10.8
By2	75-105	86.5	5.3	8.2	36	LS	7.7	4.8	9.5	ng	5.2	ng	0.1	5.8	9.9
By3	105-140	88.5	5.3	6.2	32	LS	7.8	6.2	7.25	ng	5.1	ng	0.1	11.7	9.1
Pedon 7	Mantle pediment	860 m above sea level													
A	0-15	79.1	8.6	12.3	22	SL	7.7	5.6	8.2	0.75	ng	ng	0.1	14.4	10.1
Bk	15-40	76.5	15.3	8.2	26	SL	7.4	9.2	16.0	0.5	ng	ng	0.1	11.4	10.1
Btk	40-55	56.5	25.3	18.2	35	SL	7.3	25.5	16.2	1.5	0.6	ng	0.1	12.5	14.4
Btkyz	55-80	64.5	15.3	20.2	27	SCL	7.6	20.9	16.7	0.36	7.4	ng	0.1	11.3	12.7
Btnkyz1	80-140	66.5	15.3	18.2	34	SL	7.6	19.8	15.5	1.0	5.8	ng	0.1	22.2	14.4
Btnkyz2	140-175	52.5	29.3	18.2	53	L	7.5	22.3	17.5	0.5	6.3	ng	ng	21.3	15.3
Pedon 8	Mantle pediment	490 m above sea level													
A	0-10	55.8	33.3	10.9	21	SL	7.4	43.5	37.7	1.5	0.7	ng	0.4	53.0	9.5
Bkyzn1	10-35	47.8	41.3	10.9	24	L	7.1	140.5	27.2	0.62	2.0	17.4	0.4	64.5	12.1
Bkyzn2	35-65	61.8	28.6	9.6	63	SL	7.3	84.7	24.5	0.5	26.7	ng	0.1	59.4	14.7
Bkyzn3	65-110	53.8	32.6	13.6	61	SL	7.3	99.6	34	0.5	18.1	ng	0.2	66.8	14.7
Bkyzn4	110-160	51.8	38.6	9.6	67	L	7.6	96.1	47.5	0.5	8.3	ng	0.8	92.4	15.2

Ck	160-190	69.8	20.6	9.6	67	SL	7.6	9.45	45.0	0.12	0.1	ng	0.1	7.0	11.3
Pedon 9	Alluvial fan	440 m	above sea level												
A	0-10	60.4	22.6	17.0	15	SL	7.7	7.0	13.7	0.5	ng	ng	0.1	9.9	12.2
C1	10-20	83.1	6.6	10.3	38	LS	8.2	1.7	12	ng	ng	ng	0.1	1.9	7.8
C2	20-40	91.1	0.6	8.3	40	S	7.8	6.1	9.7	ng	ng	ng	ng	10.0	5.2
C3	40-90	92.4	0.6	7.0	43	S	7.5	27.2	11.5	ng	ng	ng	0.1	16.1	6.1
C4	90-100	90.4	2.6	7.0	3	S	7.5	25.1	9.0	ng	ng	ng	0.1	14.5	8.7
C5	100-140	91.8	0.6	7.6	47	S	7.4	18.8	14.5	ng	ng	ng	0.1	14.3	4.3
Pedon 10	Playa (wet zone)	371 m	above sea level												
Azn	0-35	14.6	41.8	43.6	0	SiC	8.6	119.7	13.0	3.75	4.9	ng	0.2	1535.7	22.9
Bzn1	35-63	4.6	45.8	49.6	0	SiC	8.4	68.0	12.0	3.0	2.3	ng	0.2	584.4	26.3
Bzn2	65-95	5.8	52.6	41.6	0	SiC	8.5	53.2	14.7	3.0	1.4	ng	0.2	429.3	21.8
Bzn3	95-125	6.4	45.3	48.3	0	SiC	8.5	37.5	11.7	3.5	2.3	ng	0.1	197.1	25.5
Bzn4	125-160	0.4	73.3	26.3	0	SiL	8.6	35.7	15.2	2.4	ng	ng	0.1	218.6	17.7

RF: ذرات درشت (rock fragments); CCE: کربنات کلسیم معادل (calcium carbonate equivalent); SAR: نسبت سدیم جذبی (sodium adsorption ratio); CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی (cation exchange capacity); ECe: هدایت الکتریکی عصاره اشباع (electrical conductivity of saturated extract); ng: negligible (ناچیز) *

نتیجه گیری

اسامی خاک‌ها در سامانه طبقه‌بندی جهانی نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی، اطلاعات بیشتری در مورد ویژگی‌ها و خصوصیات درونی خاک‌های جوان (مانند وجود توصیف‌کننده یرمیک برای نشان دادن سنگ‌فرش بیابانی)، در دسترس قرار می‌دهند.

در مورد خاک‌هایی با افق‌های کلسیک و آرچیلیک در ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک و افق جیپسیک در ۱۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک، هر دو سامانه دارای نقص می‌باشند. در مورد این خاک‌ها، زیرگروه کلسیک جیپسی آرچیدز برای سامانه رده‌بندی آمریکایی و در نظر گرفتن افق جیپسیک در ۱۵۰ سانتی‌متری از سطح این خاک به‌عنوان یک توصیف‌کننده برای سامانه طبقه‌بندی جهانی پیشنهاد می‌گردد.

سامانه رده‌بندی آمریکایی در تعریف افق کلسیک عملکرد بهتری دارد، لذا پیشنهاد می‌شود که تعریف افق کلسیک در مورد خاک‌هایی با بافت درشت و سنگریزه‌دار با میزان کربنات کلسیم پنج درصد در سامانه طبقه‌بندی جهانی لحاظ گردد.

یکی از ضعف‌های سامانه رده‌بندی آمریکایی، عدم توجه به تفکیک خاک‌های شور در مناطق خشک تا سطح زیرگروه می‌باشد. در مورد خاک‌هایی با حضور همزمان افق‌های ناتریک، جیپسیک و سالیک در فاصله ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک، زیرگروه جدید

جیپسیک ناترسالیدز به این سامانه پیشنهاد می‌شود. از طرفی، تعریف افق سالیک با ویژگی‌های میزان قابلیت هدایت الکتریکی حداقل ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر و حاصلضرب ضخامت در قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر از ۴۵۰، در سامانه رده‌بندی آمریکایی توصیه می‌گردد.

در مورد خاک‌های شور و سدیمی، طبقه‌بندی جهانی نسبت به رده‌بندی آمریکایی کارایی بهتری دارد؛ چرا که در بحث مدیریتی گاه‌ا تأثیر افق ناتریک از افق سالیک مهمتر است، زیرا سدیم باعث پراکنده شدن ذرات خاک و تخریب ساختمان خاک شده و از طرفی اصلاح آن سخت‌تر از خاک‌های فقط شور می‌باشد.

نتایج در مورد خاک‌های گچی نشان‌دهنده کارایی سامانه طبقه‌بندی جهانی نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی می‌باشد، زیرا به میزان تجمع گچ توجه کرده که در بحث‌های مدیریتی خاک‌های گچی نقش مهمی دارد.

یکی از ضعف‌های سامانه طبقه‌بندی جهانی، عدم توجه به افق انهیدریتیک می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد که این افق به افق‌های سامانه مزبور اضافه گردد. از طرفی، عدم توجه سامانه رده‌بندی آمریکایی به علامت اختصاری مستقل برای این افق نسبت به افق جیپسیک، علامت‌های اختصاری Ba و Baa پیشنهاد می‌گردند.

جدول ۳- طبقه‌بندی خاک‌های مورد مطالعه بر اساس سامانه‌های آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵)
Table 3- Classification of the studied pedons based on Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) systems

Pedon no.	Classification system		پیشنهادهای	
	Soil Taxonomy (2014)	WRB (2015)	Soil Taxonomy (2014)	WRB (2015)
	سامانه رده‌بندی		Suggestions	
1	Loamy-skeletal, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Gypsiargids	Skeletal Luvic Calcisol (Hypocalcic, Ochric, Pantoloamic, Yermic)	Calcic Gypsiargids	توجه به نقش افق جیپسیک برای این نوع خاک‌ها در سطح ۱۵۰ سانتی‌متری به‌عنوان یک توصیف‌کننده Considering role of gypsum horizon for this type of soils at the level of 150 cm as a qualifier
2	Loamy-skeletal, Mixed, calcareous, Hyperthermic Typic Torrifluvents	Calcaric Skeletic Pantofluvic Fluvisol (Anoarenic, Endoloamic, Ochric, Yermic)	Yermic Torrifluvents	-
3	Sandy-skeletal, Mixed, Hyperthermic Typic Torriorthents	Calcaric Skeletic Regosol (Epiloamic, Katoarenic, Ochric, Yermic)	Yermic Torriorthents	-
4	Loamy-skeletal, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Haplocalcids	Calcaric Skeletic Cambisol (Anoloamic, Endoarenic, Ochric, Protocalcic, Yermic)	-	احتیاط کردن: تعریف افق کلسیک در مورد خاک‌هایی با بافت درشت و سنگ‌زردار با میزان کرنیت کلسیم ۵ درصد برای سامانه طبقه‌بندی جهانی Considering the definition of calcic horizon for coarse textured soils having rock fragment with 5% calcium carbonate for WRB classification system
5	Loamy, Gypsic, Superactive, Hyperthermic Gypsic Haplosalids	Gypsic Salic Solonetz (Cutanic, Differentic, Ochric, Pantoloamic, Yermic)	Gypsic Natrsalids	-
6	Loamy, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Calcigypsid	Calcic Gypsisol (Anoloamic, Endoarenic, Hypogypsic, Ochric)	توجه به میزان تجمع گچ Attention to the amount of gypsum accumulation توجه به تعریف افق سالیک به مانند سامانه طبقه‌بندی جهانی	-
7	Loamy, Mixed, Superactive, Thermic Typic Natrigypsid	Calcic Gypsic Salic Solonetz (Cutanic, Differentic, Ochric, Pantoloamic, Yermic)	Attention to the definition of the salic horizon similar to the WRB classification system	-
8	Loamy-skeletal, Gypsic, Superactive, Hyperthermic Anhydritic Haplosalids	Calcic Gypsic Sodic Solonchak (Calcaric, Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Ochric, Skeletic, Pantoloamic, Yermic)	Anhydritic Gypsisalids, Anhydritic calcsalids Ba, Baa	Anhydritic Horizon
9	Sandy-skeletal, Mixed, Hyperthermic Typic Torrifluvents	Calcaric Pantofluvic Fluvisol (Epiloamic, Katoarenic, Ochric, Yermic)	Yermic Torrifluvents	
10	Fine, Mixed, Active, Hyperthermic Typic Aquisalids	Sodic Solonchak (Calcaric, Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Ochric, Pantoclayic, Puffic)	-	Aquic qualifier

منابع

- 1- Artieda O., Herrero J., and Drohan P.J. 2006. Refinement of the differential water loss method for gypsum determination in soils. *Soil Science Society American Journal* 70: 1932-1935.
- 2- Bahmani M., Salehi M.H., and Esfadiarpour I. 2014. Comparison of Soil Taxonomy and WRB for description of soil properties in some arid and semiarid regions of Central Iran. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resource, Water and Soil Science* 18: 11-21. (In Persian with English abstract)
- 3- Banaie M.H. 1998. Soil Moisture and Temperature Regimes Map of Iran. Soil and Water Research Institute of Iran, Iran.
- 4- Bower C.A., and Hatcher J.T. 1966. Simultaneous determination of surface area and cation exchange capacity. *Soil Science Society American Journal* 30: 525-527.
- 5- Deckers J., Driessen P., Nachtergaele F.O.F., Spaargaren O., and Berding F. 2003. Anticipated developments of the world reference base for soil resources. In: Eswaran, H., Rice, T., Ahrens, R., Stewart, B.A. (Eds.), *Soil Classification: A Global Desk Reference*. CRC PRESS, Boca Raton, London, New York, Washington, DC. pp. 245-256.
- 6- Esfandiarpour Boroujeni I., Farpoor M.H., and Kamali A. 2011. Comparison between Soil Taxonomy and WRB for Classifying Saline Soils of Kerman Province. *Journal of Water and Soil* 25(5): 1158-1171.
- 7- Esfandiarpour Boroujeni I., Salehi M.H., Karimi A., and Kamali A. 2013. Correlation between soil taxonomy and World Reference Base for soil resources in classifying calcareous soils: (A case study of arid and semi-arid regions of Iran). *Geoderma* 197-198: 126- 136.
- 8- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. Agron. Monger, No Vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 388-409.
- 9- Gerasimova M.I. 2010. Chinese soil taxonomy: between the American and the international classification systems. *European Soil Science* 43(8): 945-949.
- 10- IUSS Working Group WRB. 2007. World reference base for soil resources 2006, first update 2007. *World Soil Resources Reports No. 103*. FAO, Rome.
- 11- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. P. 181-196. In: A. L. Page et al. (ed), *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed., Agron. Monogar. No: 9. ASA and SSSA. Madison, WI.
- 12- Nelson D.W. and Sommers L.E. 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. p. 539-577. In: A. L. Page et al (Ed), *Methods of Soil Analysis*. Part II. 2nd ed., Agron. Monogar. No: 9. ASA and SSSA. Madison, WI.
- 13- Sarmast M., Farpoor M.H., and Esfandiarpour Boroujeni I. 2016. Comparing Soil Taxonomy (2014) and updated WRB (2015) for describing calcareous and gypsiferous soils, Central Iran. *Catena* 145: 83-91.
- 14- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Soil Survey Staff. 2012. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- 15- Secu C.V., Patriche C., and Vasiliniuc I. 2008. Aspects regarding the correlation of the Romanian soil taxonomy system (2003) with WRB (2006). *Ірунтознавство* 9: 56-62.
- 16- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- 17- Toomanian N., Jalalian A., and Eghbal M.K. 2003. Application of the WRB (FAO) and US taxonomy systems to gypsiferous soils in Northwest Isfahan. *Iran Journal Agriculture Science Technology* 5: 51-66. (In Persian with English abstract)
- 18- Wilson M.A., Shahid S.A., Abdelfattah M.A., Kelley J.A., and Thomas J.E. 2013. Anhydrite formation on the Coastal Sabkha of Abu Dhabi, United Arab Emirates. In: Shahid, S.A., Taha, F.K., Abdelfattah, M.A. (Eds.), *Developments in Soil Classification, Land Use Planning and Policy Implications: Innovative Thinking of Soil Inventory for Land Use Planning and Management of Land Resources*. Springer SBM Publishing, Netherlands, pp. 175-201.
- 19- WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.



Comparison of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in Classification of Soils in Iranshahr and Dalghan Regions, Sistan and Baloochestan Province

S. Sanjari¹- M.H. Farpoor^{2*} - M. Mahmoodabadi³- S. Barkhori⁴

Received: 27-04-2020

Accepted: 21-07-2020

Introduction Increasing demand for an international classification system as a unique communication tool in soil science has caused development of different systems. Like many other countries, Soil Taxonomy and WRB are the most popular soil classification systems in Iran. Genetic and morphologic soil properties are used for soil classification in both systems. However, correlation of the two systems and efforts to harmonize them have been a major concern among soil scientists. Comparing Soil Taxonomy and WRB in gypsiferous and calcareous soils of central Iran, Sarmast et al. (13) reported that WRB using various qualifiers is more effective than Soil Taxonomy. Since no study on soils of Iranshahr and Dalghan Regions located in Sistan and Baloochestan Province has performed and/or no reported data is available, the present research was performed to: 1) study morphological, physical, and chemical soil properties in the area, 2) classify soils based on Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) systems, 3) compare the two systems for soil description in Iranshahr and Dalghan regions as a part of Sistan and Baloochestan Province, central Iran.

Material and Methods: The study area starts from Iranshahr (590 m asl) in the center of the province and extends to Dalghan (390 m asl) in west. Alluvial fan, pediment, playa, and hill were among different landforms identified using field studies, topography maps (1:50000), and Google Earth image observations. To cover the maximum soil variations in the area, 10 representative pedons were selected, described, and sampled.

Results and Discussions: Calcic, gypsic, anhydritic, argillic, natric, and salic horizons identified after field work and laboratory analysis. Results of the study showed that addition of Yermic Torrifluent, Yermic Torriorthent, Calcic Gypsiargid, Gypsic Natrsalid, Natric Gypsisalid, Anhydritic Gypsisalid, Anhydritic Calcisalid subgroups to Soil Taxonomy system from one hand, and addition of anhydrite and aquic (for Solonchak reference soil group) qualifiers to WRB system from the other hand, causes a higher correlation and more harmonization between the two classification systems. Meanwhile, the minimum percentage of calcium carbonate equivalent necessary for calcic horizon identification in coarse textured soils including gravel in Soil Taxonomy is also suggested to be added to WRB system. Besides, requirements of salic horizon in WRB system is recommended to be added to Soil Taxonomy. At the same time, soil names in WRB system provide more information and data about soil properties and characteristics in young soils (such as yermic qualifier showing desert pavement) compared to Soil Taxonomy. Soil Taxonomy is not able to properly classify saline soils of arid regions down to subgroup level which is a weak point for this system. That is why newly added Gypsic Natrsalids is suggested for soils with natric, gypsic, and salic horizons in the upper 100 cm of the soil. On the other hand, the requirements of salic horizon in WRB system (the minimum EC content of 15 dS/m and the EC multiplied by the horizon thickness of more and/or equal to 450) are also suggested for Soil Taxonomy.

Conclusion: Results of the study for both saline and sodic soils show more capability of WRB system compared to Soil Taxonomy to classify soils. From soil management point of view, natric horizon causes more negative effects compared to salic horizon because Na disperses the soil particles and destroys soil structure and sodic soils need more practices to be improved compared to saline soils. Results for gypsiferous soils also show more capability of WRB system compared to Soil Taxonomy because gypsum content which is important for gypsiferous soils management is properly concerned in WRB system. However, lack of anhydritic horizon in WRB seems to be a weak point for this classification system. That is why it is suggested to be added to WRB (13). Since Soil Taxonomy does not use independent abbreviations for anhydritic horizon compared to gypsic horizon, the Ba and Baa abbreviations are also suggested for Soil Taxonomy to be added.

Keywords: Iran, Calcareous, Gypsiferous, Saline, Soil correlation

1, 2 and 3- Ph.D. Student and Professors Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: farpoor@uk.ac.ir)

4- Assistant Professor, Nature Engineering Department, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Iran

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86203



مقاله علمی-پژوهشی

بررسی مقایسه‌ای اثر تیمارهای آلی، زیستی و اسیدزا بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی در یک خاک آهکی

شنو حقیقی^۱ - زاهد شریفی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۵

چکیده

علی‌رغم وجود میزان فراوان عناصر غذایی در خاک‌های آهکی، فرم قابل جذب این عناصر کمتر از میزان لازم برای رشد و نمو بهینه گیاهان است. از طرفی این خاک‌ها، معمولاً در اقلیم خشک و نیمه خشک با کمی مواد آلی مواجه هستند که کمبود قابلیت دسترسی عناصر را تشدید می‌نماید. بنابراین کمبود عناصر غذایی یکی از عوامل مهم محدود کننده تولید محصول در این خاک‌هاست. پژوهش‌های زیادی در رابطه با افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک‌های آهکی انجام شده است اما پژوهشی که تمام این روش‌ها را با هم مقایسه کند و بهترین راهکار را پیشنهاد نماید تاکنون انجام نشده است. بنابراین این پژوهش با هدف افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در یک خاک آهکی با کاربرد نه تیمار شامل، شاهد (خاک بدون تیمار) (Blank)، خاک + اسید هیومیک (HA)، خاک + اسید سولفوریک (H_2SO_4)، خاک + تیوباسیلوس (T)، خاک + گوگرد (S^0)، خاک + گوگرد + تیوباسیلوس (S^0+T)، خاک + ورمی کمپوست (VC)، خاک + ورمی کمپوست + تیوباسیلوس (VC+T) و خاک + گوگرد + ورمی کمپوست + تیوباسیلوس (S^0+VC+T)، هر کدام در ۳ تکرار به مدت ۹۰ روز در شرایط آزمایشگاه مورد انکوباسیون قرار گرفت. آنالیز نتایج این پژوهش با بهره‌گیری از آمار کلاسیک نشان داد که به دلیل ظرفیت بالای بافری خاک‌های آهکی و پیچیده بودن عواملی که حلالیت کانی‌ها و قابلیت دسترسی عناصر غذایی در این خاک‌ها را کنترل می‌کنند، کاربرد منفرد تیمارهای مورد بررسی اثر چشم‌گیری بر قابلیت دسترسی عناصر غذایی در این خاک‌ها را ندارند، اما اثر تیمار S^0+VC+T در افزایش شاخص‌های مورد بررسی به طور معنی‌داری بیش از اثر تیمارهای S^0+T و VC+T بود. بنابراین به نظر می‌رسد، کاربرد توأم تیمارهای آلی، بیولوژیک و گوگرد عنصری که به‌طور همزمان تأمین کننده منبع انرژی و کربن برای جامعه میکروبی خاک و سبب کاهش pH خاک می‌شوند، به‌گونه چشم‌گیری می‌توانند موانع بر سر راه افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی را در خاک‌های آهکی رفع نمایند. بنابراین کاربرد همزمان تیمار کودهای آلی، گوگرد عنصری و باکتری تیوباسیلوس (S^0+VC+T) می‌تواند یک رویکرد امیدوارکننده در راستای افزایش حلالیت عناصر غذایی در خاک‌های آهکی باشد.

واژه‌های کلیدی: اسید هیومیک، باکتری تیوباسیلوس، خاک آهکی، گوگرد، قابلیت دسترسی عناصر غذایی، ورمی کمپوست

مقدمه

آمده از این خاک‌ها را به مخاطره می‌اندازد (۵۳). خاک‌های آهکی با مساحت حدود ۶۰۰ میلیون هکتار که غالباً در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، دارای pH در دامنه ۷/۵ تا ۸/۵ و آهک از میزان ناچیز تا ۹۵٪ می‌باشند (۳۱ و ۳۴). در این خاک‌ها به دلیل بالا بودن pH و فراوانی کلسیم به‌رغم فراوانی برخی از عناصر غذایی مانند فسفر، شکل‌های قابل جذب این عناصر کمتر از نیاز گیاهان است و بنابراین رشد گیاهان در این خاک‌ها اغلب با کمبود عناصر غذایی محدود می‌شود (۲۱). از سال ۱۹۶۰ تاکنون از مواد اسیدزا مانند گوگرد، اسید سولفوریک، اسید فسفریک و اوره برای کاهش pH خاک‌های آهکی جهت افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی استفاده شده است که گوگرد قدیمی‌ترین و رایج‌ترین آنهاست (۳۶). گوگرد پس از اضافه شدن به خاک، در اثر فرآیندهای شیمیایی و میکروبی به

یکی از نگرانی‌هایی که در دهه‌های اخیر توجه بسیاری از محافل علمی را به خود جلب کرده است، کمبود و عدم تعادل عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان در خاک است. زیرا این دو معضل با کاهش میزان جذب عناصر غذایی توسط ریشه ضمن کاهش رشد و توسعه گیاهان، سلامت انسان و حیوانات تغذیه کننده از محصولات کشاورزی به بار

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان

(*)- نویسنده مسئول: (Email: z.sharifi@uok.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86182

گیاه گوجه‌فرنگی گزارش شده است (۴۳). پژوهش‌های بسیاری در رابطه با اثر تیمارهای مختلف بر افزایش میزان قابلیت جذب عناصر غذایی در خاک‌های آهکی انجام شده است اما پژوهشی در رابطه با مقایسه همزمان این تیمارها و شناخت کاراترین تیمار در دست نیست، بنابراین این پژوهش به بررسی همزمان ورمی کمپوست، گوگرد عنصری، باکتری تیوباسیلوس، اسید سولفوریک و اسید هیومیک به تنهایی و یا به‌صورت ترکیبی بر افزایش میزان قابلیت دسترسی عناصر غذایی در یک خاک آهکی می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

تیمارهای پژوهش

برای اجرای این پژوهش یک نمونه خاک زراعی آهکی از ژرفای ۳۰-۰ سانتی‌متری از یک مزرعه گندم شهرستان دهگلان واقع در استان کردستان بعد از برداشت محصول نمونه‌برداری شد و بلافاصله به آزمایشگاه منتقل گردید. در آزمایشگاه پس از نرم کردن کلوخه‌ها و برداشتن پس‌مانده‌های گیاهی، از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. ورمی کمپوست کود گاوی نیز از یک سایت تولید ورمی کمپوست واقع در روستای سراب قامیش از توابع شهرستان سنندج تهیه گردید. مایه تلقیح باکتری گونه تیوباسیلوس تیوپاروس (*Thiobacillus thioparus* PTCC 1686) نیز از سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران تهیه شد. سپس یک کیلوگرم خاک در ظروف تمیز یک لیتری ریخته شد و برای حفظ نفوذپذیری و تهویه خاک ۱۰۰ گرم سنگریزه که به ترتیب با آب شهر، آب مقطر، اسید کلریدریک ۰/۱ مولار و با آب مقطر شستشو داده شد و در نهایت در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد خشک شد، اضافه گردید و تیمارهای پژوهشی شامل ۹ تیمار هر کدام در ۳ تکرار در قالب طرح کاملاً تصادفی به شرح زیر تهیه شدند:

۱. خاک بدون تیمار (شاهد)
۲. خاک + اسید هیومیک (۱/۵ g/kg soil)
۳. خاک + اسید سولفوریک (رساندن رطوبت خاک به ۷۰٪ ظرفیت زراعی با آب مقطر که pH آن با اسید سولفوریک به ۵ تا ۵/۵ رسانده شده بود)
۴. خاک + باکتری تیوباسیلوس (به تعداد ۱۰^۴ عدد در هر گرم خاک)
۵. خاک + گوگرد عنصری (۱ t S^۰/ha)
۶. خاک + گوگرد عنصری (۱ t S^۰/ha) + باکتری تیوباسیلوس (به تعداد ۱۰^۴ عدد در هر گرم خاک)
۷. خاک + ورمی کمپوست (۱۲ t/ha)
۸. خاک + ورمی کمپوست (۱۲ t/ha) + باکتری تیوباسیلوس (به تعداد ۱۰^۴ عدد در هر گرم خاک)

اسید سولفوریک تبدیل شده که موجب کاهش pH خاک می‌شود (۶۱). البته باید به این نکته توجه نمود که شرط اصلی اثر بخشی گوگرد، سرعت اکسایش آن به سولفات است تا بتواند ضمن تأمین نیاز گوگردی گیاه با کاهش pH در ریزجایگاه‌های خاک به ویژه ریزوسفر، قابلیت جذب سایر عناصر غذایی را از راه افزایش حلالیت ترکیبات نامحلول مانند اکسیدها، کربنات‌ها و سیلیکات‌ها بهبود بخشد (۵۴). تحقق این شرط مستلزم وجود جمعیت بالایی از ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد عنصری یعنی باکتری‌های جنس تیوباسیلوس^۱ می‌باشد (۵۶). به گونه‌ای که پژوهش‌ها نشان داده‌اند، اکسایش گوگرد در خاک‌های تلقیح شده با باکتری‌های تیوباسیلوس حدود ۱۱ برابر بیشتر از خاک‌های تلقیح نشده است (۸). در پژوهش دیگری ساکاری و همکاران (۴۵) چنین گزارش کردند که مصرف گوگرد به همراه باکتری تیوباسیلوس سبب افزایش عملکرد کلزا و نیز حلالیت فسفر، آهن و روی در خاک‌های آهکی شد. از طرفی، بیشتر خاک‌های آهکی به دلیل شرایط اقلیمی حاکم بر آن‌ها از فقر مواد آلی رنج می‌برند. در حالی که ماده آلی در بهبود بسیاری از ویژگی‌های خاک از جمله افزایش میزان کل و قابل جذب عناصر غذایی خاک، خاکدانه‌سازی، ظرفیت نگه‌داشت آب خاک و تنوع و فراوانی جانداران خاک بسیار مؤثر است (۴۸). همچنین ریزجانداران اکسیدکننده گوگرد (تیوباسیلوس‌ها) زمانی در اکسایش گوگرد و افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی کارا خواهند بود که همگام با تلقیح آن‌ها به خاک، ماده آلی نیز مصرف شود (۵۲). در این راستا کاهش pH خاک با به‌کارگیری گوگرد (۴۷)، کود گاوی (۱۴) و باکتری تیوباسیلوس (۴) گزارش شده است. سجادی‌نیک و همکاران (۴۴) چنین گزارش کردند که مصرف ورمی کمپوست در مقایسه با مصرف کودهای شیمیایی باعث افزایش میزان کلروفیل، جذب عناصر نیتروژن، پتاسیم، فسفر، پروتئین و عملکرد دانه در گیاه کنجد شد. افزون بر گوگرد و ماده آلی، در سال‌های اخیر کاربرد اصلاح‌کننده‌های دیگری در راستای افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی در خاک‌های آهکی صورت گرفته است. گزارش شده است که اسید هیومیک با افزایش قابلیت جذب نیتروژن، پتاسیم، فسفر، کلسیم، منگنز، روی و آهن، همچنین افزایش میزان جذب آب، میزان کلروفیل و انتقال مواد فتوسنتزی سبب بهبود رشد و افزایش عملکرد در گیاهان می‌شود (۶۳). اخیراً نیز غلامی و شریفی (۶۷) چنین گزارش کردند که تیمار خاک‌های آهکی با پودر خون کشتارگاه سبب افزایش میزان قابل دسترس عناصر غذایی کم‌پرمصرف و کم مصرف گیاهان می‌شود. همچنین در پژوهشی اثر افزایشی معنی‌دار اسید سولفوریک در افزایش میزان قابلیت جذب فسفر و آهن خاک و همچنین افزایش میزان ماده خشک و عملکرد در

نیز به روش برمنر و کینی (۱۳) اندازه‌گیری شدند.

آنالیزهای آماری

داده‌های به‌دست آمده برای تجزیه واریانس یک طرفه و مقایسه میانگین‌ها با روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS9 انجام شد، بنابراین در سرتاسر این مقاله منظور از معنی‌داری، سطح احتمال ۵ درصد است. همچنین نمودارهای مربوطه با استفاده از نرم‌افزار EXCEL رسم شدند.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک و کمپوست مورد استفاده در این پژوهش

خاک استفاده شده در این پژوهش دارای بافت لومی، pH قلیایی (۸/۰۱)، ماده آلی ۱/۷٪ و غیرشور ($0/20 \text{ dSm}^{-1}$) می‌باشد (جدول ۱). همچنین میزان فسفر و پتاسیم قابل دسترس این خاک به ترتیب ۷/۶ و $255/3 \text{ mgkg}^{-1}$ به‌دست آمد. با توجه به این نتایج و با در نظر گرفتن حد آستانه ۳/۴٪ ماده آلی برای بیشتر خاک‌ها، خاک مورد پژوهش در کلاس کم ماده آلی قرار دارد (۶۶). همچنین با توجه به استاندارد مؤسسه تحقیقات خاک و آب، میزان فسفر این خاک در حد کم ($5-10 \text{ mgkg}^{-1}$) و میزان پتاسیم آن در حد بهینه (200 mgkg^{-1}) برای کشت گندم بر اساس آزمون خاک می‌باشد (۴۱). همچنین میزان آهن، روی، مس و منگنز قابل دسترس در خاک مورد بررسی به ترتیب ۰/۳۲، ۱/۲۰، ۱/۳۱ و $7/16 \text{ mgkg}^{-1}$ به‌دست آمد (جدول ۲) که بر اساس استاندارد مؤسسه تحقیقات خاک و آب، این خاک دارای کمبود آهن و منگنز برای کشت گندم می‌باشد (۴۱). میزان هدایت الکتریکی و pH در کمپوست مورد استفاده در این پژوهش، به‌ترتیب ۸/۹۷ و $1/29 \text{ dSm}^{-1}$ بود (جدول ۲). میزان کل عناصر روی، مس، سرب و نیکل در ورمی‌کمپوست به ترتیب ۹۴، ۱۹، $21/67 \text{ mgkg}^{-1}$ و $49/11$ به‌دست آمد، که نسبت به حدود مجاز این عناصر به ترتیب ۲۵۰-۲۰۰، ۲۰۰-۱۰۰، $150-300$ و 60 mgkg^{-1} برای کودهای آلی بر طبق استاندارد ملی استرالیا محدودیتی از نظر عناصر یادشده برای استفاده از این کود در خاک جهت اهداف کشاورزی وجود ندارد. همچنین میزان کل کادمیم در ورمی‌کمپوست برابر با 2 mgkg^{-1} به‌دست آمد که در مقایسه با استاندارد کشورهای فنلاند، ایتالیا، فرانسه و اتریش که برابر 3 mgkg^{-1} است، ورمی‌کمپوست مورد استفاده فاقد محدودیت برای استفاده جهت اهداف کشاورزی است (۶۵) (جدول ۳).

۹. خاک + گوگرد عنصری ($1 \text{ t S}^0/\text{ha}$) + ورمی‌کمپوست (12 t/ha) + باکتری تیوباسیلوس (به تعداد 10^4 عدد در هر گرم خاک) رطوبت تمامی تیمارها با آب مقطر (به جز تیمار اسید سولفوریک) به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی رسانده شد و به مدت ۹۰ روز در دمای آزمایشگاه ($25 \pm 2^\circ \text{C}$) انکوباسیون شدند. در طول آزمایش کسر رطوبت تیمارها تا رطوبت فوق‌الذکر به صورت وزنی با آب مقطر جبران می‌شد. اما تیمار اسید سولفوریک با آب مقطری که pH آن با اسید سولفوریک بر روی ۵ تا $5/5$ تنظیم شده بود به ۷۰ درصد ظرفیت زراعی رسانده شد و جبران کسر رطوبتی آن در طول آزمایش با همین محلول بود. یادآوری می‌شود همان‌گونه که در تیمار شماره ۱ آمده است در این پژوهش خاک نقطه صفر آزمایشی شاهد نبوده است، بلکه شاهد، خاک بدون هیچ تیماری بود که شرایط رطوبتی و دمایی آزمایش در طول انکوباسیون بر آن اعمال شد تا تغییرات ذاتی خود خاک تحت این شرایط نیز در نظر گرفته شود.

آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک و کود

در پایان انکوباسیون نمونه‌های خاک در هر تیمار به همراه ورمی‌کمپوست و خاک اولیه که تا انجام آزمایشات در یخچال در دمای 20°C - درجه سانتی‌گراد نگهداری شده بودند، همه هوا خشک شدند و با استفاده از روش‌های استاندارد زیر آنالیز شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (۱۱)، میزان کربن آلی کل به روش اکسیداسیون تر (۴۰)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی (۳۲)، میزان pH و شوری در سوسپانسیون نسبت ۱ به ۵ (کمپوست به آب) و ۱ به ۲ (خاک به آب) به ترتیب به کمک دستگاه pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد. میزان کل عناصر در کمپوست به روش اکسایش خشک و در خاک به روش اکسایش تر با بهره‌گیری از محلول HCl:HNO_3 (3:1) (۲۴) انجام شد. عصاره‌های تهیه شده تا انجام آزمایش‌ها در دمای 4°C در یخچال نگهداری شدند. در عصاره‌های به‌دست آمده میزان کل کلسیم و منیزیم به روش کمپلکسومتری (۱۰)، پتاسیم به روش نشر اتمی به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر، فسفر به روش رنگ‌سنجی (۳۸) به کمک دستگاه اسپکتروفتومتر و همچنین میزان کل عناصر کم‌مصرف (منگنز، آهن، مس و روی) و همچنین میزان قابل دسترس این عناصر با روش عصاره‌گیری با آمونیوم بی‌کربنات دی‌اتیلن تری آمین پنتا استیک اسید^۱ (۶۰) عصاره‌گیری شدند. تمامی فلزات یاد شده (کل و قابل دسترس) به کمک دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شدند. همچنین نیتروژن کل به روش کجلدال اندازه‌گیری شد (۱۲). آمونیوم و نترات

1- Ammonium Bicarbonate Diethylene Triamine Penta Acetic acid (AB DTPA)

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و ورمی کمپوست (میانگین $\pm$ خطای استاندارد)Table 1- Some physical and chemical properties of soil and vermicompost (Values are means of three replicates $\pm$ the standard errors)

کربنات کلسیم معادل (%)	نیتروژن کل (%)	ماده آلی (%)	هدایت الکتریکی (dS/m)	واکنش خاک pH	بافت Texture
Equivalent calcium carbonate (%)	Total nitrogen (%)	Organic matter (%)	Electrical conductivity (dS/m)	pH	
24.91 $\pm$ 0.22	0.1 $\pm$ 0.00	1.66 $\pm$ 0.02	0.20 $\pm$ 0.00	8.01 $\pm$ 0.03	لوم Loam
-	1.65 $\pm$ 0.02	60.87 $\pm$ 1.37	1.29 $\pm$ 0.02	8.97 $\pm$ 0.16	-
					خاک Soil
					ورمی کمپوست Vermicompost

جدول ۲- مقادیر کل و قابل دسترس عناصر غذایی در خاک مورد پژوهش پیش از اعمال تیمارها (میانگین $\pm$ خطای استاندارد)Table 2- Total and available nutrient amounts in the soil under study before treatments (mean $\pm$ standard error)

کلسیم Ca	منیزیم Mg	فسفر P	پتاسیم K	آمونیم NH ₄	نترات NO ₃	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn	مس Cu
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)
4.86 $\pm$ 0.20	1.18 $\pm$ 0.04	93.35 $\pm$ 2.77	1104.05 $\pm$ 73.74	-	-	12611.85 $\pm$ 735	46.53 $\pm$ 4.71	211.57 $\pm$ 27.87	24.43 $\pm$ 0.38
0.27 $\pm$ 0.03	0.05 $\pm$ 0.01	7.63 $\pm$ 0.49	255.30 $\pm$ 1.51	8.16 $\pm$ 0.67	5.96 $\pm$ 0.6	0.32 $\pm$ 0.10	1.20 $\pm$ 0.10	7.16 $\pm$ 0.66	1.31 $\pm$ 0.00

جدول ۳- مقادیر کل عناصر غذایی در ورمی کمپوست مورد پژوهش (میانگین $\pm$ خطای استاندارد)Table 3- Total and available amounts of nutrients in soil under study before treatments (mean $\pm$ standard error)

کلسیم Ca	منیزیم Mg	پتاسیم K	فسفر P	آهن Fe	روی Zn
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
2.20 $\pm$ 0.1	0.25 $\pm$ 0.0	5678.90 $\pm$ 164.3	1081.94 $\pm$ 22.6	6061.87 $\pm$ 312.8	94.44 $\pm$ 3.1
306.18 $\pm$ 14.0	19.26 $\pm$ 0.7	49.11 $\pm$ 1.7	2.06 $\pm$ 0.9	21.7 $\pm$ 2.38	

اثر تیمارهای آزمایشی بر ویژگی‌های خاک مورد بررسی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش اثر معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد بر شاخص‌های مورد بررسی داشته است (جدول ۴).

pH خاک

میزان pH در تمامی تیمارهایی که گوگرد عنصری حضور داشت، کاهش معنی‌داری را در مقایسه با شاهد (خاک بدون تیمار) از خود نشان دادند. نکته قابل توجه این که تیمار باکتری تیوباسیلوس به تنهایی سبب تغییر معنی‌داری در pH خاک نشد اما زمانی که این باکتری‌ها با گوگرد عنصری (S⁰+T) و یا همراه با ماده آلی و گوگرد عنصری (S⁰+VS+T) به صورت توأم به خاک اضافه گردید، کاهش بیشتری را در pH خاک سبب شدند. اما در مورد سایر تیمارها میزان

pH در مقایسه با شاهد تغییرات معنی‌داری نداشت، به جز تیمار ورمی کمپوست که این شاخص افزایش معنی‌داری داشت (شکل ۱). در هماهنگی با یافته‌های این پژوهش، محمدی آریا و همکاران (۳۷) و حیدرنازاد و همکاران (۲۲) کاهش معنی‌دار pH خاک را در اثر کاربرد گوگرد به همراه مایه تلقیح تیوباسیلوس گزارش کردند. همچنین برخی پژوهش‌ها به نقش مؤثر فراهمی گلوکز (ماده آلی) در تسریع اکسیداسیون گوگرد و کاهش معنی‌دار pH خاک (۲۷) و نیز کاربرد همزمان گوگرد، کود گاوی و باکتری تیوباسیلوس در کاهش میزان pH خاک را نسبت به حالتی که به تنهایی به کار می‌روند، اشاره کرده‌اند (۳، ۲۷). در این پژوهش کاهش pH خاک در نتیجه تیمار گوگرد + ورمی کمپوست + باکتری تیوباسیلوس ممکن است ناشی از تولید گاز کربنیک در طی فرآیند تجزیه مواد آلی و نیز نقش کود ورمی کمپوست به عنوان منبع کربن برای فعالیت بیشتر باکتری‌های اکسید کننده گوگرد باشد (۳۷).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس شاخص‌های مورد بررسی
 Table 4- Analysis of variance of the studied indicators

Table 1. Analysis of variance of the studied materials											
منابع تغییرات Sources of variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares									
		هدایت الکتریکی EC	واکنش خاک pH	فسفر P	پتاسیم K	آمونیم NH ₄	نیترات NO ₃	روی Zn	منگنز Mn	آهن Fe	مس Cu
تیمار Treatment	8	0.831*	0.604*	283.73*	40453.92*	1.963*	306.450*	0.054*	5.781*	1.031*	0.008*
خطا Error	18	0.002	0.003	5.388	81.370	0.480	58.54	0.004	1.066	0.0273	0.005
ضریب تغییرات Coefficient of variation	-	5.32	0.72	5.25	3.75	8.12	15.94	4.28	6.85	3.036	4.96

*: Significance at P<0.05 level

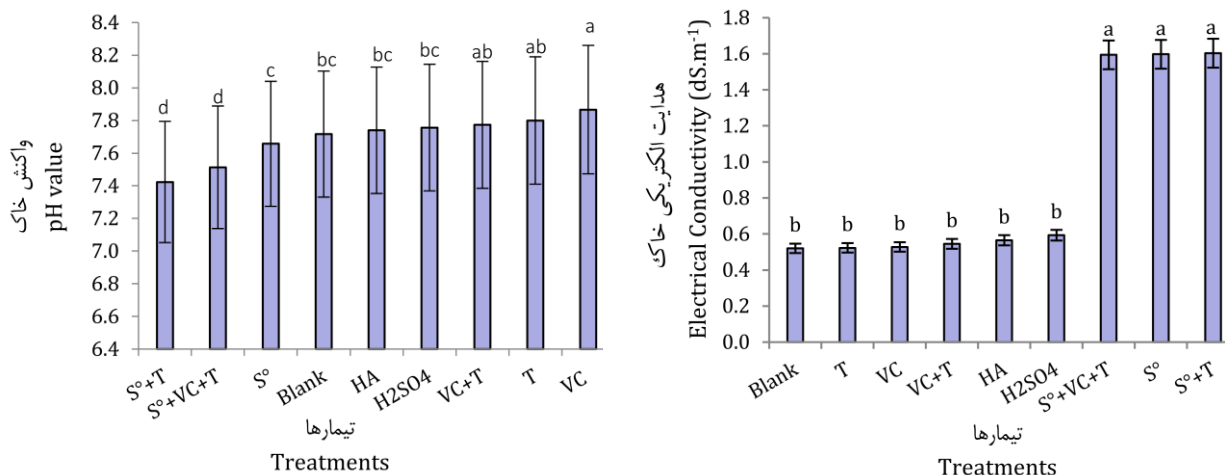
*: معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد

(۵۹) افزایش EC خاک ناشی از مصرف کمپوست را گزارش کرده‌اند، این پژوهندگان علت این امر را بالا بودن شوری خود کمپوست مصرف شده و نیز افزایش میزان عناصر محلول خاک ناشی از تجزیه آن بیان کرده‌اند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد در تیمارهایی که گوگرد و باکتری تیوباسیلوس حضور داشت، میزان افزایش EC نیز چشم‌گیرتر بود. این مسئله می‌تواند ناشی از افزایش شدت اکسیداسیون گوگرد و تولید اسید سولفوریک در حضور باکتری‌های اکسید کننده گوگرد باشد، این اسید با کربنات‌های خاک واکنش داده و آن‌ها را به سولفات‌های محلول تبدیل می‌کند (۴۷).

اما افزایش معنی‌دار pH در تیمار ورمی کمپوست می‌تواند ناشی از وجود آهک در این تیمار آلی و جذب پروتون توسط این ترکیبات و یا آزاد شدن یون هیدروکسیل و یون‌های قلیایی در جریان تجزیه مواد آلی باشد (۳۹).

هدایت الکتریکی خاک (EC)

میزان EC در تمامی تیمارهای مورد بررسی نسبت به شاهد افزایش یافت، اما این افزایش فقط در تیمارهایی معنی‌دار بود که در آن‌ها گوگرد به تنهایی (S⁰) و یا همراه با باکتری تیوباسیلوس (S⁰+T) و یا همراه با ماده آلی و باکتری تیوباسیلوس (S⁰+VS+T) حضور داشت (شکل ۱). در هماهنگی با این نتایج، وانگ و همکاران



شکل ۱ - واکنش و هدایت الکتریکی خاک تیمارهای مورد پژوهش، Blank: شاهد، HA: اسید هیومیک، H₂SO₄: اسیدسولفوریک، T: باکتری تیوباسیلوس، S⁰: گوگرد عنصری، VC: ورمی کمپوست، S⁰+T: گوگرد عنصری+باکتری تیوباسیلوس، VC+T: ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس، S⁰+VC+T: گوگرد عنصری+ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس. حروف متفاوت بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌ها در هر تیمار به روش دانکن در پایه آماری ۵ درصد می‌باشد.

Figure 1- pH and electrical conductivity (EC) of examined soil variables (mean ± SE). Humic Acid (HA), Sulfuric acid (H₂SO₄), Thiobacillus bacteria (T), Sulfur (S⁰), Sulfur + Thiobacillus bacteria (S⁰+T), Vermicompost (VC), Vermicompost + Thiobacillus bacteria (VC+T), and Sulfur + Vermicompost + Thiobacillus bacteria (S⁰+VC+T). Different superscript letters indicate significant differences (P<0.05) between means.

عناصر پرمصرف

فسفر قابل دسترس

تیمارهایی که کود آلی دریافت کردند و یا این که این کودها به همراه گوگرد و باکتری تیوباسیلوس به کار رفت، افزایش معنی داری در میزان فسفر قابل دسترس خاک را سبب شدند اما سایر تیمارها تغییرات معنی داری را در رابطه با این شاخص نسبت به تیمار شاهد از خود نشان ندادند (شکل ۲). در هماهنگی با این یافته ها، پژوهش ها نشان داده اند در اثر تجزیه مواد آلی همچون ورمی کمپوست، یون هومیک، یون هومات، آنیون های آلی و دی اکسید کربن تولید می شود که یون هومیک به راحتی برای گیاه قابل جذب است، یون هومات سبب رهاسازی فسفات های جذب سطحی شده می شود و آنیون های آلی از طریق پیوند با آهن و آلومینیوم سبب کاهش تثبیت فسفر خواهند شد. از طرفی خود ماده آلی می تواند با پوشش دادن سطح کلوئیدهای خاک، اکسیدهای آهن و آلومینیوم و کربنات کلسیم از جذب و بی جنبش کردن فسفر توسط این ترکیبات بکاهد (۳۳ و ۱۵). در هماهنگی با یافته های سیدی و همکاران (۴۷) در این پژوهش در تیماری که باکتری تیوباسیلوس و ورمی کمپوست به همراه هم اعمال شده بود، بیشترین میزان فسفر قابل دسترس به دست آمد. همچنین در پژوهش دیگری در راستای یافته های این پژوهش، میرانصاری و اسمیت (۳۵) مشاهده کردند که اکسایش گوگرد به کمک تیوباسیلوس ها منجر به کاهش pH خاک و افزایش حلالیت فسفر می شود. در این پژوهش تیماری که گوگرد به تنهایی و یا همراه با باکتری تیوباسیلوس به کار رفته است، علی رغم کاهش pH، فسفر قابل دسترس خاک افزایش نیافته است (شکل ۱ و ۲). به نظر می رسد، اسید سولفوریک تولید شده توسط این باکتری ها ضمن کاهش pH خاک با کربنات کلسیم خاک واکنش داده و آن ها را به گچ تبدیل کرده که محلول تر از کربنات کلسیم بوده و غلظت کلسیم را در محلول خاک افزایش داده و این امر باعث تثبیت فسفر به صورت فسفات های مختلف کلسیم می شود (۲۲ و ۵۷). در تأیید این مطلب کوچک زاده (۲۹) گزارش کرد که هر چند که pH خاک در اثر کاربرد گوگرد کاهش می یابد اما در pH های بالاتر از ۷/۵ که عموماً یون کلسیم فعال فراوانی حضور دارد، فسفر محلول عمدتاً به صورت فسفات های کلسیم رسوب می کند. همچنین سفونیتس و لیندمن (۱۶) گزارش نمودند که به کارگیری گوگرد عنصری در خاک های آهکی اثری بر میزان فسفر قابل دسترس خاک نداشته است و دلیل این امر را ظرفیت بافری خاک عنوان کرده اند.

پتاسیم قابل دسترس خاک

تیمارهایی که ورمی کمپوست، گوگرد و باکتری تیوباسیلوس در آن ها حضور داشت و تیمار اسید سولفوریک در مقایسه با تیمار شاهد افزایش معنی داری را در میزان پتاسیم قابل دسترس خاک سبب شدند. در حالی که سایر تیمارها در رابطه با این شاخص تغییرات معنی داری را در مقایسه با شاهد از خود نشان ندادند (شکل ۲). این نتیجه در پژوهش های دیگر نیز گزارش شده است (۴۲). پژوهندگان علت این امر را آزادسازی پتاسیم ناشی از تجزیه مواد آلی توسط ریزجانداران خاک و کاهش تثبیت و افزایش حلالیت پتاسیم ناشی از افزایش مواد آلی خاک گزارش کرده اند. یکی دیگر از دلایل افزایش پتاسیم قابل دسترس در این خاک می تواند جایگزینی آمونیوم ناشی از تجزیه کودهای نیتروژنی با پتاسیم در جایگاه های تبادلی باشد. همچنین در این پژوهش زمانی که گوگرد عنصری به تنهایی به کار رفته است، اثری بر میزان پتاسیم قابل دسترس خاک نداشت، اما هنگامی که همراه با کودهای آلی و باکتری تیوباسیلوس به خاک افزوده شد بیشترین اثر افزایشی را بر میزان این شاخص داشت (شکل ۲). این نتیجه احتمالاً به دلیل تحریک رشد جامعه میکروبی خاک بر اثر ماده آلی افزوده شده به خاک و افزایش اکسیداسیون زیستی گوگرد باشد (۱۶). از طرفی، عدم معنی داری اثر اسید هیومیک بر میزان قابل دسترس پتاسیم در این پژوهش احتمالاً به دلیل نبود پتاسیم در ترکیبات هومیک و یا عدم ایجاد لیگاند های محلول با این عنصر باشد (۲۰). همچنین در این پژوهش افزایش معنی دار پتاسیم در تیمار اسید سولفوریک در مقایسه با شاهد می تواند به دلیل اثر این تیمار در تبدیل کربنات های کلسیم کم محلول به گچ با حلالیت بیشتر باشد که سبب رهاسازی کلسیم به محلول خاک و آزادسازی پتاسیم توسط این یون از سایت های تبادلی باشد (۹).

نیتروژن قابل دسترس (آمونیم و نترات)

میزان آمونیوم در تمامی تیمارهای مورد بررسی در مقایسه با شاهد افزایش یافت و این افزایش در بیشتر موارد از نظر آماری معنی دار بود (شکل ۲). در هماهنگی با این یافته ها، کیل و همکاران (۲۶) چنین گزارش کردند که کاربرد ورمی کمپوست در یک شالیزار به طور مستقیم از طریق تجزیه مواد نیتروژنی در خود کمپوست و به طور غیرمستقیم از طریق تحریک فعالیت جامعه میکروبی خاک سبب افزایش نیتروژن معدنی خاک به ویژه آمونیوم می شود. در پژوهش دیگری سجادی نیک و همکاران (۴۴) گزارش کردند که ورمی کمپوست در مقایسه با کودهای شیمیایی و زیستی، افزایش بیشتری در نیتروژن معدنی خاک را سبب می شود. همچنین در راستای نتایج این پژوهش افزایش نیتروژن معدنی خاک در اثر کاربرد تیمارهای اسید هیومیک (۶۲) و گوگرد (۴۶) گزارش شده

میکروبی و یا در ساختار پیوندی کانی‌های رسی اشاره کرد (۷).

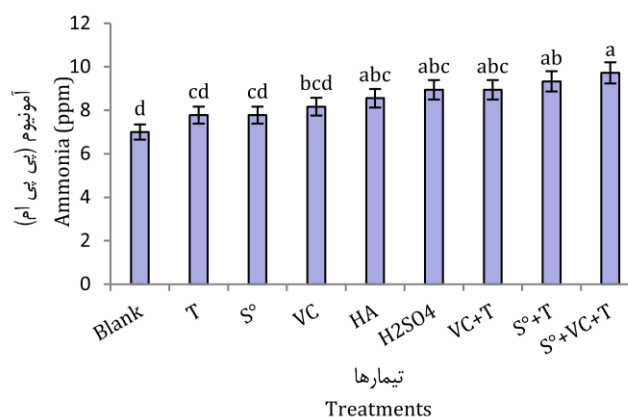
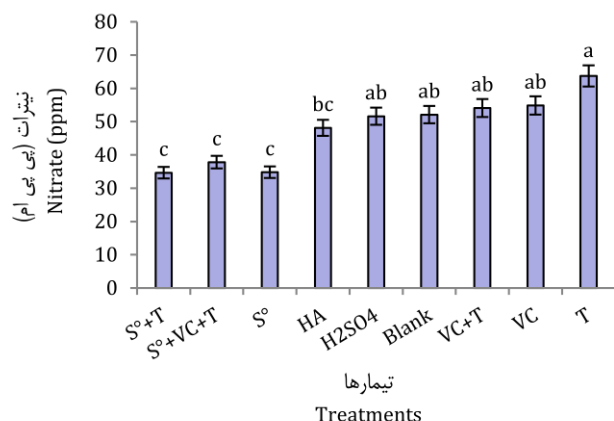
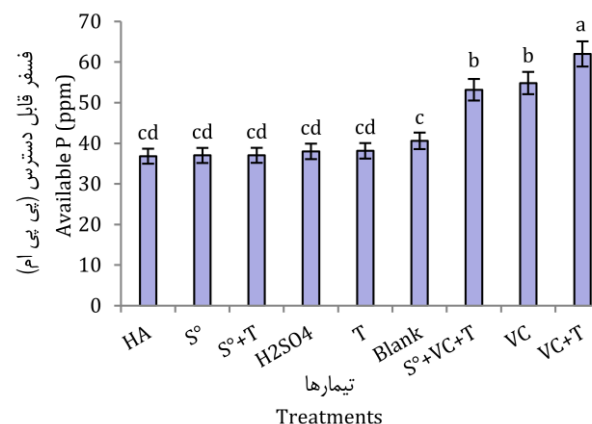
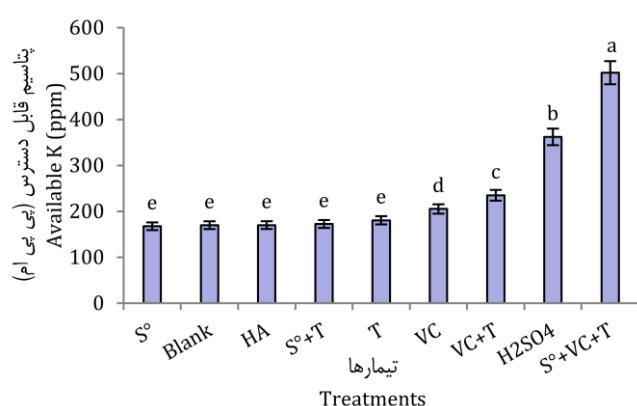
است.

میزان قابل دسترس عناصر کم‌مصرف خاک

روی قابل دسترس در خاک

روی هم رفته میزان روی قابل دسترس هر چند در اکثر تیمارهای مورد بررسی نسبت به شاهد افزایش یافته است اما این افزایش تنها در تیمارهایی که ورمی کمپوست به تنهایی و یا با گوگرد عنصری و باکتری تیوباسیلوس همراه شده است، از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۳).

میزان نیترات در تمامی تیمارهای مورد بررسی در مقایسه با شاهد تغییرات معنی‌داری نشان نداد، به جز تیمارهایی که در آن گوگرد به کار رفته بود که میزان کاهش این شاخص در مقایسه با شاهد از نظر آماری معنی‌دار است (شکل ۲). به سخن دیگر، به‌نظر می‌رسد در تیمارهای مورد آزمایش نیتریفیکاسیون روندی عکس با آمونفیکاسیون داشته است. در هماهنگی با یافته‌های این پژوهش، دلایل مختلفی در کاهش نیترات خاک بعد از اضافه شدن تیمارهای آلی به خاک گزارش شده است که از جمله این دلایل می‌توان به آبشویی، تصعید، جذب توسط گیاه و محبوس شدن در سلول‌های



شکل ۲ - پتاسیم قابل دسترس، فسفر قابل دسترس، نیترات و آمونیوم تیمارهای مورد پژوهش، Blank: شاهد، HA: اسید هیومیک، H₂SO₄: اسیدسولفوریک، T: باکتری تیوباسیلوس، S°: گوگرد عنصری، VC: ورمی کمپوست، S°+T: گوگرد عنصری+باکتری تیوباسیلوس، VC+T: ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس، S°+VC+T: گوگرد عنصری+ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس. حروف متفاوت بیانگر معنی‌دار بودن میانگین‌ها در هر تیمار به روش دانکن در پایه آماری ۵ درصد می‌باشد.

Figure 2- Available K, Available P, Nitrate and Ammonia of examined soil variables (mean $\pm$ SE). Humic Acid (HA), Sulfuric acid (H₂SO₄), Thiobacillus bacteria (T), Sulfur (S°), Sulfur + Thiobacillus bacteria (S°+T), Vermicompost (VC), Vermicompost + Thiobacillus bacteria (VC+T), and Sulfur + Vermicompost + Thiobacillus bacteria (S°+VC+T). Different superscript letters indicate significant differences ($P < 0.05$) between means.

سمیت منگنز نیز مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش مواد آلی به خاک شیمیولیتوتروف‌ها منگنز را از فرم ۲ به ۳ و ۵ غیرقابل جذب برای گیاهان تبدیل می‌کنند. اثر افزایشی گوگرد همگام با مواد آلی در افزایش منگنز قابل دسترس خاک می‌تواند ناشی از این امر باشد که با افزایش میزان مواد آلی مصرفی، جمعیت ریزجانداران اکسید کننده گوگرد افزایش یافته است و در نتیجه اثر گوگرد بر کاهش واکنش خاک، افزایش میزان عناصر کم‌مصرف قابل جذب از جمله منگنز تشدید می‌شود (۱۸). در همین راستا کریمی‌نیا و شعبان‌پور (۲۷) چنین گزارش کردند که افزودن مواد آلی باعث افزایش فعالیت باکتری‌های تیوباسیلوس و افزایش سرعت اکسیداسیون گوگرد خواهد شد. اما کاهش معنی‌دار میزان منگنز قابل دسترس در کاربرد منفرد ورمی‌کمپوست در این پژوهش می‌تواند ناشی از بالا بودن میزان pH در این تیمار و به‌وجود آمدن کمپلکس‌های آلی-فلزی نامحلول منگنز در pH‌های بالا باشد. در هماهنگی با این یافته آنتونیادیس و آلووی (۵) چنین گزارش کردند که کاربرد ورمی‌کمپوست به تنهایی در خاک سبب کاهش منگنز قابل دسترس خاک می‌شود.

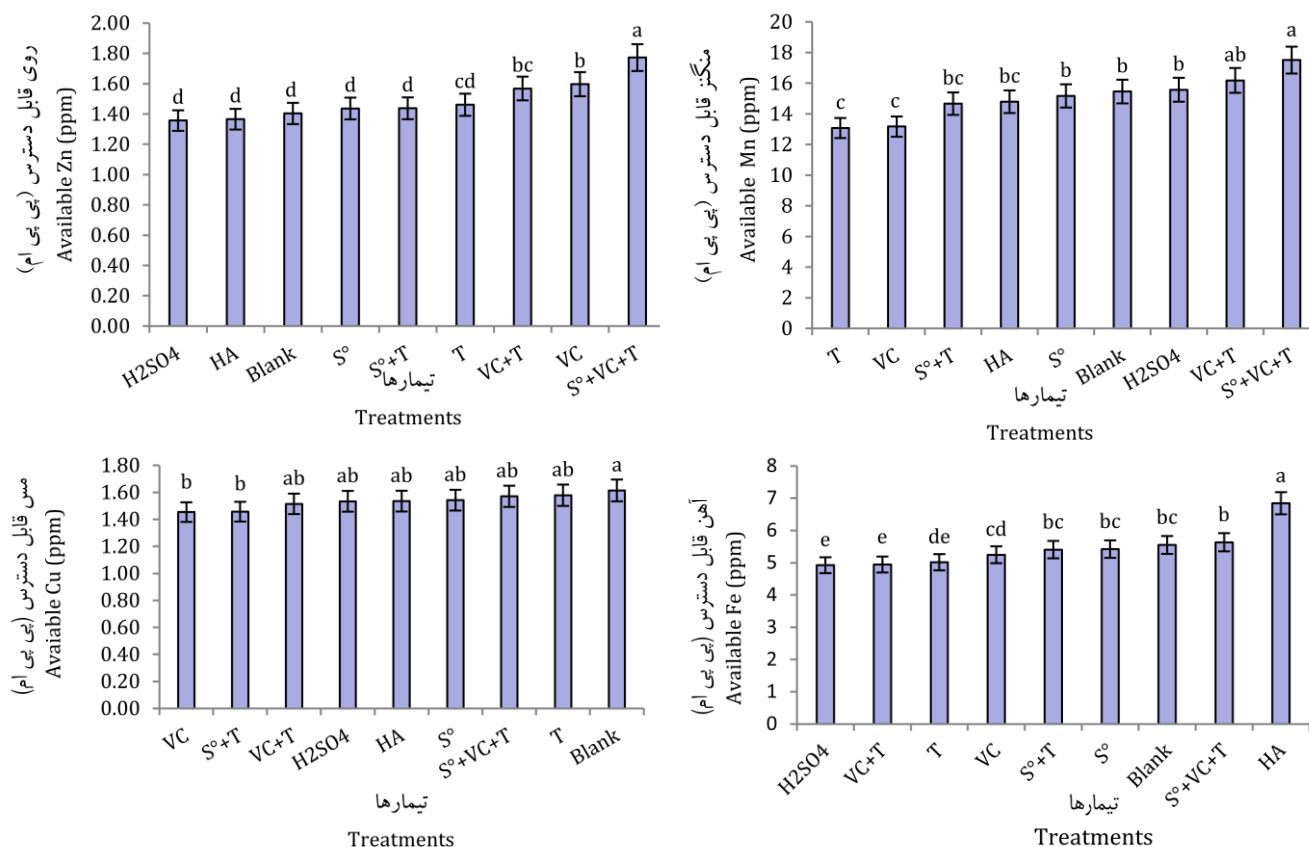
مس قابل دسترس خاک

در تیمارهای مورد بررسی میزان مس قابل دسترس در مقایسه با شاهد تغییرات معنی‌داری نیافت، به جز دو تیمار ورمی‌کمپوست و گوگرد به‌همراه تیوباسیلوس که میزان این شاخص کاهش معنی‌داری در پایه آماری ۵ درصد از خود نشان داده‌اند (شکل ۳). این نتایج نخست ممکن است به این دلیل باشد که هر چند تیمارهای مورد بررسی سبب کاهش pH خاک شده‌اند، اما این میزان کاهش pH در حدی نبوده است که بتواند به حالیت مس کمک کند، چرا که پژوهش‌ها نشان می‌دهند که تغییرات چشم‌گیر مس قابل دسترس در pH‌های کمتر از ۵ اتفاق می‌افتد (۱۹). دوم این که مس در خاک می‌تواند با مواد آلی، رس‌ها، اکسیدهای آهن و منگنز، کربنات‌ها، فسفات‌ها و سولفیدها ترکیب شود که این شکل‌ها توانایی‌های متفاوتی برای نگهداری یا آزاد کردن مس را دارند و می‌توانند به‌طور چشم‌گیری بر پویایی مس و دسترسی زیستی آن اثر بگذارند (۲۵). در این پژوهش عدم افزایش و حتی کاهش معنی‌دار مس قابل دسترس در تیمارهایی که به آن‌ها کودهای آلی افزوده شده است، می‌تواند به‌دلیل میزان کم مس در کودهای آلی و تمایل زیاد فلز مس در ایجاد کمپلکس‌های پایدار با ماده آلی باشد که سبب کاهش میزان قابل جذب آن می‌شود (۶۴). همچنین در هماهنگی با یافته‌های این پژوهش، کریمی‌زرچی و همکاران (۲۸) گزارش کردند که کاربرد $g \text{ soil } 1 \text{ S/kg}$ اثری بر میزان حالیت مس قابل دسترس خاک نداشت.

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تیمارهای آلی از جمله کمپوست از طریق رهاسازی روی در اثر تجزیه و ایجاد مواد کلات کننده به طور مستقیم و یا به طور غیرمستقیم با بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی خاک، فراهمی عناصر کم‌مصرف از جمله روی را افزایش می‌دهند (۱ و ۵۵). در تأیید این مطالب ون‌ارپ و ون (۵۸) گزارش کردند که روی بر خلاف مس پیوند قوی با ماده آلی برقرار نکرده و بنابراین هنگام کاربرد کود آلی قابلیت استفاده آن افزایش می‌یابد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که در مقایسه با شاهد در تیمارهایی که گوگرد و باکتری تیوباسیلوس با ورمی‌کمپوست همراه شده است در مقایسه با حالتی که این تیمارها به صورت منفرد به کار رفته‌اند، میزان روی قابل دسترس به میزان بیشتری در مقایسه با شاهد افزایش یافته است (شکل ۳). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که عوامل متعددی از جمله میزان روی کل، pH، ماده آلی، مکان‌های جذب و فعالیت میکروبی بر میزان روی قابل دسترس خاک مؤثر هستند (۲). در میان موارد گفته شده pH مهم‌ترین فاکتور کنترل کننده روی قابل دسترس خاک است که افزایش آن با میزان روی قابل دسترس رابطه عکس دارد (۵۱). بنابراین احتمالاً کاهش بیشتر pH در تیمارهای یادشده علت افزایش بیشتر میزان روی قابل دسترس در این تیمارها باشد. همچنین افزایش روی قابل دسترس در این پژوهش در تیمارهایی که باکتری‌های تیوباسیلوس حضور داشته است می‌تواند از طریق مکانیسم‌های دیگری غیر از اکسایش گوگرد باشد که از جمله این مکانیسم‌ها می‌توان به ترشح متابولیت‌های اسیدی، ترشح برخی از آنزیم‌ها، مواد محرک رشد و مواد کلات کننده اشاره کرد.

منگنز قابل دسترس خاک

روی هم رفته میزان منگنز قابل دسترس در تیمارهایی که دارای ماده آلی بوده‌اند، افزایش یافته است اما این افزایش تنها در تیماری که گوگرد، ورمی‌کمپوست و باکتری تیوباسیلوس به‌همراه هم به کار رفته‌اند، از نظر آماری معنی‌دار بود (شکل ۳). پژوهش‌ها نشان می‌دهند که اثر ماده آلی بر افزایش منگنز قابل دسترس ممکن است به صورت مستقیم باشد، زیرا با افزودن مواد آلی و تجزیه این مواد در خاک، منگنز موجود در این کودها آزاد شده و یا مواد آلی می‌توانند به صورت غیرمستقیم با کلات کردن عناصر کم‌مصرف از جمله منگنز قابلیت دسترسی این عناصر را افزایش دهند (۳۰). البته باید به این نکته نیز توجه نمود که اغلب تیمارهای آلی در ابتدا به دلیل ایجاد پیوندهای پایدار کلاته با منگنز باعث کمبود شدید این عنصر در خاک می‌شوند اما بعد از تجزیه مواد آلی و شکسته شدن این پیوندها گاهاً



شکل ۳- روی، منگنز، آهن و مس قابل دسترس تیمارهای مورد پژوهش، Blank: شاهد، HA: اسید هیومیک، H₂SO₄: اسیدسولفوریک، T: باکتری تیوباسیلوس، S⁰: گوگرد عنصری، VC: ورمی کمپوست، S⁰+T: گوگرد عنصری+باکتری تیوباسیلوس، VC+T: ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس، S⁰+VC+T: گوگرد عنصری+ورمی کمپوست+باکتری تیوباسیلوس. حروف متفاوت بیانگر معنی دار بودن میانگین‌ها در هر تیمار به روش دانکن در پایه آماری ۵ درصد می‌باشد.

Figure 3- Available Zn, Available Mn, Available Fe and Available Cu of examined soil variables (mean $\pm$ SE). Humic Acid (HA), Sulfuric acid (H₂SO₄), Thiobacillus bacteria (T), Sulfur (S⁰), Sulfur + Thiobacillus bacteria (S⁰+T), Vermicompost (VC), Vermicompost + Thiobacillus bacteria (VC+T), and Sulfur + Vermicompost + Thiobacillus bacteria (S⁰+VC+T). Different superscript letters indicate significant differences (P<0.05) between means

آهن قابل دسترس

میزان آهن قابل دسترس خاک تنها در تیمار اسید هیومیک افزایش معنی‌داری از نظر آماری در مقایسه با شاهد از خود نشان داد (شکل ۳). در هماهنگی با این یافته آستارایی و ایوانی (۶) چنین گزارش کردند که اسید هیومیک از طریق تأمین و در اختیارگذاری عناصر کم‌مصرف همچون آهن و عناصر پرمصرف و بهبود وضعیت فتوسنتز در گیاه سبب افزایش وزن تر و خشک گیاه می‌شود. همچنین ابهرگویل و همکاران (۱۷) چنین بیان کردند که اسید هیومیک از طریق تشکیل کمپلکس با یون آهن، از رسوب آن جلوگیری کرده و

میزان قابل دسترس آن را افزایش می‌دهد. همچنین گزارش شده است که اسیدهای آلی به طور مؤثری تحرک و حلالیت بسیاری از کاتیون‌های فلزی از جمله آهن و آلومینیوم را افزایش می‌دهند (۲۳). در برخی از پژوهش‌ها گزارش شده است که اسید هیومیک فعالیت‌های میکروبی در خاک را بهبود می‌بخشد (۴۹) و همین مسئله می‌تواند یکی از عوامل افزایش میزان حلالیت آهن ناشی از افزایش متابولیت‌های میکروبی همچون تولید سیدروفورها و غیره در تیمار اسید هیومیک باشد. همچنین در این پژوهش در تمام تیمارهایی که گوگرد حضور داشت، در مقایسه با تیمار شاهد، تغییرات معنی‌داری در

کم مصرف گیاهان در یک خاک آهکی با استفاده از تیمارهای مواد آلی، مواد اسیدزا و زیستی به روش انکوباسیون به مدت ۹۰ روز در دمای آزمایشگاه انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد به دلیل پویا بودن شرایط خود خاک، ظرفیت بالای بافری خاکهای آهکی و پیچیده بودن حلالیت کانی‌هایی که غلظت عناصر مورد نیاز گیاهان در این خاک‌ها را کنترل می‌کنند، اثر یک تیمار به تنهایی نمی‌تواند تمامی موانع بر سر راه حلالیت عناصر غذایی در این خاک‌ها را رفع نماید. به گونه‌ای که نتایج این پژوهش نشان داد که بدون وجود فرایمی مواد آلی در خاک در نتیجه اعمال کودهایی مانند کمپوست و یا ورمی‌کمپوست استفاده از باکتری‌های تیوباسیلوس به همراه گوگرد نمی‌تواند نقش مؤثری در افزایش قابلیت دسترسی عناصر غذایی در خاک‌های آهکی داشته باشد. بلکه ترکیبی از کودهای آلی که نقش مهمی در افزایش فعالیت و فراوانی باکتری اکسید کننده گوگرد دارند، به همراه گوگرد عنصری و باکتری تیوباسیلوس می‌تواند راهکار مناسبی برای افزایش قابلیت جذب عناصر غذایی در خاک‌های آهکی مشابه و افزایش کمی و کیفی رشد گیاهان در این خاک‌ها باشد. ضمن اینکه نویسندگان تأکید دارند، برای اطمینان بیشتر این پژوهش باید در شرایط مزرعه و در حضور گیاهان زراعی مختلف در خاک‌های آهکی با ویژگی‌های مختلف تکرار شود.

میزان آهن قابل دسترس مشاهده نشد و در مابقی تیمارها به جز تیمار ورمی‌کمپوست میزان حلالیت آهن در مقایسه با تیمار شاهد کاهش معنی‌داری داشت (شکل ۳). در هماهنگی با این یافته‌ها کریمی‌زرچی و همکاران (۲۸) در پژوهش خود از سطوح مختلف گوگرد (۰/۵، ۱ و ۲ g S^o/kg soil) استفاده کردند و مشاهده کردند که کاربرد ۲ g S^o/kg soil ۱ اثری بر افزایش میزان آهن قابل دسترس خاک نداشت. همچنین سفوتیس و لیندمن (۱۶) گزارش نمودند که به‌کارگیری گوگرد عنصری در خاک‌های آهکی اثری بر میزان آهن قابل دسترس خاک نداشت و دلیل این امر را به ظرفیت بافری خاک نسبت دادند. روی هم رفته، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در این پژوهش در تیمارهایی که میزان فسفر قابل دسترس خاک افزایش یافته، آهن قابل دسترس خاک کاهش معنی‌داری از خود نشان داده است. در تأیید این مطلب، رابطه خطی پیرسون بین فسفر و آهن قابل جذب در این پژوهش ۰/۳۲- به دست آمد که در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار است. بررسی‌ها نشان داده است که آهن می‌تواند با فسفات ترکیب شده و ترکیباتی نامحلول ایجاد کنند و به این گونه از میزان قابلیت جذب آهن کاسته شود (۳۴).

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف افزایش حلالیت عناصر غذایی پر مصرف و

منابع

- 1- Agbede T.M., and Adekiya A.O. 2011. Evaluation of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) performance and soil properties under tillage methods and poultry manure levels. *Emirates Journal of Food. Agriculture* 23(2):164-177.
- 2- Alloway B.J. 2009. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health* 31(5): 537-548.
- 3- Ansari M.H., Hashemabadi D., and Kaviani B. 2017. Effect of cattle manure and sulfur on yield and oil composition of pumpkin (*Cucurbita pepo* var. *Styriaca*) Inoculated with thiobacillus thiooxidans in calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(18): 2103-2118.
- 4- Ansori A., and Gholami A. 2015. Improved nutrient uptake and growth of maize in response to inoculation with thiobacillus and mycorrhiza on an alkaline soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 46(17): 2111-2126.
- 5- Antoniadis V., and Alloway B.G. 2003. Evidence of heavy metal movement down the profile of a heavily sludged soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis* 34: 1225-1231.
- 6- Astaraei A.R., and Ivani R. 2008. Effect of organic sources as foliar spray and root media on nutrition of cowpea plant. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science* 3: 352-356.
- 7- Beauchamp E.G. 1987. Corn response to residual N from urea and manure applied in previous year. *Canadian Journal of Soil Science* 67: 931-942.
- 8- BesharatiKelayeh H. 1998. Study of sulfur application with Thiobacillus species on absorption potential of some nutrients in soil. M.Sc. Thesis in Soil Science, College of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran, 1-9. (In Persian with English abstract)
- 9- Bohn H.L., McNeal B.L., and O'Conner G.A. 1979. Adsorption isotherms, *Soil Chemistry* 185-188.
- 10- Botha C.R., and Webb M.M. 1952. The versenate method for the determination of calcium and magnesium in mineralized waters containing large concentrations of interfering ions. *Institute of Water Engineers Journal* 6: 459-462.
- 11- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal*

54:464-465.

- 12- Bremner J.M., and Mulvaney C.S. 1982: Nitrogen – Total. In: Methods of Soil Analysis, Part II, 2nd edition, Page, A.L., Miller, R. H, Keeney D. R. (Eds.), Madison, Wisconsin USA 1159.
- 13- Bremner J.M., and Keeney D.R. 1996. Determination and isotope-ratio analysis for different forms of nitrogen in soils. Exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction-distillation methods. Proceedings of the Soil Science Society of America 30: 577-624.
- 14- Cardelli R., Saviozzi A., Cipolli S., and Riffaldi R. 2008. Compost and cattle manure as sources of inorganic sulfur to soil. Journal of Agronomy and Soil Science 54(2): 139-147.
- 15- Chen J.H. 1996. Characterization of Inositol hexaphosphate, Glucose-6-phosphate and potassium dehydrate phosphate sorption by acid and calcareous soils. Journal of Chinese Agricultural Chemical Society 34: 112-117.
- 16- Cifuentes F.R., and Lindemann W.C. 1993. Organic matter stimulation of elemental sulfur oxidation in a calcareous soil. Soil Science Society of America Journal 57: 727-731.
- 17- Eyheraguibel B., Silvestre J., and Morard P. 2008. Effects of humic substances derived from organic waste enhancement on the growth and mineral nutrition of maize. Bioresource Technology 99: 4206-4212.
- 18- Goodarzi K. Enhancing Effects of sulfur and compost on nutrient availability and wheat yield. Journal of Water and Soil 15(2): 154-166. (In Persian with English abstract)
- 19- Hagin J., and Tucker B. 1982. Fertilization of dry land and irrigated soils. Springer Verlag, New York, 101-112
- 20- Halim, M., Conte P., and Piccolo A. 2003. Potential availability of heavy metals to phytoextraction from contaminated soils by exogenous humic substances. Chemosphere 52: 265-275.
- 21- Havlin J.L., Tisdale S.L., Nelson W.L., and Beaton J.D. 2005. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. Prentice Hall; 7 ed., 499.
- 22- Heydarnezhad F., Shahinroksar P., Shokri Vahed H., and Besharati H. 2012. Influence of elemental sulfur and sulfur oxidizing bacteria on some nutrient deficiency in calcareous soils. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 4: 735-739.
- 23- Jones D.L., and Darrah P.R. 1994. Role of root derived organic acid in the mobilization of nutrient from the rhizosphere. Plant Soil 166: 247-257.
- 24- Jones Jr J.B. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis, Chemical Rubber Company Press, 48-78.
- 25- Kabala C., and Singh B.R. 2001. Fractionation and mobility of copper, lead and zinc in soil profiles in the vicinity of a copper smelter. Journal of Environmental Quality 30: 485-492.
- 26- Kale R.D., Malesh B.C., Bano K., and Bagyaraj D.J. 1992. Influence of vermicompost application on the available macronutrients and selected microbial populations in a paddy field. Soil Biological and Biochemical 24: 317-320.
- 27- Kariminia A., and Shabanpoor S. 2002. Sulphur oxidation power of heterotrophic microorganism in different soils. Journal of Soil and Water 1: 57-68.
- 28- Karimizarchi M., Aminuddin H., Khanif M.Y., and Radziah O. 2014. Elemental sulphur application effects on nutrient availability and sweet maize (*Zea mays* L.) response in a high pH soil of Malaysia. Malaysian Journal of Soil Science 18: 75-86.
- 29- Koochekzadeh Y. 2003. Effect of S and Thibacillus and organic matter on required P of corn in calcareous soils. MSc Thesis. TarbiatModarres University, Tehran, Iran. (In Persian with English abstract)
- 30- Kulkarni A. 2009. Biozink Solubilizing Microbes.
- 31- Leytem A.B., and Mikkelsen R.L. 2005. The nature of phosphorus in calcareous soils. Better Crops 89(2): 11-13.
- 32- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. In: Page A.L (Ed), Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and microbiological properties, (2nd Ed.). Agronomy Monograph 9, Madison, WI, pp. 181-196.
- 33- Malakooti M.J., در Homai M. 1995. Fertility of arid soils (problems and solutions). Tarbiat Modarres University Press, 494.
- 34- Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London.
- 35- Miransari M., and Smith D.L. 2007. Overcoming the stressful effects of salinity and acidity on soybean nodulation and yields using signal molecule genistein under field conditions. Journal of Plant Nutrition 30(12): 1967-1992.
- 36- Miyamoto S. 1998. Use of acids and acidulants on alkali soils and water. Handbook of soil conditioners. Marcel Dekker, Madison, NY, 217-256.
- 37- Mohammady Aria M., Lakzian A., Haghnia G.H., Berenji A.R., Besharati H., and Fotovat A. 2010. Effect of Thiobacillus, sulfur, and vermicompost on the water-soluble phosphorus of hard rock phosphate. Bioresource Technology 101: 551-554.
- 38- Murphy J., and Riley J.P.A. 1962. Modified single solution method for determination of phosphate in natural waters. Analytica Chimica Acta Journal 27: 31-36.

- 39- Naramabuye F.X., and Haynes R.J. 2006. Effect of organic amendments on soil pH and Al solubility and use of laboratory indices to predict their liming effect. *Soil Science* 171: 754-763.
- 40- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*; Sparks, D.L., ed.; SSSA Book Series No. 5; Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin 961-1010.
- 41- Moshiri F., Shahabbi F.F., Keshavarz P., Khogar Z., Feiziasl V., Tehrani M.M., Asadi Rahmani H., Samavat M.N., Ghaibi M.N., Sedri M.H., Rashidi N., Saadat S., and Khdami. 2014. Guidelines for integrated soil fertility and plant nutrition management of wheat. Published by Soil and Water Research Institute of Iran. Pp. 73.
- 42- Rodrigues M.A., Pereira A., Cabanas J.E., Dias L., Pires J. and Arrobas M. 2006. Crops use-efficiency of nitrogen from manures permitted in organic farming. *European Journal of Agronomy* 25: 328-335.
- 43- Ryan J., Stroehlein J.L., and Miyamoto S. 1975. Sulfuric Acid Applications to Calcareous Soils: Effects on Growth and Chlorophyll Content of Common Bermudagrass in the Greenhouse 1. *Agronomy Journal* 67(5): 633-637.
- 44- Sajadi nic R., Yadavy A.R., Baluchi H.R., and Faraji H. 2011. The effect of chemical fertilizers (urea), organic (vermicompost) and biological (Nitroksin) on the yield and quality of sesame. *Journal of Agricultural Science* 21(2): 87-101.
- 45- Sakari A., Ardakani M.R., and Khavazi K. 2012. Effect of azospirillum lipoferum and Thiobacillus thioparus on quantitative and qualitative characters of rapeseed (*Brassica napus* L.) under water deficit conditions. *Middle-East Journal of Scientific Research* 11(6): 819-827.
- 46- Salvagiotti F., Castellarín J.M., Miralles D.J., and Pedrol H.M. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crop Research* 113: 170-177.
- 47- Seyyedi S.M., Rezvani Moghaddam P., Khajeh-Hosseinia M., and Shahandeh H. 2015. Influence of phosphorus and soil amendments on black seed (*Nigella arvensis* L.). Oil yield and nutrient uptake. *Industrial Crops and Products* 77: 167-174.
- 48- Shamim A.H.M., and Ahmed F. 2010. Response to sulfur and organic matter status by the application of sulfid materials in S deficient soils in Bangladesh. possibilities and opportunities. *Report and Opinion* 2(1): 188-193.
- 49- Sharif M., Sarir M.S., and Rabi F. 2000. Biological and chemical transformation of phosphorus in some important soil series of NWFP. *Sarhad Journal of Agriculture* 16(6): 587-592.
- 50- Sharifi Z., Azadi N., and Certini G. 2017. Fire and tillage as degrading factors of soil structure in northern zagros oak forest, west Iran. *Land Degradation and Development* 28: 1068-1077.
- 51- Shuman L.M., and Li Z. 1997. Amelioration of zinc toxicity in cotton using lime or mushroom compost. *Soil and Sediment Contamination* 6(4): 425-438.
- 52- St-Pierre B., and Wright A.D.G. 2017. Implications from distinct sulfate-reducing bacteria populations between cattle manure and digestate in the elucidation of H₂S production during anaerobic digestion of animal slurry. *Applied Microbiology and Biotechnology* 101(13): 5543-56.
- 53- Swaminathan S., Edward B.S., and Kurpad A.V. 2013. Micronutrient deficiency and cognitive and physical performance in Indian children. *European Journal of Clinical Nutrition* 67(5): 467-474.
- 54- Tabatabai M.A. 1986. Sulfur in Agriculture. American Society of Agronomy, Madison, WI., 428 pp.
- 55- Theunissen J., Ndakidemi P., and Laubscher C. 2010. Potential of vermicompost produced from plant waste on the growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of Physical Sciences* 5: 1964-1973.
- 56- Tisdale S.L., Nelson W.L., Beaton J.D., and Havlin J.L. 1993. Soil and fertilizer nitrogen. *Soil Fertility and Fertilizers* 4: 112-183.
- 57- Ullah I., Jilani G., ul Haq M.I., and Khan A. 2013. Enhancing bio-available phosphorous in soil through sulfur oxidation by Thiobacilli. *British Microbiology Research Journal* 3(3): 378.
- 58- Van Erp P.J., and Van Lune P. 1991. Long-term heavy metal leaching from soils-sewage sludge and soil/sewage mixtures. *Environmental Science Technology* 25: 706-711.
- 59- Wang A.S., Angle J.S., Chaney R.L., Delorme T.A., and Reeves R.D. 2006. Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 281(1-2): 325-337.
- 60- Wang L., Zheng Z., Zhang Y., Chao J., Gao Y., Luo X., and Zhang J. 2013. Biostabilization enhancement of heavy metals during the vermiremediation of sewage sludge with passivant. *Journal of Hazardous Materials* 244: 1-9.
- 61- Yang Z.H., Stoven K., Haneklaus S., Singh B.R., and Schnug E. 2010. Elemental sulfur oxidation by *Thiobacillus* spp. and aerobic heterotrophic sulfur-oxidizing bacteria. *Pedosphere* 20(1): 71-79.
- 62- Young C.C., and Chen L.F. 1997. Polyamines in humic acid and their effect on radical growth of lettuce seedlings. *Plant and Soil* 195: 143-149.
- 63- Yuan T., Wang J., Sun X., Yan J., Wang Z., and Niu J. 2017. Effect of combined application of humic acid and nitrogen fertilizer on nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* 3: 74-82.

- 64- Zalidis G., Barbayiarinis N., and Matsi T. 1999. Forms and distribution of heavy metals in soils of the Axios delta of northern Greece. *Commun. Soil Science and Plant Analysis* 30: 817-827.
- 65- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. Method of soil analysis. Part 1 and 2. American Society of Agronomy Inc Madison, Wisconsin USA.
- 66- Golchin A. 2016. Soil organic matter. Published by Jahad Daneshgahi center, the University of Zanzan. Pp. 281.
- 67- Gholami M., and Sharifi Z. 2020. Assessment of fertilizing potential of livestock industrial abattoir refinery sludge and its effect on soil chemical properties (case study: livestock industrial abattoir of Sanandaj). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(6): 1405-1416.



Comparative Survey of Organic Matter, Biological and Acid-causing Treatments Effects on Availability of Nutrient Elements in a Calcareous Soil

Sh. Haghighi¹- Z. Sharifi^{2*}

Received: 27-04-2020

Accepted: 15-09-2020

Introduction: Calcareous soils are described as soils containing quantities of calcium carbonate which have an enormously effect on the soil properties (physical, consisting of soil water relations and soil crusting, or chemical consisting of the availability of plant nutrients) and plant growth. Calcareous soils arise clearly in arid and semi-arid areas due to rare precipitation and little leaching. It has been evaluated that these soils contain over one-third of the world's surface zone and their CaCO_3 content ranged from a few to 95%. Calcareous soils faced many challenges such as shortage of organic matter, low structure stability, low water holding capacity, low CEC, high pH, surface crusting and cracking and great infiltration rate which cause loss of essential plant nutrients via leaching or deep percolation. Another problem in calcareous soils is low availability of plant nutrients particularly phosphorous and micronutrients specially zinc, iron and manganese, and a nutritional imbalance between elements such as potassium, magnesium and calcium. Although a calcareous soil is dominated by free lime, it could also incorporate large quantities of iron, aluminum, and manganese. These metals provide more strong sorption sites for phosphorus and are mostly more significant in controlling phosphorus solubility in calcareous soils than calcium carbonate itself. Under such severe conditions, desired yield levels are difficult to attain. Calcareous soils lack the organic matter required for optimal crop yield. Therefore, numerous studies have made efforts to increase the availability of nutrients in the soils through different treatments. Common methods for dealing with these deficiencies, is the use of chemical fertilizers that have the risk of environmental pollution in addition to the high cost and low efficiency. Oxidation of sulfur leads to sulfuric acid formation which can decrease the soil pH and increase dissolution of insoluble soil minerals and release of essential plant nutrients. Furthermore, the addition of organic amendments improves the soil chemical and physical properties, initiates nutrient cycling, and provides a functioning environment for vegetation.

Materials and Methods: The objective of this research was to increase solubility of nutrient elements in a calcareous soil considering nine treatments (i.e., control (Blank), Soil + Humic Acid (HA), Soil + Sulfuric Acid (H_2SO_4), Soil + Thiobacillus (T), Soil + Sulphur (S^0), Soil + Sulphur + Thiobacillus ($\text{S}^0 + \text{T}$), Soil + Vermicompost (VC), Soil + Vermicompost + Thiobacillus (VC+T) and Soil + Sulphur + Vermicompost + Thiobacillus ($\text{S}^0 + \text{VC} + \text{T}$)). The experimental design was factorial arrangement in randomized complete block, with all the treatments replicated three times. All the treatments were incubated under the laboratory condition for 90 days in 25 ± 2 °C and 70% of water holding capacity by distilled water. During the incubation period, the moisture of the samples was kept at 70% FC by daily addition of deionized water based on weight loss. At the end of incubation period the pH value, electrical conductivity (EC), available form of macro elements (K, P and N) and micro elements (Zn, Mn, Fe and Cu) were determined in all treatments by standard methods.

Results and Discussion: The results showed that, the soil pH value significantly decreased in $\text{S}^0 + \text{T}$ and $\text{S}^0 + \text{VC} + \text{T}$ treatments, in compared to the blank. While, the EC of these treatments significantly increased with respect to the blank. The results also showed that most of the treatments have been able to increase the solubility of the nutrients. However, the effect of $\text{S}^0 + \text{VC} + \text{T}$ treatment on increasing the availability of studied soil nutrients and decreasing pH value was more significant than the other treatments.

Conclusion: Analysis of the results obtained from this study using classical statistic methods showed that applying a single treatment cannot remove all obstacles to increase nutrient availability in calcareous soils. This may be attributed to high buffering capacity of calcareous soils and complexity of factors which control mineral solubility and nutrient availability. While, treatments that simultaneously provide soil organic matter and lower pH (such as $\text{S}^0 + \text{VC} + \text{T}$) can significantly remove barriers to increase nutrient uptake in these soils. As a result,

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

(*- Corresponding Author Email: z.sharifi@uok.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86182

the simultaneous application of organic fertilizers, elemental sulfur and Thiobacillus bacteria can be a promising approach to increase the solubility of nutrients in calcareous soils and to increase the quantitative and qualitative growth of plants in these soils.

Keywords: Calcareous soils, Humic acid, Sulphur, Thiobacillus bacteria, Availability of nutrient elements, Vermicompost

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تأثیر بایوچارهای مهندسی شده بر سینتیک واجذب سرب در خاک آهکی آلوده

زهره دیانت مهارلویی^{۱*} - مجید فکری^۲ - مجید محمود آبادی^۳ - اسما سلجوقی^۴ - مجید حجازی مهریزی^۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴

چکیده

در سال‌های اخیر، برخی از محققین بر این باورند که کاربرد بایوچار خام در محیط‌های بسیار آلوده نمی‌تواند بر جذب آلاینده‌های مختلف موثر باشد، بنابراین به منظور حل این مشکل، بایوچارهای مهندسی شده با خصوصیات و ساختارهای جدید را پیشنهاد کردند. با توجه به این مساله، در این پژوهش با کاربرد دو نوع بایوچار (پوست نرم بادام و پوست برنج) اصلاح شده با NaOH و HNO_3 در سطوح صفر و ۴ درصد وزنی به خاک هر گلدان افزوده و به مدت یک ماه در شرایط رطوبت مزرعه‌ای نگهداری شدند. سپس سرب در سه سطح صفر، ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم به خاک گلدان‌ها اضافه گردید در همان شرایط قبلی به مدت ۵ ماه نگهداری شدند. بعد از گذشت ۵ ماه انکوباسیون، سینتیک واجذب سرب در خاک مورد مطالعه بررسی گردید. نتایج نشان داد که در زمان‌های آغازین سرعت واجذبی سریع (۳۰ دقیقه اولیه) و به دنبال آن واجذبی با سرعتی کمتر (۸ ساعت) تا در نهایت رسیدن به تعادل در نمونه‌ها مشاهده گردید. تغییرات حاصله از میزان آزاد سازی سرب در خاک تیمار شده نسبت به شاهد نشان‌دهنده تأثیر مثبت بایوچارهای اصلاح شده در این تحقیق می‌باشد. افزودن بایوچار پوست نرم بادام و پوست برنج اصلاح شده با NaOH و HNO_3 به خاک منجر به کاهش واجذب سرب در تمام زمان‌های عصاره‌گیری نسبت به تیمار شاهد گردید، در حالیکه بایوچار پوست برنج در مقایسه با بایوچار پوست نرم بادام تأثیر بیشتری را در کاهش واجذبی سرب نشان داد. همچنین کمترین میزان واجذبی مربوط به بایوچار پوست برنج اصلاح شده با NaOH می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پوست برنج، پوست نرم بادام، سرب، NaOH ، HNO_3

مقدمه

ذوب فلز، آفت‌کش‌ها، لجن فاضلاب، کودهای دامی و کمپوست به محیط زیست اضافه می‌شوند بلکه دود خروجی از وسایل نقلیه نیز عامل افزایش این عنصر در منابع مختلف هوا، آب و خاک می‌باشد (۳). سرب توسط گیاهان جذب می‌شود، به راحتی وارد زنجیره غذایی شده و صدمات جبران ناپذیری را به محیط زیست وارد می‌سازد. همچنین از پتانسیل ایجاد مسمومیت برای انسان و سایر موجودات زنده برخوردار می‌باشد. سرب با ایجاد سمیت و تغییر در شاخص‌های فیزیولوژیکی رشد گیاهان سبب کاهش محصول در زمین‌های کشاورزی شده و به این ترتیب باعث بروز مشکلات جدی در امر کشاورزی می‌گردد (۲۹). سرب به شکل pb^{+2} در بدن انسان جذب و بطور عمده در استخوان‌ها، کلیه و کبد تجمع می‌یابد. سرب در غلظت‌های بالا، باعث انقباض‌های عضلانی و کم‌خونی می‌شود. همچنین از اثرات مزمن آن، می‌توان به بی‌خوابی، یبوست، بی‌اشتهایی و دردهای عضلانی اشاره کرد (۳۲).

تحقیقات زیادی جهت استفاده از روش‌های جایگزین و نوین برای پاکسازی محیط زیست از فلزات سنگین انجام گرفته است (۵۱). پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین یکی از کارهای دشوار مهندسی محیط زیست می‌باشد. بدین منظور در سراسر جهان صنایع

امروزه آلودگی خاک از مسائل زیست محیطی مهمی است که باید مورد توجه قرار گیرد. فعالیت‌های صنعتی باعث آلودگی و تجمع فلزات سنگین در خاک می‌شوند آلودگی خاک به طور قابل توجهی کیفیت محیط زیست را کاهش می‌دهد و سلامتی انسان را تهدید می‌کند (۹). آلودگی خاک به فلزات سنگین به دلیل اثرات مخرب آن در محیط زیست تبدیل به یک نگرانی جهانی شده است. فلزات سنگین برخلاف آلاینده‌های آلی تجزیه‌پذیر نمی‌باشند. این واقعیت، فلزات سنگین را به یکی از خطرناکترین گروه آلاینده‌های زیست محیطی مبدل ساخته است (۴۸). سرب یکی از فلزات سنگین می‌باشد که در محیط زیست نه تنها از طریق عملیات معدن‌کاوی، فعالیت‌های

۱، ۲، ۳ و ۵ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استادان و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۴ - استاد گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*) - نویسنده مسئول
(Email: zahradianat@agr.uk.ac.ir)
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86783

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

جهت انجام این پژوهش، مقدار کافی خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از مزرعه دانشکده کشاورزی شهید باهنر کرمان جمع‌آوری شد. پس از هوا خشک کردن نمونه‌ها و عبور از الک دو میلی-متری، برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه شامل بافت خاک به روش هیدرومتر (۷)، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل اشباع (۴۱)، pH در خمیر اشباع (۴۵)، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک به روش استات سدیم (۴۴)، مقدار کربن آلی خاک به روش اکسایش تر (۳۶)، کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی کردن با اسید کلریدریک (۴) اندازه‌گیری شد و عناصر کم مصرف و سرب با روش عصاره‌گیری با دی تی پی ۱ و تعیین غلظت با دستگاه جذب اتمی (۲۸) اندازه‌گیری شد (جدول ۱).

تهیه و تجزیه آزمایشگاهی بایوپچار مورد استفاده

جهت تهیه بایوپچارها (پوست نرم بادام از باغ بادام و پوست برنج کامفیروزی از کارخانه برنج کوبی در شهرستان شیراز تهیه شد)، بقایا پس از جمع‌آوری، هوا خشک شده و پس از آسیاب کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری در ورقه‌های آلومینیومی بسته‌بندی شدند تا فرایند اکسیژن رسانی محدود (اعمال گاز نیتروژن) شود. سپس به مدت چهار ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد در داخل کوره قرار داده شدند تا زغالی که به آن بایوپچار می‌گویند، تولید گردد (۱۹). دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد به این دلیل انتخاب گردید زیرا بین دو دمای ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، دمای کمتر از ۳۰۰ همه بقایا به بایوپچار تبدیل نمی‌شود و در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتیگراد عملکرد به شدت کاهش می‌یابد (۳۰). پس از آسیاب کردن بایوپچار و عبور از الک ۰/۵ میلی‌متری، برخی از ویژگی‌های شیمیایی آن اندازه‌گیری گردید (جدول ۲). pH و قابلیت هدایت الکتریکی بایوپچار با روش هالاسچاک (۲۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی با روش گاسکین و همکاران (۱۸)، جرم مخصوص ظاهری، جرم مخصوص حقیقی و تخلخل با روش سونگ و گتو (۴۲)، نیتروژن کل به روش کلدال (۸) اندازه‌گیری شدند. یک گرم از بایوپچار پوست برنج به منظور تجزیه شیمیایی، در کوره الکتریکی به مدت ۴ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس خاکستر شد و سپس در اسید کلریدریک دو نرمال حل شده و پس از عبور از کاغذ صافی با آب مقطر به حجم رسانده و غلظت آهن، منگنز، روی، مس و سرب با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری گردید.

مجبور شدند مقدار ورودی عناصر سمی به محیط‌زیست را کاهش دهند (۱۰). بنابراین به کارگیری روش‌های مؤثر که افزون بر رفع آلودگی در محل، کم هزینه باشد و اثرات جانبی آن سلامت محیط زیست را به خطر نیندازد، بسیار حیاتی می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین، جذب سطحی عناصر توسط مواد جاذب می‌باشد (۲۲). روش جذب سطحی به علت بازدهی بالا، ارزان و در دسترس بودن انواع مختلف جاذب‌ها، روشی ساده و نوین در راستای کاهش تحرک و زیست‌فراهمی این فلزات می‌باشد (۳۹).

یکی از روش‌های تثبیت فلزات سنگین در خاک استفاده از بایوپچار می‌باشد. کاربرد بایوپچار با توجه به ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه بالای آن و حضور کربوکسیل، فنولیک، هیدروکسیل و دیگر گروه‌های عاملی که شامل اکسیژن‌های سطحی‌اند، قادر است آلاینده‌های حاصل از آلاینده‌های آلی و فلزات سنگین را کاهش دهد، موجب تثبیت فلزات سنگین و بهبود وضعیت گیاه و خاک از لحاظ آلودگی شوند (۵۰). بایوپچار زیست توده پیرولیز شده در شرایط اکسیژن کم یا فاقد اکسیژن می‌باشد و به عنوان ماده‌ای برای کاهش آلودگی ناشی از فلزات سنگین و آلودگی‌های آلی در خاک‌های آلوده شناخته می‌شود (۵). اصلاح شیمیایی می‌تواند سطح بایوپچار را تغییر دهد و باعث افزایش ظرفیت جذب در بایوپچار اصلاح شده می‌گردد (۱۴). پس از اصلاح بایوپچارها، گروه‌های کربوکسیلی دارای بار منفی در بایوپچارها، پیوندهای بیشتری با فلزات دارای بار مثبت تشکیل می‌دهند بنابراین جذب فلزات سنگین را در خاک افزایش می‌یابد (۴۷). اصلاح شیمیایی بایوپچار توسط مواد اصلاح‌کننده قلیایی سبب افزایش تخلخل و سطح ویژه در بایوپچار می‌گردد (۱۳). همچنین بایوپچار اصلاح شده با H_2SO_4/HNO_3 دارای گروه‌های کربوکسیل بیشتری می‌شوند و در نتیجه سبب کاهش تحرک Cu، Pb، Zn در خاک می‌شوند (۴۶). هدف اصلی از تثبیت فلزات سنگین، کاهش غلظت بخش سمی فلزات با قابلیت تحرک و دسترسی بالا برای گیاهان و کاهش پتانسیل آبخوبی می‌باشد (۲۶). بنابراین با توجه به مطالب ذکر شده در بالا، هدف پژوهش حاضر تثبیت فلزات سنگین با کاربرد روش‌های ارزان قیمت امری کاملاً ضروری به نظر می‌رسد. از آنجایی که پوست برنج و پوست نرم بادام به فراوانی و با قیمت بسیار کم، قابل دسترس می‌باشد. ضمن آن که تجمع آن در اطراف اراضی کشاورزی و باغ‌ها سبب آلودگی محیط‌زیست و شرایط نامساعد در این مناطق می‌گردد. در این پژوهش به بررسی تاثیر بایوپچارهای پوست برنج و پوست نرم بادام اصلاح شده با NaOH و HNO_3 بر سینتیک و جذب سرب در خاک آهکی آلوده پرداختیم.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش
Table 1- Selected chemical and physical properties of the soil studied

مقدار Value	واحد Unit	خصوصیت Property
(لوم شنی) (Sandy loam)	-----	بافت Soil texture
(0.69 ±0.04)	(%)	کربن آلی OC
(8.32 ±0.06)	(%)	کربنات کلسیم معادل CCE
(2.18 ±0.03)	(dS m ⁻¹)	قابلیت هدایت الکتریکی EC
(7.50 ±0.08)	-----	پهاش (خمیر اشباع) pH
(8.93 ±0.05)	(cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC
(1.74 ±0.03)	(mg kg ⁻¹)	منگنز قابل استخراج با DTPA DTPA-Mn
(0.5 ±0.03)	(mg kg ⁻¹)	مس قابل استخراج با DTPA DTPA-Cu
(1.52 ±0.04)	(mg kg ⁻¹)	آهن قابل استخراج با DTPA DTPA-Fe
(0.72 ±0.03)	(mg kg ⁻¹)	روی قابل استخراج با DTPA DTPA-Zn
(ناچیز)	(mg kg ⁻¹)	سرب قابل استخراج با DTPA DTPA-Pb

تهیه بایوچار اصلاح شده

برای تهیه بایوچار اصلاح شده با (NaOH و HNO₃) از روش فن و همکاران (۱۶) با اعمال تغییرات استفاده گردید. یک گرم بایوچار به ۱۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر اضافه شده و سپس ۱۰ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ (یا ۱۰ گرم NaOH) به آن اضافه شد. در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت هم زده شد. سرانجام با استفاده از سانتریفیوژ فیلتر شد و چندین بار با آب مقطر شسته شد تا pH خنثی شود. پودر حاصل در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شد.

طرح و آزمایش گلخانه‌ای

جهت انجام آزمایش، سه کیلوگرم خاک را درون گلدان‌ها ریخته سپس دو تیمار بایوچار پوست نرم بادام و پوست برنج اصلاح شده در دو سطح (صفر و چهار درصد وزنی) به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد و به مدت یک ماه در شرایط رطوبت مزرعه‌ای (تنظیم شده با روش توزین) در گلخانه خوابانیده شد. بعد از یک ماه خوابانیدن (۳۷)، سرب (Pb²⁺) در دو سطح (۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) از نمک نیترات سرب به خاک هر گلدان افزوده و کاملاً مخلوط شد.

اعمال تیمارهای آلودگی سرب با توجه به حدود غلظت مجاز آن در خاک و شدت آلودگی این عنصر در خاک‌های کشور انتخاب گردید (۱). به گونه‌ای که دامنه‌ای از غلظت صفر سرب تا چندین برابر غلظت مجاز را پوشش می‌دهد. بنابراین، غلظت‌های سرب در دو سطح ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک انتخاب گردید. و سپس خاک در همان شرایط قبلی به مدت ۵ ماه نگهداری گردید (۳۱).

بررسی سینتیک واجذب سرب در خاک تحت تأثیر بایوچار اصلاح شده با (NaOH و HNO₃)

جهت مطالعات تغییرات سینتیک واجذب سرب در دوره زمانی ۵ ماه پس از خوابانیدن، نمونه‌های ۵ گرمی خاک را در لوله‌های سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و سپس ۲۵ میلی‌لیتر از عصاره‌گیر EDTA ۰/۰۱ مولار (۱۲) به نمونه‌ها (۴۸ نمونه) افزوده و در دستگاه تکان دهنده به صورت جداگانه و برای دوره‌های زمانی مختلف (۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه) با سرعت ۱۵۰ دور بر دقیقه تکان داده شد. پس از اتمام هر زمان تکان دادن، لوله‌ها به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه گریز از مرکز قرار داده شد و سپس محلول زلال رویی از کاغذ صافی عبور و سپس غلظت سرب،

عصاره‌گیری شده توسط دستگاه جذب اتمی تعیین گردید (پس از استخراج عصاره در هر زمان مجدداً به همان نمونه ۵ گرمی خاک، عصاره‌گیر EDTA اضافه کرده تا به عنوان نمونه برای زمان‌های بعدی استفاده شود).

جدول ۲- برخی ویژگی‌های شیمیایی بایوچارهای مورد آزمایش

Table 2- Selected chemical properties of the Biochars tested

خصوصیت Property	واحد Unit	بایوچار پوست نرم بادام Almond soft Husk Biochar	بایوچار پوست برنج Rice husk Biochar
پ‌هاش (۱:۵) (1:5) pH	-----	(9.81±0.08)	(8.75±0.06)
قابلیت هدایت الکتریکی (۱:۵) (1:5) EC	(dS m ⁻¹)	(3.56±0.03)	(2.93±0.05)
ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	(cmol(+) kg ⁻¹)	(30.86±0.5)	(37.52±1)
وزن مخصوص ظاهری Pb	(g cm ⁻¹)	(0.45±0.03)	(0.42±0.04)
وزن مخصوص حقیقی Ps	(g cm ⁻¹)	(1.07±0.05)	(1.12±0.07)
تخلخل F	(%)	(58±1)	(62±1)
آهن کل Fe	(mg kg ⁻¹)	(145±1)	(143.5±0.7)
روی کل Zn	(mg kg ⁻¹)	(28.32±0.06)	(3.75±0.03)
مس کل Cu	(mg kg ⁻¹)	(8.15±0.5)	(2.15±0.08)
منگنز کل Mn	(mg kg ⁻¹)	(13.45±1)	(93.85±0.8)
سرب Pb	(mg kg ⁻¹)	(ناچیز)	(ناچیز)

جدول ۳- معادله سینتیکی مورد استفاده در آزمایش

Table 3-The kinetic equation used in the experiment

شماره معادله Equation number	مدل سینتیکی Kinetic model	معادله‌ها Equations	ضرایب Coefficients
(1)	مرتبه صفر Zero order	$q_t = q_0 - k_0 t$	K_0 ثابت سرعت واجذب (mg kg ⁻¹ s ⁻¹) k_0 , desorption rate constant (mg kg ⁻¹ s ⁻¹)
(2)	مرتبه اول First order	$\ln q_t = \ln q_0 - k_1 t$	K_1 ثابت سرعت واجذب (s ⁻¹) k_1 , desorption rate constant (s ⁻¹)
(3)	مرتبه دوم Second order	$1/q_t = 1/q_0 - k_2 t$	K_2 ثابت سرعت واجذب [(mg kg ⁻¹) ⁻¹] k_2 , desorption rate constant [(mg kg ⁻¹) ⁻¹]
(4)	مرتبه سوم Third order	$1/q_t^2 = 1/q_0^2 - k_3 t$	K_3 ثابت سرعت واجذب [(mg kg ⁻²) s ⁻²] k_3 , desorption rate constant [(mg kg ⁻²) s ⁻²]
(5)	پخشیدگی سهموی Parabolic diffusion	$q_t = q_0 - k_p t^{1/2}$	K_p ثابت سرعت واجذب [(mg kg ⁻¹) ^{0.5}] K_p , desorption rate constant [(mg kg ⁻¹) ^{0.5}]
(6)	الوویچ ساده شده Elovich	$q_t = 1/\beta \ln(\alpha_s \beta_s) + (1/\beta_s) \ln t$	α_s , (mg kg ⁻¹ s ⁻¹) و β_s [(mg kg ⁻¹) ⁻¹], ثابت‌های معادله‌اند α_s , (mg kg ⁻¹ s ⁻¹), β_s [(mg kg ⁻¹) ⁻¹], Equations constants
(7)	تابع توانی Two-constant rate equations	$q_t = a t^b$	a , (mg kg ⁻¹ s ⁻¹) و b [(mg kg ⁻¹) ⁻¹], ثابت‌های معادله‌اند a , (mg kg ⁻¹ s ⁻¹), b [(mg kg ⁻¹) ⁻¹], Equations constants

q_t : مقدار عنصر آزاد شده در زمان t (ثانیه)
 q_0 : مقدار عنصر آزاد شده در زمان شروع
 q_t : The amount of element desorbed at time t (s)
 q_0 : The amount of element desorbed at startup

$$SE = \left(\frac{(\sum (Mt - Mt^*)^2)}{n - 2} \right)^{0.5} \quad (۱)$$

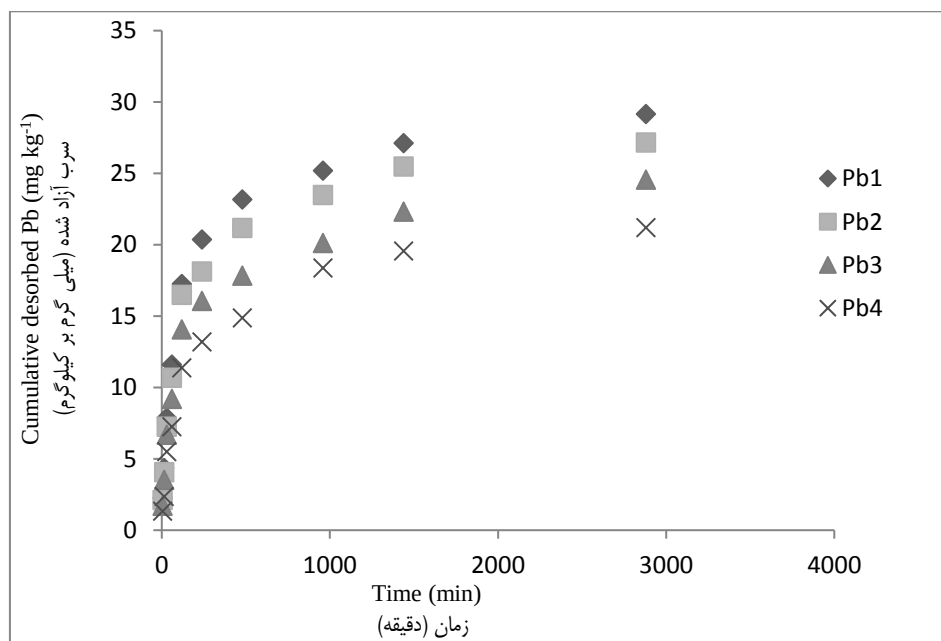
مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۳).

در این رابطه Mt مقدار فلز آزاد شده (mg kg^{-1}) در زمان t (ثانیه)، Mt^* مقدار فلز برآورد شده (mg kg^{-1}) از معادلات سرعت در زمان t (ثانیه)، و n تعداد مشاهدات می‌باشد. سطوح و نوع بایوچارهای اصلاح شده با علائم اختصاری در جدول ۴ نشان داده شده است.

معادله‌های مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، الویج ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی سهموی جهت توصیف سینتیکی واجذب عناصر ذکر شده، مورد استفاده قرار گرفت. معادلاتی که دارای بیشترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطا استاندارد (SE) بود به عنوان بهترین معادلات پیش‌بینی‌کننده سینتیک واجذبی سرب در خاک انتخاب شدند. همچنین ضرایب مربوط به معادلات با قدرت پیش‌بینی بالا محاسبه و میانگین این ضرایب بین تیمارهای مختلف

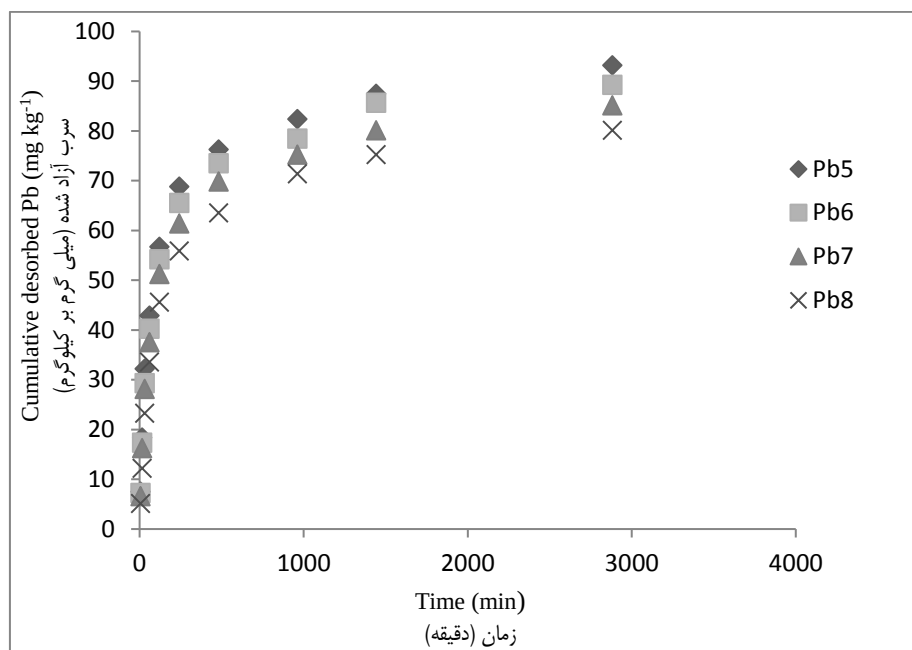
جدول ۴- سطوح و نوع بایوچارهای اصلاح شده در آزمایش
Table 4- Experimental design for incubation experiment

تیمارها Treatment	اختصار Abbreviation	آلودگی با سرب Pollution with Pb	سطوح آلودگی با بایوچار پوست برنج Level of rice husk biochar (RI)	سطوح آلودگی با بایوچار پوست نرم بادام Level of almond soft husk biochar (AL)
Pb ₃₀₀ B ₀	Pb1	300 mg kg ⁻¹	0 wt%	0 wt%
Pb ₃₀₀ B ₄	Pb2	300 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%
Pb ₃₀₀ B ₄ HNO ₃	Pb3	300 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%
Pb ₃₀₀ B ₄ NaOH	Pb4	300 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%
Pb ₆₀₀ B ₀	Pb5	600 mg kg ⁻¹	0 wt%	0 wt%
Pb ₆₀₀ B ₄	Pb6	600 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%
Pb ₆₀₀ B ₄ HNO ₃	Pb7	600 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%
Pb ₆₀₀ B ₄ NaOH	Pb8	600 mg kg ⁻¹	4 wt%	4 wt%

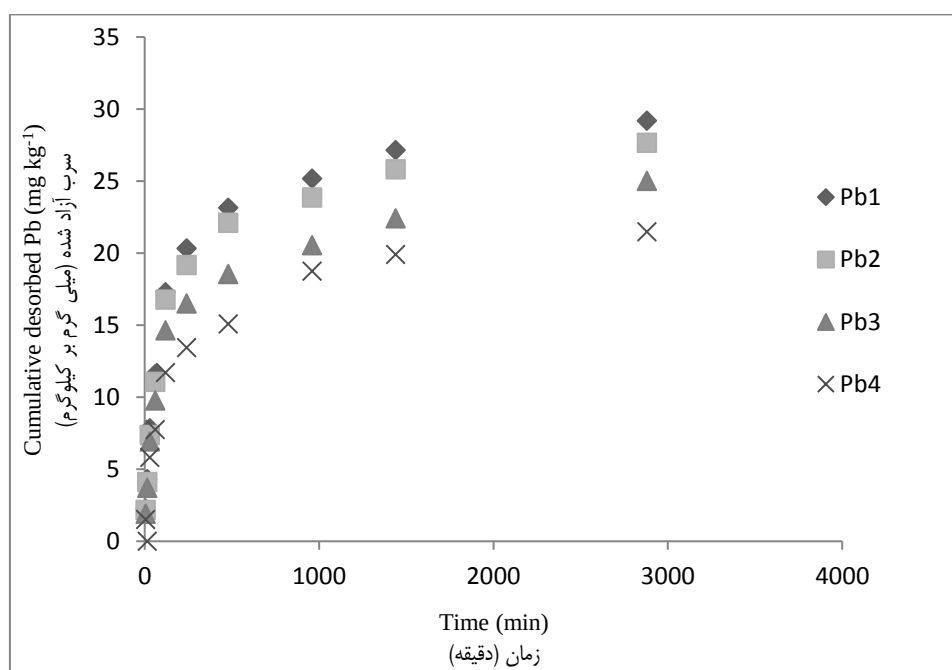


شکل ۱- آزادسازی سرب با زمان در خاک تیمار شده با بایوچار پوست برنج، در غلظت ۳۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن

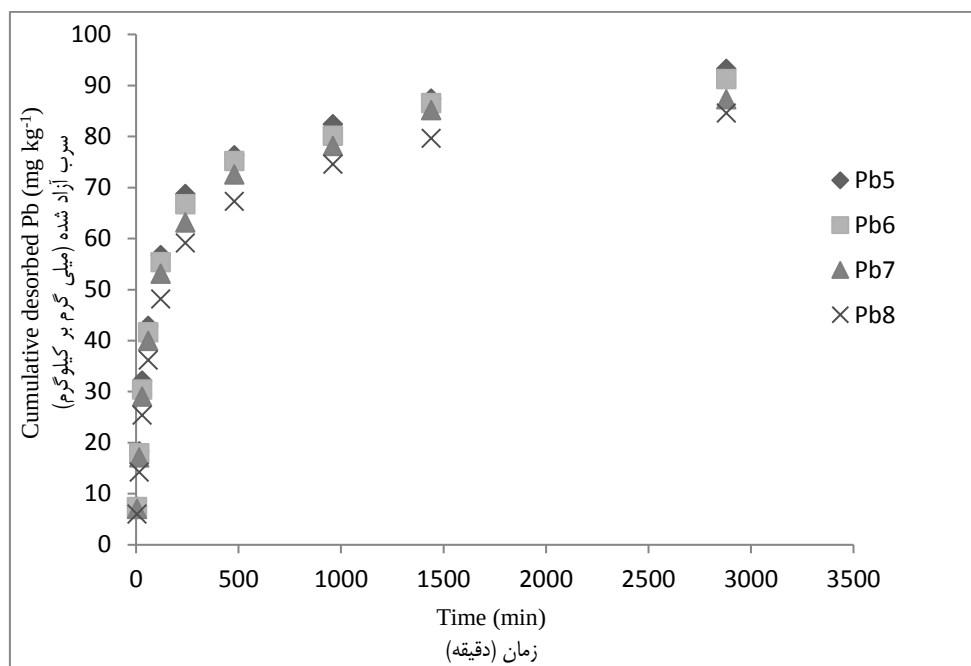
Figure 1- Lead desorption (cumulative) over time in the soil treated with rice husk biochar, at a concentration of 300 mg kg⁻¹, 5 months after incubation



شکل ۲- آزادسازی سرب با زمان در خاک تیمار شده با بایوچار پوست برنج، در غلظت 600 mg kg^{-1} میلی گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن
Figure 2- Lead desorption (cumulative) over time in the soil treated with rice husk biochar, at a concentration of 600 mg kg^{-1} , 5 months after incubation



شکل ۳- آزادسازی سرب با زمان در خاک تیمار شده با بایوچار پوست نرم بادام، در غلظت 300 mg kg^{-1} میلی گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن
Figure 3- Lead desorption (Cumulative) over time in the soil treated with almond soft husk biochar, at a concentration of 300 mg kg^{-1} , 5 months after incubation



شکل ۴- آزادسازی سرب با زمان در خاک تیمار شده با بایوچار پوست نرم بادام، در غلظت ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن
 Figure 4- Lead desorption (Cumulative) over time in the soil treated with almond soft husk biochar, at a concentration of 600 mg kg⁻¹, 5 months after incubation

نتایج و بحث

سینتیک واجذب سرب در خاک

تأثیر کاربرد بایوچار اصلاح شده پوست نرم بادام و پوست برنج، ۵ ماه بعد از انکوباسیون بر سینتیک واجذب سرب در زمان‌های مختلف (۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰، ۹۶۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه) عصاره‌گیری نسبت به تیمار شاهد در شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است.

تغییرات بوجود آمده از اثر زمان بر آزادسازی سرب در خاک‌های تیمار شده، ۵ ماه بعد از خوابانیدن نشان می‌دهد که الگوی واجذب این عنصر در همه نمونه‌ها به شکل یکسانی می‌باشد (شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴). واجذب سریع اولیه در زمان‌های آغازین واجذب (۳۰ دقیقه اولیه) و به دنبال آن واجذب با سرعتی کمتر (۸ ساعت) و در نهایت رسیدن به تعادل در نمونه‌های تیمار شده و نمونه شاهد مشاهده گردید. تغییرات حاصله از میزان سرب آزاد شده در خاک‌های تیمار شده نسبت به خاک شاهد نشان‌دهنده تأثیر مثبت بایوچارهای به کار برده شده در این تحقیق می‌باشد. هان و همکاران (۲۱) بیان کردند که تغییر شکل فلزات سنگین که به صورت نمک‌های محلول به خاک اضافه می‌شود در ابتدا به صورت سریع اتفاق می‌افتد و سپس به کندی و در بلند مدت واجذب می‌شوند. دانگ و همکاران (۱۵) گزارش کردند که با افزایش زمان، غلظت عناصر آزاد شده افزایش یافته است که در ابتدا این میزان بیشتر و در زمان ۱۰ ساعت به تعادل می‌رسد و سپس با

سرعت کمتری افزایش می‌یابد. یانگ و همکاران (۴۹) در آزمایشی تأثیر pH، اسیدهای آلی و رقابت یون‌ها را بر واجذب سرب در دو خاک با خصوصیات متفاوت بررسی نموده و گزارش کردند که در هر دو خاک واجذب سرب با افزایش pH ۲۰ تا ۱۰۰ درصد کاهش نشان داد. افزودن بایوچار پوست نرم بادام و پوست برنج اصلاح شده به خاک منجر به کاهش واجذب سرب در تمام زمان‌های عصاره‌گیری نسبت به تیمار شاهد گردید، در حالی که بایوچار پوست برنج در مقایسه با بایوچار پوست نرم بادام سبب کاهش چشمگیری در مقدار واجذب سرب نسبت به خاک شاهد گردید. بیشترین میزان واجذب سرب مربوط به خاک بدون تیمار با بایوچار می‌باشد، در حالیکه کمترین میزان واجذب مربوط به بایوچار پوست نرم بادام و پوست برنج اصلاح شده با NaOH می‌باشد، کاربرد بایوچار پوست برنج اصلاح شده سبب کاهش واجذب سرب به مقدار بسیار کمتر در مقایسه با بایوچار پوست نرم بادام اصلاح شده گردید. ایکسیو و همکاران (۴۸) گزارش کردند که بایوچار می‌تواند محتوای مواد آلی و CEC خاک را افزایش داده و همچنین کمپلکس یون‌های فلزات سنگین در خاک را افزایش دهد، بنابراین می‌تواند مقدار فلزات سنگین در خاک را کاهش دهد (۱۱). مطالعات ژنگ و همکاران (۵۲) نشان داد که با افزایش pH، هیدرولیز کاتیون‌های فلزات سنگین افزایش یافته است که باعث تشکیل رسوب‌های این فلزات می‌شود بایوچار در خاک می‌تواند از طریق تشکیل رسوبات و افزایش جذب فلزات، تبدیل فلزات سنگین را از اشکال محلول به اشکال پایدار القا کند، که باعث افزایش راندمان

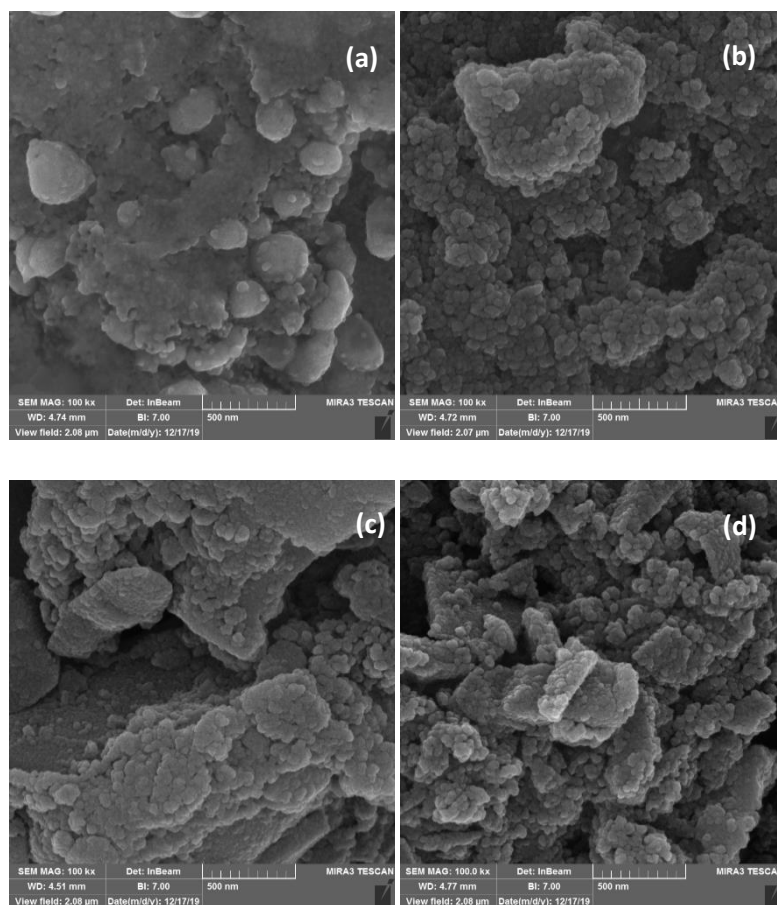
باعث افزایش مساحت سطح، گروه‌های عملکردی سطح حاوی اکسیژن و ظرفیت تبادل کاتیونی بایوچار حاصل از چوب گردید. یافته‌های حاصل از این کار نشان می‌دهد که برای اصلاح توانایی حذف فلزات سنگین می‌توان از روش اصلاح قلیایی برای بایوچار استفاده کرد و بایوچار اصلاح شده دارای پتانسیل بسیار خوبی به عنوان جاذب جایگزین برای اصلاح محیط زیست می‌باشد (۱۴).

همانطور که در تصاویر FESEM (شکل ۵) مشاهده می‌شود، بایوچار پوست برنج و پوست نرم بادام اصلاح نشده تقریباً ساختار متخلخل دارند. بایوچار پوست برنج اصلاح شده با HNO_3 و NaOH نشان می‌دهد که هر دو باعث افزایش تعداد حفره‌ها در بایوچار شده و این افزایش بیشتر در بایوچار اصلاح شده با NaOH می‌باشد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که میزان حفره‌های ایجاد شده در بایوچار پوست برنج در حضور NaOH بیشتر است که می‌تواند بیانگر موفقیت بیشتر این ساختار در کاهش آلودگی‌های مورد نظر در مقایسه با بایوچار اصلاح شده با HNO_3 باشد. علاوه بر این ایزوترم‌های جذب و دفع ازت برای نیتروژن برای نمونه‌های مختلف نشان داد که مساحت سطح پوست بادام و پوست برنج اصلاح نشده به ترتیب $1/92$ و $20/42$ متر مربع در گرم است. اصلاح بایوچار پوست برنج با NaOH منجر به افزایش بسیار چشمگیر مساحت سطح از $20/42$ به $81/6$ متر مربع در گرم شد که مطابق با تصاویر FESEM بود. از طرف دیگر، اصلاح بایوچار پوست برنج با HNO_3 تاثیری بر مساحت سطح در مقایسه با بایوچار اصلاح نشده نشان نداد. اما قطر منافذ آن تقریباً دو برابر شده است.

مقایسه معادلات سینتیک واجذب سرب

برازش داده‌های واجذبی سرب بوسیله معادلات سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، مرتبه سوم، پخشیدگی سهموی، الوویج ساده شده و تابع توانی بررسی گردید. ضریب‌های ثابت، ضریب تبیین و خطای استاندارد مدل‌های مختلف سینتیکی واجذبی سرب، ۵ ماه بعد از خواباندن در (جدول ۵ و ۶) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از این معادلات نشان می‌دهد که معادلات سینتیکی مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، و مرتبه سوم به دلیل پایین بودن مقادیر ضریب تبیین قادر به پیش‌بینی قابل قبولی از واجذبی سرب در نمونه‌های خاک نمی‌باشند. با افزایش مرتبه واکنش از مرتبه صفر به مرتبه سه میزان ضریب تبیین کاهش یافته است. برازش داده‌های آزاد شدن سرب از خاک‌ها با معادله پخشیدگی سهموی نشان می‌دهد که به دلیل ضریب تبیین پایین و خطای استاندارد برآورد نسبتاً بالا، این معادله نمی‌تواند معادله قابل قبولی برای توصیف آزاد شدن سرب از خاک مورد مطالعه باشد.

حذف آن‌ها از محیط‌زیست می‌شود. نتایج نشان داد که کاربرد بایوچار پوست برنج و پوست نرم بادام اصلاح شده با NaOH در تیمار 300 میلی‌گرم بر کیلوگرم آلودگی سرب در خاک نسبت به خاک شاهد در دوره زمانی ۵ ماه بعد از خواباندن، مقدار سرب واجذب شده بعد از ۸ ساعت از خاک به ترتیب 36 و 35 درصد کاهش یافت، در حالی که در تیمار 600 میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب با کاربرد بایوچار پوست برنج و پوست نرم بادام اصلاح شده با NaOH نسبت به تیمار شاهد، مقدار سرب واجذب شده بعد از ۸ ساعت از خاک به ترتیب 17 و 13 درصد کاهش یافت. تحقیقات انجام شده درخصوص تغییرات زیست فراهمی عناصر نشان می‌دهد که این عناصر بلافاصله بعد از افزوده شدن به خاک بیشترین فراهمی را دارند و با گذشت زمان پویایی و فراهمی آن‌ها توسط سازوکارهای مختلفی مانند جذب سطحی توسط کلونیدهای خاک، واکنش‌های تبدیلی و کلاته شدن کنترل شده و حلالیت آن‌ها کاهش می‌یابد (۳۳). ما و همکاران (۳۴) بیان کردند که کاهش واجذب سرب و مس در خاک تحت کشت برنج به علت افزایش ماده آلی خاک می‌باشد. زیرا افزایش ماده آلی باعث افزایش جذب اختصاصی سرب و مس به وسیله خاک شده و اجازه‌ی واجذب عناصر را توسط نمک‌های غیر بافری نمی‌دهد. استوارت و همکاران (۴۳) بیان کردند که مقدار کم ماده آلی در خاک باعث واجذب بیشتر عناصر از خاک می‌شود. پادمانابهام (۳۸) بیان نمود که با افزایش غلظت سرب خاک، مکان‌های قابل دسترس برای تشکیل پیوند با سرب کاهش یافته اما انرژی مورد نیاز برای جذب سرب افزایش می‌یابد بنابراین مقدار زیادی از سرب مصرفی، واجذب می‌گردد. ژنگ و همکاران (۵۲) گزارش کردند که کاربرد بایوچار حاصل از کاه برنج در یک خاک آلوده، سبب کاهش معنی‌دار غلظت سرب عصاره‌گیری شده به میزان 94 درصد نسبت به تیمار شاهد گردید. پوگا و همکاران (۴۰) مشاهده کردند که کاربرد بایوچار بقایای نیشکر در سطوح $1/5$ ، 3 و 5 درصد وزنی در یک خاک آلوده سبب کاهش غلظت قابل استفاده سرب (عصاره‌گیری شده توسط DTPA) به میزان 56 درصد نسبت به تیمار شاهد شد. در بررسی اثر بایوچار تولید شده از بقایای هرس درختان در دمای 500 درجه سانتی‌گراد در سطوح $(0, 1/5, 10)$ درصد وزنی بر قابلیت دسترسی و آبشویی فلزات سنگین در خاک مشاهده گردید که کاربرد بایوچار سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای از کروم در مقایسه با تیمار شاهد شده است (۱۷). بایوچار مهندسی شده چوب درختان که با NaOH اصلاح گردید سبب بهبود سطح بایوچار و ظرفیت تبادل کاتیونی آن به طور قابل توجهی گردید. بایوچار اصلاح شده ظرفیت جذب فلزات سنگین (سرب، مس، کادمیم، روی و نیکل) را ($2/6$ تا $5/8$ برابر) نسبت به بایوچار شاهد افزایش داده است. بایوچار اصلاح شده با NaOH می‌تواند به عنوان یک جاذب خوب برای جذب فلزات سنگین باشد. این کار نشان داد که اصلاح قلیایی (NaOH)



شکل ۵- تصاویر FESEM (a) بایوچار پوسته نرم بادام اصلاح نشده، (b) بایوچار پوسته برنج اصلاح نشده، (c) بایوچار پوست برنج اصلاح شده با HNO_3 ، (d) بایوچار پوسته برنج اصلاح شده با NaOH

Figure 5- FESEM for (a) non-modified almond soft husk biochar, (b) non-modified rice husk biochar, (c) HNO_3 -modified rice husk biochar, and (d) NaOH - modified rice husk biochar

میزان واجذب و به عبارتی افزایش تثبیت سرب در خاک تیمار شده نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. در تابع توانی با کاربرد بایوچار ضرایب a و b نسبت به شاهد کاهش یافت بنابراین سرعت واجذب سرب در خاک نیز کاهش یافت. مقادیر ثابت‌های K_p و q_0 از معادله پخشیدگی سهموی نسبت به تیمار شاهد کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش واجذب سرب در نمونه‌های تیمار شده با بایوچار نسبت به تیمار شاهد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد بایوچارهای اصلاح شده با NaOH در خاک سبب کاهش قابلیت دسترسی سرب در خاک می‌شود. در تابع توانی با کاربرد بایوچارهای اصلاح شده ضرایب a نسبت به شاهد کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش سرعت واجذبی سرب در خاک می‌باشد. واکنش‌های جذب واجذب فلزات سنگین از اجزای اصلی خاک، از جمله فرایندهای مهم در کنترل پویایی و زیست فراهمی این سرب در خاک می‌باشد (۲۵) و (۴۹). زیست فراهمی سرب در خاک به شدت وابسته به رفتار جذب واجذبی خاک می‌باشد (۳۵). فرآیند جذب، غیر پویا شدن سرب را

همچنین، برازش داده‌های رهاسازی سرب از خاک با معادله الووچ نشان می‌دهد که این معادله دارای ضریب تبیین و مقادیر خطای استاندارد برآورد بالایی می‌باشد، لذا نمی‌تواند به عنوان معادله ای مناسب جهت پیش‌بینی واجذبی سرب در خاک مورد مطالعه معرفی شود. استفاده از معادله تابع توانی برای برازش داده‌های آزاد شدن سرب از خاک نشان داد که این معادله به دلیل داشتن ضریب تبیین نسبتاً بالا و دارا بودن مقادیر خطای استاندارد برآورد پایین می‌تواند آزاد شدن سرب را از خاک توصیف کند و به عنوان بهترین معادله جهت توصیف واجذبی سرب در خاک مورد مطالعه معرفی گردد. لی و همکاران (۲۷) معادله تابع توانی را به عنوان بهترین معادله در سینتیک واجذبی سرب در خاک‌های آلوده به این عنصر معرفی کردند. مقادیر ثابت‌های سرعت α_s و β_s معادله الووچ در خاک تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (جدول ۵ و ۶). افزایش مقدار β_s و کاهش مقدار α_s نشان‌دهنده کاهش سرعت واجذب سرب در خاک می‌باشد، ثابت α_s بیانگر اثر مثبت بایوچارهای اصلاح شده در کاهش

مختلف انجام دادند دریافتند که در خاک با pH و CEC بالاتر، واجذب عناصر آسانتر صورت می‌گیرد. مواد آلی موجود در خاک دارای گروه‌های عاملی مثل کربوکسیل و فنلی متصل به ساختمان حلقوی آروماتیک می‌باشند. این اجزای فعال می‌توانند با عناصر (یون) کمپلکس‌هایی را تشکیل دهند در نهایت واجذب عناصر را کاهش دهند. در یک آزمایش مزرعه‌ای در یک خاک آلوده به سرب و کادمیم در شرایط غرقابی تحت کشت برنج، با کاربرد بایوچار کلش گندم تولید شده در محدوده دمایی بین ۳۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان تثبیت‌کننده دو عنصر سرب و کادمیم استفاده کردند و نشان دادند که افزایش بایوچار به خصوص بایوچار تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد سبب افزایش pH خاک، کربن آلی و همچنین سبب کاهش کادمیم و سرب استخراجی از خاک شده است (۶).

افزایش می‌دهد در حالی که فرآیند واجذب، غلظت سرب در محلول خاک را می‌افزاید (۲). واجذبی یون‌های جذب شده از فاز جامد، در حقیقت قابل دسترسی و پتانسیل آبشویی این یون‌ها را در خاک کنترل می‌کنند (۲۲). یانگ و همکاران (۴۹) بیان کردند که از عوامل مهم در کنترل واجذب سرب، پ‌هاش خاک می‌باشد. کیم و همکاران (۲۴) بررسی تأثیر اسیدهای آلی، pH و زمان را در واجذب سرب از خاک گزارش کردند بیان کردند که pH از عوامل مهم و تأثیرگذار در واجذب فلزات سنگین از خاک می‌باشد. آنها همچنین گزارش کردند که برخی خصوصیات خاک مثل pH، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی و اکسیدهای منگنز نیز تأثیر مهمی بر واجذب فلزات سنگین از خاک دارند و بیان نمودند که واجذب عناصر، با افزایش زمان ماندن عناصر در خاک، کاهش می‌یابد. کیم و همکاران (۲۴) نیز طی آزمایشی که بر روی دو خاک با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

جدول ۵- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین (R^2) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی واجذب سرب در خاک تیمار شده با بایوچار پوست برنج، غلظت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن

Table 5- Fixed coefficients, coefficient of determination (R^2) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of lead desorption in treated soil with of rice husk biochar, concentration 300 and 600, 5 months after incubation

		Pb1	Pb2	Pb3	Pb4	Pb5	Pb6	Pb7	Pb8
مرتبه صفر Zero order	q_0	11.18	10.94	9.38	7.66	41.64	39.55	37.29	32.88
	k_0	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}
	R^2	0.57	0.58	0.62	0.63	0.54	0.55	0.55	0.57
	SE	6.78	6.22	5.22	4.60	21.58	20.88	19.74	18.77
مرتبه اول First order	q_0	2.22	2.14	1.99	1.75	3.50	3.45	3.38	3.22
	k_1	9×10^{-6}	9×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	8×10^{-6}	9×10^{-6}	9×10^{-6}	1×10^{-5}
	R^2	0.36	0.37	0.38	0.38	0.33	0.34	0.34	0.34
	SE	0.73	0.73	0.74	0.79	0.71	0.71	0.71	0.78
مرتبه دوم Second order	q_0	0.15	0.16	0.19	0.26	0.04	0.04	0.05	0.06
	k_2	-1×10^{-6}	-1×10^{-6}	-1×10^{-6}	-2×10^{-6}	-3×10^{-7}	-3×10^{-7}	-3×10^{-7}	-4×10^{-7}
	R^2	0.19	0.19	0.18	0.19	0.16	0.16	0.16	0.16
	SE	0.12	0.13	0.16	0.22	0.04	0.04	0.04	0.06
مرتبه سوم Third order	q_0	0.04	0.05	0.07	0.12	0.01	0.01	0.01	0.01
	k_3	-4×10^{-7}	-4×10^{-7}	-6×10^{-7}	-1×10^{-6}	-3×10^{-8}	-3×10^{-8}	-4×10^{-8}	-6×10^{-8}
	R^2	0.11	0.10	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
	SE	0.06	0.07	0.11	0.18	0.01	0.01	0.01	0.01
پخشیدگی سهموی Parabolic diffusion	q_0	7.11	6.47	5.45	4.09	26.94	25.22	23.67	19.57
	k_p	0.11	0.11	0.11	0.11	0.21	0.21	0.18	0.18
	R^2	0.81	0.81	0.84	0.85	0.79	0.78	0.79	0.81
	SE	4.61	4.19	3.42	2.91	15.10	14.51	13.66	12.70
الویچ ساده شده Elovich	α_s	25.48	23.76	21.11	19.62	74.16	72.81	69.54	70.75
	β_s	3.41	3.80	4.31	4.63	12.58	13.22	13.89	14.32
	R^2	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	SE	1.35	1.23	0.92	0.90	3.77	3.71	3.32	3.04
تابع توانی Two-constant rate equations	a	1.80	1.31	1.11	1.03	0.49	0.41	0.32	0.15
	b	0.43	0.41	0.41	0.41	0.41	0.37	0.37	0.37
	R^2	0.90	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90
	SE	0.29	0.29	0.29	0.30	0.31	0.30	0.31	0.33

جدول ۶- ضریب‌های ثابت، ضریب‌های تبیین (R^2) و خطای استاندارد برآورد (SE) معادلات سینتیکی و جذب سرب در خاک تیمار شده با بایوچار پوست نرم بادام، غلظت ۳۰۰ و ۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، ۵ ماه بعد از خوابانیدن

Table 6- Fixed coefficients, coefficient of determination (R^2) and standard error of estimation (SE) of kinetic equations of Lead desorption in treated soil with of almond soft husk biochar, concentration 300 and 600, 5 months after incubation

		Pb1	Pb2	Pb3	Pb4	Pb5	Pb6	Pb7	Pb8
مرتبه صفر Zero order	q_0	11.86	11.32	9.79	7.58	41.64	40.51	38.94	35.24
	k_0	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}	4×10^{-4}
	R^2	0.57	0.57	0.61	0.61	0.54	0.55	0.54	0.57
	SE	6.77	6.47	5.33	4.41	21.59	21.18	20.62	19.44
مرتبه اول First order	q_0	2.22	2.17	2.04	1.82	3.50	3.47	3.43	3.31
	k_1	9×10^{-6}	9×10^{-6}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	8×10^{-6}	9×10^{-6}	9×10^{-6}	9×10^{-6}
	R^2	0.37	0.36	0.37	0.39	0.33	0.34	0.34	0.35
	SE	0.73	0.73	0.72	0.74	0.71	0.71	0.71	0.74
مرتبه دوم Second order	q_0	0.15	0.16	0.18	0.23	0.04	0.04	0.05	0.05
	k_2	-1×10^{-6}	-1×10^{-6}	-1×10^{-6}	-2×10^{-6}	-3×10^{-7}	-3×10^{-7}	-3×10^{-7}	-4×10^{-7}
	R^2	0.19	0.19	0.19	0.19	0.16	0.16	0.16	0.16
	SE	0.12	0.13	0.15	0.19	0.04	0.04	0.04	0.05
مرتبه سوم Third order	q_0	0.04	0.05	0.06	0.09	0.01	0.01	0.01	0.01
	k_3	-4×10^{-7}	-4×10^{-7}	-5×10^{-7}	-4×10^{-7}	-3×10^{-8}	-3×10^{-8}	-3×10^{-8}	-5×10^{-8}
	R^2	0.11	0.11	0.11	0.11	0.09	0.09	0.09	0.09
	SE	0.06	0.07	0.08	0.14	0.01	0.01	0.01	0.01
پخشیدگی سهموی Parabolic diffusion	q_0	7.06	6.77	5.84	4.44	26.99	26.01	24.77	21.40
	k_p	0.07	0.06	0.06	0.05	0.20	0.20	0.19	0.19
	R^2	0.80	0.80	0.83	0.85	0.78	0.78	0.78	0.81
	SE	4.60	4.42	3.55	2.91	15.11	14.75	14.28	13.13
الویچ ساده شده Elovich	α_s	25.50	24.14	20.95	19.28	74.21	73.53	72.51	71.94
	β_s	3.41	3.83	4.39	4.64	13.36	13.71	14.11	14.32
	R^2	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
	SE	1.36	1.35	0.97	0.85	3.78	3.67	3.53	2.95
تابع توانی Two-constant rate equations	a	1.54	1.15	1.07	1.03	0.49	0.45	0.38	0.09
	b	0.41	0.39	0.39	0.39	0.39	0.37	0.37	0.37
	R^2	0.90	0.90	0.90	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	SE	0.29	0.29	0.28	0.28	0.31	0.31	0.30	0.31

نتیجه گیری

کاهش در تیمار بایوچار پوست برنج اصلاح شده با NaOH نسبت به بایوچار پوست نرم بادام بیشتر می‌باشد. می‌توان بیان کرد که بایوچار پوست برنج به دلیل ساختار متخلخل تر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر موفق تر از بایوچار پوست نرم بادام عمل نموده است. با توجه به مطالب فوق الذکر ممکن است بتوان کاربرد بایوچار را به عنوان یک ماده اصلاحی در خاک‌های آلوده به این عنصر توصیه نمود. همچنین از بین معادله‌هایی که برای ارزیابی و جذب سرب مورد استفاده قرار گرفت معادله تابع توانی به دلیل ضریب تبیین (R^2) بالا و خطای استاندارد (SE) پایین به عنوان بهترین مدل جهت برازش داده‌ها انتخاب گردید.

به طور کلی مکانیسم‌های جذب فلزات سنگین توسط بایوچار شامل برهمکنش‌های الکترواستاتیک، تبادل یونی، رسوب شیمیایی و تشکیل کمپلکس با گروه‌های عاملی در سطح بایوچار می‌باشد. بایوچار بر روی سطح خود دارای گروه‌های عاملی آلی (هیدروکسیل، کربوکسیل و کربونیل) می‌باشد، که می‌توانند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش داده و تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین را افزایش دهند. همچنین بار منفی در گروه‌های عاملی در طول زمان و در طی اکسیداسیون در خاک افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، بایوچار اصلاح شده با NaOH باعث کاهش چشمگیری در و جذب سرب نسبت به بقیه تیمارها گردید که این

- 1- Abaspour A., Kalbasi M., Haj Rasoliya Sh., and Gholchin A. 2005. Investigating the contamination of some Iranian agricultural lands with cadmium and lead. Ninth Iranian Soil Science Congress, Tehran 543-545. (In Persian)
- 2- Adhikari T., and Singh M.V. 2003. Sorption characteristics of lead and cadmium in some soils of India. *Geoderma* 114: 81-92.
- 3- Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., Zhang M., Bolan N., Mohan D., Vithanage M., Lee S.S., and Ok Y.S. 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* 99: 19-33.
- 4- Allison L.E., and Moodie C.D. 1965. Carbonate. p. 1379 -1396. In C.A. Black (ed.). *Methods of Soil Analysis*. part 2. American. Society. Agronomy, Madison. WI.
- 5- Beesley L., and Marmiroli M. 2011. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution* 159: 474-480.
- 6- Bian R., Joseph S., Cui L., Pan G., Li L., Liu X., and Donne S. 2014. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment. *Journal of Hazardous Materials* 272: 121-128.
- 7- Bouyoucos G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal* 54: 464-465.
- 8- Bremner J.M. 1996. Nitrogen Total. In: D.L. Sparks et al., (eds) *Methods of Soil Analysis*. 1085-1122. part 3- American. Society. Agronomy, Madison. WI.
- 9- Canbay M., Aydin A., and Kurtulus C. 2010. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey). *Journal of Applied Geophysics* 70: 46-57.
- 10- Dabrowski A., Hubicki Z., Podkoscelny P., and Robens E. 2004. Selective removal of the heavy metal ions from waters and industrial wastewaters by ion-exchange method. *Chemosphere* 56: 91-106.
- 11- Dai S., Li H., Yang Z., Dai M., Dong X., Ge X., Sun M., and Shi L. 2018. Effects of biochar amendments on speciation and bioavailability of heavy metals in coal-mine-contaminated soil. *Human Ecological Risk Assess* 24: 1887-1900.
- 12- Dang Y.P., Dalal R.C., Edwards D.G., and Tiller K.G. 1994. Kinetics of zinc desorption from vertisols. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1392-1399.
- 13- Dehkhoda A.M., Ellis N., and Gyenge E. 2016. Effect of activated biochar porous structure on the capacitive deionization of NaCl and ZnCl₂ solutions, *Microporous and Mesoporous Materials* 224: 217-228.
- 14- Ding Z., Hu X., Wan Y., Wang S., and Gao B. 2016. Removal of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel from aqueous solutions by alkali-modified biochar: Batch and column tests. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 33: 239-245.
- 15- Dong D., Zhao X., Hua X., Liu J., and Gao M. 2009. Investigation of the potential mobility of Pb, Cd and Cr(VI) from moderately contaminated farmland soil to groundwater in northeast China. *Journal of Hazardous Materials* 162: 1261- 1268.
- 16- Fan Y, Wang B, Yuan S, Wua X, Chen J, and Wang L. 2010. Adsorptive removal of chloramphenicol from wastewater by NaOH modified bamboo charcoal. *Bioresource Technology* 101: 7661-7664.
- 17- Fellet G., Marchiol L., Delle Vedove G., and Peressotti A. 2011. Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. *Chemosphere* 83: 1262-1267.
- 18- Gaskin J., Steiner C., Harris K., Das K., and Bibens B. 2008. Effect of low_ temperature pyrolysis conditions on biochar for agriculture use. *Transaction of the Asabe* 51: 2061-2069.
- 19- Hall G., Woodborne S., and Scholes M. 2008. Stable carbon isotope ratios from archaeological charcoal as palaeoenvironmental indicators. *Chemical Geology* 247: 384-400.
- 20- Haluschak P. 2006. Laboratory methods of soil analysis. Canada -Manitoba soil survey 3-133.
- 21- Han F.X., Banin A., and Triplett G.B. 2001. Redistribution of heavy metals in arid- zone soils under a wetting- drying cycle soil moisture regime. *Soil Science Journal* 166: 18- 28.
- 22- Hutchison J.M., Seaman J.C., Aburime S.A., and Radcliffe D.E. 2003. Chromate transport and retention in variably saturated soil columns. *Vadose Zone Journal* 2: 702-714.
- 23- Jiang J., Xu R., Kou M., Jiang T., Yu S., and Li, Z. 2012. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II) by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials* 229-230: 145-150.
- 24- Kim B., and McBride M.B. 2006. A test of sequential extraction for determining metal speciation in sewage sludge- amended soils. *Environmental Pollution Journal* 144: 475 - 482.
- 25- Krishnamurti G.S.R., Huang P.M., and Kozak L.M. 1999. Sorption and desorption kinetics of cadmium from

- soils: influence of phosphate. *Soil Science Journal* 164: 888-898.
- 26- Kumpiene J., Lagerkvist A., and Maurice C. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments—a review. *Waste Management* 28: 215-225.
- 27- Li J.S., Wang P., and Liu L. 2013. Environmental prediction model for dynamic release of lead in contaminated soil under washing remediation. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 18: 55-70.
- 28- Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428.
- 29- Lone M.I., He Z., Stoffella P.J., and Yang X. 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. *Journal Zhejiang University Science* 9: 210-220.
- 30- Lua A.C., Yang T. and Guo J. 2004. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 72: 279-287.
- 31- Lu S.G., Sun F.F., and Zong Y.T. 2014. Effect of rice husk biochar and coalfly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena* 114: 37–44.
- 32- Luo C., Shen Z., Lou S., and Li X. 2005. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* 59: 1–11.
- 33- Ma L.Q., and Gade R.N. 1997a. Chemical Fractionation of cadmium, copper, nickel, and zinc in contaminated soils. *Journal Environmental Science* 26: 259 - 264.
- 34- Ma L., Xu R., and Jiang J. 2010b. Adsorption and desorption of Cu(II) and Pb(II) in paddy soils cultivated for various years in the subtropical China. *Journal Environmental Science* 22: 689– 695.
- 35- Mouni L., Merabet D., Robert D., and Bouzaza A. 2009. Batch studies for the investigation of the sorption of the heavy metals Pb²⁺ and Zn²⁺ on to Amizour soil (Algeria). *Geoderma* 154: 30-35.
- 36- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 961-1010. 3rd Ed. In: Sparks, D. L., et al., (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3- chemical methods and microbiological properties*. Soil Science of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- 37- Norozi M., Tabatabaie S.H., Norozi M.R., and Motaghyani H.R. 2016. Biochar short-term effects of date leaves on maintaining moisture in sandy loam soil. *Journal of Water and Soil Conservation* 6: 137-150. (In Persian)
- 38- Padmanabham, M. 1983. Comparative study of the adsorption - desorption behaviour of copper (II), zinc (II), cobalt (II) and lead (II) at the goethite solution interface. *Australian Journal Soil Research* 21: 515-525.
- 39- Park J.H., Ok Y.S., Kim S.H., Cho J.S., Heo J.S., Delaune R.D., and Seo D.C. 2016. Competitive adsorption of heavy metals onto sesame straw biochar in aqueous solutions. *Chemosphere* 31: 142. 77-83.
- 40- Puga A.P., Abreu C.A., Melo L.C.A., and Beesley L. 2015. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium. *Journal of Environmental Management* 159: 86-93.
- 41- Rhoades J.D., Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., and Sumner M.E. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-435. *Methods of Soil Analysis. Part 3- Chemical Methods*.
- 42- Song W. and Guo M. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 94: 138-145.
- 43- Stewart M.A., Jardine P.M., Barnett M.O., Mehlhoun T.L., Heyder L.K., and McKay L.D. 2003. Influence of soil geochemical and physical properties on the sorption and bioaccessibility of chromium (III). *Journal Environmental Quality* 32: 129-137.
- 44- Sumner M.E., Miller W.P., Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., and Johnston C.T. 1996. Cation exchange capacity and exchange coefficients. p. 1201-1229. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*.
- 45- Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475- 490. In D.L. Sparks et al., (eds) *Methods of Soil Analysis. part 3-American Society of Agronomy., Madison, WI*.
- 46- Uchimiya M., Bannon D.I., and Wartelle L.H. 2012. Retention of heavy metals by carboxyl functional groups of biochars in small arms range soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 60: 1798–1809.
- 47- Wang H., Gao B., Wang S., Fang J., Xue Y., and Yang, K. 2015. Removal of Pb, II, Cu, II, and Cd, II from aqueous solutions by biochar derived from KMnO₄ treated hickory wood. *Bioresource Technology* 197: 356-362.
- 48- Xu Z., Xu X., Tsang D.C.W., Cao X. 2018. Contrasting impacts of pre- and post-application aging of biochar on the immobilization of Cd in contaminated soils. *Environmental Pollution* 242: 1362–1370.
- 49- Yang J.Y., Yang, X.E. He Z.L., Li T.Q., Shentu J.L., and Stoffella P.J. 2006. Effects of pH, organic acids, and inorganic ions on lead desorption from soils. *Environmental Pollution* 143: 9–15.

- 50- Yu X.Y., Ying G.G., and Kookana R.S. 2009. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. *Chemosphere* 76: 665–671.
- 51- Zhang W.X. 2003a. Nano scale iron particles for environmental remediation: An overview. *Journal of Nanoparticle Research* 5: 323–332.
- 52- Zhang R.H., Li Z.G., Liu X.D., Wang B.C., Zhou G.L., Huang X.X., Lin C.F., Wang A.H., and Brooks M. 2017b. Immobilization and bioavailability of heavy metals in greenhouse soils amended with rice strawderived biochar. *Ecological Engineering* 98: 183–188.



Investigating the Effect of Engineered Biochars on Lead Desorption Kinetics in Contaminated Calcareous Soils

Z. Dianat Maharlucci^{1*} - M. Fekri² - M. Mahmoodabadi³ - A. Saljooqi⁴ - M. Hejazi⁵

Received: 26-05-2020

Accepted: 25-08-2020

Introduction: Today, soil pollution is an important environmental issue that should be taken into account. Industrial activities cause pollution and accumulation of heavy metals in the soil. Soil pollution significantly reduces the quality of the environment and threatens human health. Heavy metals are one of the most important pollutants in the environment, which has received a lot of attention in recent decades. Heavy metal pollution is a serious problem in developing countries and urban areas. Among heavy metals, lead is found in large amounts in the Earth's crust, which has several effects on human health and the environment. Lead is a non-essential element for the plants and one of the most important pollutants, which is toxic even at very low concentrations. Its presence in the culture medium has a negative effect on germination rate, water status in the plant, dry root weight and aerial part of the plant, photosynthesis, absorption of nutrients and enzymatic activity. Much research has been done to use alternative and modern methods to clean the environment of heavy elements. One way to stabilize heavy metals in the soil is to use biochar. Due to its cation exchange capacity and high specific surface area, biochar is able to reduce the pollution caused by organic pollutants and heavy metals, stabilize heavy metals and improve the condition of plants and soil in terms of pollution. The aim of this study was to investigate the effect of modified biochars rice husk and almond soft husk on lead desorption kinetics in contaminated calcareous soil.

Materials and Methods: To conduct this research, a sufficient amount of soil from a depth of zero to 30 cm was collected from the farm of Shahid Bahonar Agricultural College in Kerman. Physical and chemical properties of the studied soil were measured after air drying and passing through a 2 mm sieve. To prepare the biochars (rice husk and almond soft husk), the residues, after collection, were air-dried and ground and then packaged in aluminum foil to limit the oxygenation process. They were then placed in an oven at 500 °C for four hours to produce a charcoal called biochar. Also, to prepare the modified biochar (NaOH and HNO₃), one gram of biochar was added to 100 ml of distilled water and then 10 ml of concentrated acid (or 10 g of alkali) was added to it. Stirring at 60 °C for 24 hours. Finally, it was filtered using a centrifuge and washed several times with distilled water to neutralize the pH. The produced powder was dried at 70 °C for 24 hours. The lead desorption kinetics experiment was studied at several times (5, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1440 and 2880 minutes) in two levels of biochar (0 and 4 wt %) and three levels of lead (0, 300 and 600 mg kg⁻¹), which were incubated for 5 months under field moisture in a greenhouse.

Results and Discussion: The kinetics results showed that the desorption of lead has the same pattern in all the time studied. Early rapid desorption occurred in the early desorption times (initial 30 minutes) followed by low-velocity desorption (8 hours) and finally, equilibrium was observed in the treated and control samples. The significant difference between the amount of lead released from the treated soils and control indicated a positive effect of both used engineered biochars on reducing lead desorption. The highest amount of lead desorption was observed in soil without biochar, while the lowest desorption rate occurred in treatments of rice husk and almond soft husk modified by sodium hydroxide. The application of modified biochar rice husk highly reduced lead desorption, compared to modified biochar almond soft husk.

Conclusion: According to the results, the modified biochar with sodium hydroxide caused a significant reduction in lead desorption compared to other treatments, and this reduction was more in biochar rice husk than the almond soft husk one. It can be stated that rice husk biochar has been more successful than almond soft husk biochar due to its more porous structure and cation exchange capacity. Among the equations used for lead

1, 2, 3 and 5- Ph.D. Student, Professor, Professor and Associate Professor in Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.

4- Professor in Department of Chemistry, Faculty of Science, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(*- Corresponding Author Email: zahradianat@agr.uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86783

desorption estimation, the two-constant rate equation was selected as the best model for data fit due to high explanatory coefficient (R^2) and low standard error (SE). According to the above, the use of biochar can be recommended as a modifier in lead contaminated soils.

Keywords: Almond soft husk, Lead, Nitric acid, Rice husk, Sodium hydroxide



مقاله علمی-پژوهشی

بررسی شاخص‌های کیفیت خاک در کشتزارهای گندم آبی در منطقه نظرآباد در غرب استان البرز

رسول میرخانی^۱ - علی‌رضا واعظی^{۲*} - حامد رضایی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۰۵

چکیده

آگاهی از کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشاورزی برای مدیریت بهینه کشتزارها و دستیابی به بیشترین بهره‌وری اقتصادی ضروری است. در این مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) در ۹۵ کشتزار و عملکرد محصول گندم آبی در ۳۲ کشتزار در اراضی زراعی شهرستان نظرآباد استان البرز تعیین شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انتخاب داده‌های مؤثر بر کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفت و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (IQI_w) و ساده (IQI_a) و نیز شاخص کیفیت نمورو (NQI) با استفاده از کل ویژگی‌های خاک و حداقل ویژگی‌های انتخاب شده تعیین شدند. نتایج نشان داد که بین مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک (IQI_w ، IQI_a و NQI) که بر مبنای حداقل ویژگی‌ها و یا کل ویژگی‌های خاک به دست آمده‌اند، همبستگی معنی‌دار ($p < 0/01$) است. همچنین بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های IQI_w ($r=0/61$)، IQI_a ($r=0/58$) و NQI ($r=0/58$) که با استفاده از کل ویژگی‌های خاک تعیین شده بود، همبستگی معنی‌دار ($p < 0/01$) است و این همبستگی در روش استفاده از حداقل ویژگی‌ها به ترتیب $0/68$ ، $0/67$ و $0/62$ است. با توجه به نتایج، شاخص‌های NQI ، IQI_w و IQI_a به دست آمده بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک، حدود ۸۲ درصد کشتزارهای منطقه نظرآباد از کیفیت خاک خیلی خوب و خوب برخوردارند و حدود ۱۱ درصد کیفیت متوسط و حدود ۷ درصد کیفیت پایین و خیلی پایین دارد. با استفاده از نتایج این پژوهش، ضمن آگاهی از وضعیت کیفیت خاک منطقه، برای برنامه‌ریزی مدیریت پایدار اراضی کشاورزی منطقه می‌توان بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، شاخص کیفیت تجمعی، شاخص کیفیت نمورو، عملکرد گندم

مقدمه

برای مثال کارلن و همکاران (۱۳) و دی پاول اوبید و ل (۶) کیفیت خاک را توانایی دائم یک خاک در انجام وظایف خود به‌عنوان یک سیستم حیاتی زنده در داخل اکوسیستم و تحت بهره‌برداری‌های متفاوت تعریف نمودند، به‌گونه‌ای که علاوه بر حفظ حاصلخیزی بیولوژیکی توانایی بهبود کیفیت آب و هوا و همچنین تأمین‌کننده سلامت انسان، حیوان و گیاه را دارا باشد. در کشورهای درحال توسعه به علت آسیب‌پذیری خاک‌های کشاورزی از نظر زیست‌محیطی، توجه به کیفیت خاک دارای اهمیت اقتصادی زیادی است (۳۵). آگاهی از وضعیت کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در کشاورزی و منابع طبیعی برای مدیریت بهینه اراضی و رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی ضروری است.

از شاخص‌های کیفیت خاک برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده می‌شود (۳۶). از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص کیفیت

خاک وظایف یا کارکردهای مختلفی دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی تولید محصول، ذخیره کربن، نگهداری آب، چرخه عناصر غذایی و تصفیه آب اشاره کرد. از این‌رو بسته به هدف استفاده از خاک، می‌توان کیفیت آن را مورد توجه قرار داد. از دیدگاه کشاورزی، کیفیت خاک عبارت از توانایی تولید محصول یا باروری خاک است. در خصوص کیفیت خاک تعاریف زیادی ارائه شده که در بیشتر آن‌ها، تأکید اصلی بر توانایی خاک در انجام وظایف مورد نظر است (۷).

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(*) نویسنده مسئول: (Email: vaezi.alireza@gmail.com)

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

نمورو^۱ (NQI)، شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده^۲ (IQI_a) و وزنی^۳ (IQI_w) اشاره کرد. در این شاخص‌ها ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک معادله ریاضی با هم ترکیب و به صورت کمی ارائه می‌گردد. شاخص‌های کیفیت خاک اغلب منطقه‌ای هستند و نمی‌توان به‌طور ثابت و در همه مناطق از یک مجموعه از شاخص‌ها برای تعیین کیفیت خاک استفاده نمود (۳). شاخص‌های کیفیت خاک را می‌توان با روش‌های کمی یا کیفی تعیین کرد. ارزیابی کیفی، بر پایه تعیین طبیعت ویژگی‌ها است، اما ارزیابی کمی بر پایه اندازه‌گیری دقیق ویژگی‌ها و تلفیق آن‌ها با الگوریتم‌های معین است. زمانی که نیاز است تا داده‌های مربوط به کیفیت خاک به‌صورت نقشه ارائه شود، ارزیابی کمی، روشی مناسب‌تر است (۸). ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک می‌توانند مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی و یا ترکیبی از آن‌ها باشند (۱). با توجه به آن‌که نمی‌توان همه ویژگی‌ها را اندازه‌گیری نمود، اغلب از حساس‌ترین آن‌ها در برابر تغییرات استفاده می‌شود که بر اساس آن حداقل مجموعه داده‌ها^۴ (MDS) بسته به اهداف و شرایط مطالعات پایش انتخاب می‌گردد. شاخص‌های انتخاب شده بایستی با فرایندهای زیست‌بوم دارای همبستگی باشد (۷ و ۱۵). شاخصی که بتواند به بهترین شکل کیفیت خاک را تبیین کند باید دربرگیرنده شیوه‌های تعریف‌شده برای گزینش، نمردهی و وزن‌دهی ویژگی‌های خاک باشد و نیز مدل جامعی که امکان مقایسه خاک‌های مناطق مختلف را به‌صورت علمی فراهم کند، داشته باشد (۲۳). برای ایجاد چنین شاخصی باید: (۱) ویژگی‌هایی که به‌خوبی بیانگر کیفیت خاک باشد، گزینش شوند، (۲) برای ویژگی‌های منتخب خاک وزن داده شود و (۳) اعتبارسنجی شاخص با استفاده از یک مدل انجام گردد.

در خصوص تعیین شاخص کیفیت خاک پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است برای مثال لی و همکاران (۱۶) در شالیزارهای شهرستان یچینگ در استان جیانگشی چین با روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی^۵ (PCA) حداقل مجموعه داده‌ها را تعیین و شاخص کیفیت تجمعی (IQI) را محاسبه کردند. نتایج، همبستگی معنی‌داری را بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج نشان داد ($p < 0.01$). شهاب آرخازلو و همکاران (۲۸) با بررسی کیفیت خاک‌های کشاورزی و مرتعی منطقه ده شورخ واقع در جنوب مشهد در شمال شرق ایران نشان دادند که ۷۸ درصد از خاک‌های مرتعی و ۱۳ درصد خاک‌های کشاورزی دارای توابع توزیع اندازه منافذ مطلوب بودند. رحمانی‌پور و

همکاران (۲۴) با پژوهشی در زمین‌های کشاورزی استان قزوین نشان دادند که مدل شاخص کیفیت تجمعی ($r = 0.34$) بهتر از مدل شاخص کیفیت نمورو ($r = 0.23$) بود و استفاده از حداقل داده‌ها را بدلیل کاهش هزینه برای ارزیابی کیفیت خاک پیشنهاد کردند. در پژوهشی سنچز ناوارو و همکاران (۲۷) در استان مورکیا^۶ در جنوب غرب اسپانیا به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) حداقل داده‌های لازم (MDS) انتخاب و کیفیت خاک با استفاده از شاخص کیفیت نرمال شده (QIN) بررسی شد. نتایج نشان داد که ۱۲، ۳۲، ۱۵، ۱۹ و ۲۲ درصد از منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب دارای کیفیت بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین بود. گانگ و همکاران (۹) با بررسی شاخص کیفیت تجمعی خاک‌های کشاورزی، شور و قلیا، ماسه‌ای، جنگلی و بیابانی در حوزه رودخانه کریا در جنوب چین نشان دادند که خاک‌های بیابانی، ماسه‌ای و شور و قلیا دارای کیفیت پایین (< 0.55) SQI و خاک‌های کشاورزی و جنگلی دارای کیفیت متوسط (< 0.7) SQI (< 0.55) هستند. جیوهوز و همکاران (۱۱) در پژوهشی در شرق مجارستان نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۸۵ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند و رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام با استفاده از مؤلفه اصلی همبستگی معنی‌داری ($p < 0.01$) با میانگین عملکرد نسبی گندم دارد. چنگ و همکاران (۴) در پژوهشی با بررسی ضریب همبستگی بین عملکرد پرتقال و شاخص کیفیت خاک نشان دادند که دقت وزن‌دهی به روش تجزیه رگرسیون چندگانه ($r = 0.44$) نسبت به وزن‌دهی به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ($r = 0.35$) برتر است. رنجبر و همکاران (۲۶) با پژوهشی در برخی از مناطق زعفران کاری منطقه قائن در خراسان جنوبی نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (IQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها ($r = 0.44$) مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در مزارع زعفران است. نبی‌اللهی و همکاران (۲۰) پژوهشی در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری استان کردستان نشان دادند که ارزیابی کیفیت خاک با استفاده از IQI_w ($R^2 = 0.82$) بهتر از IQI_a ($R^2 = 0.78$) و IQI_n ($R^2 = 0.74$) بود و استفاده از مجموع کل داده‌ها نیز بهتر از مجموعه حداقل داده‌ها بود. سینگ و همکاران (۳۰) در پژوهشی با بررسی تغییرات کیفیت خاک های آبرفتی پس از ۴۰ سال استفاده از کود شیمیایی و کشت مداوم محصولات کنف، برنج و گندم نشان دادند که کاربرد کود نیتروژن، فسفر و پتاسیم طی ۲۰ سال موجب تبدیل خاک کلاس III به کلاس II و طی ۴۰ سال موجب تبدیل کلاس II به کلاس I شده است. با توجه به نتایج، همبستگی بالایی بین RSQI و CRI ($r = 0.82$) و همبستگی معنی‌داری بین RSQI و عملکرد محصول کنف ($r = 0.89$)

1- Nemero quality index

2- Additive soil quality index

3- Weighted additive soil quality index

4- Minimum data set

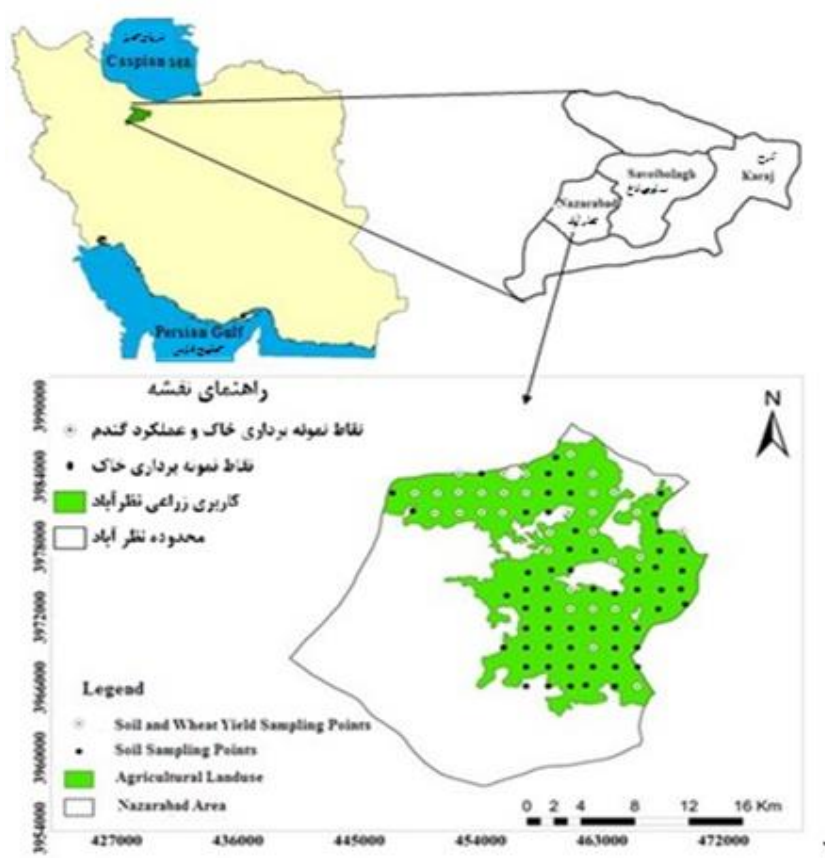
5- Principal component analysis

6- Murcia

کشاورزی مانند گندم و ذرت نیستند. در این پژوهش ضمن آن‌که شاخص‌های کیفیت خاک در ابعاد وسیع در منطقه خشک و نیمه خشک بررسی می‌شود، نقش آن‌ها در عملکرد گندم نیز ارزیابی می‌گردد. با وجود قرار گرفتن استان البرز در منطقه نیمه خشک، این استان رتبه دوم کشوری را در میانگین عملکرد گندم آبی کشور دارد. لذا ارزیابی کیفیت خاک منطقه و بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مؤثر بر کیفیت خاک و عملکرد گندم آبی در این منطقه ضروری است. بنابراین این پژوهش به منظور ارزیابی کیفیت خاک منطقه انجام گرفت و تأثیر ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک و عملکرد گندم آبی در منطقه نظرآباد بررسی شد.

و عملکرد گندم ($r=0/90$) مشاهده شد. ولی عملکرد برنج ۴۴ درصد نسبت به عملکرد اولیه کاهش داشت.

شاخص‌های کیفیت خاک اغلب منطقه‌ای هستند و نمی‌توان به طور ثابت و در همه مناطق از یک مجموعه از شاخص‌ها برای تعیین کیفیت خاک استفاده نمود (۳). ویژگی‌های مورد نیاز برای ارزیابی کیفیت خاک برای مناطق مختلف به دلیل تغییرات اقلیمی و مدیریتی، متفاوت است. اگرچه پژوهش‌های گسترده‌ای در ایران و سایر نقاط جهان در مورد شاخص‌های کیفیت خاک انجام گرفته است لیکن اغلب اطلاعات جنبه منطقه‌ای داشته، قابل استفاده در سایر مناطق اقلیمی مانند مناطق خشک و نیمه خشک و محصولات مختلف



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت محل نقاط نمونه برداری خاک در استان البرز
Figure 1- Map of the study area and location of soil sampling points in Alborz province

درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این منطقه با میانگین بارندگی سالیانه ۲۳۸ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد در اقلیم خشک و نیمه خشک قرار دارد. در این مطالعه کل کشتزارهای نظرآباد مطالعه شد.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

کشتزارهای شهرستان نظرآباد محدوده‌ای از کشتزارهای آبی استان البرز با تناوب گندم و ذرت است که در ناحیه غرب استان با وسعتی حدود ۲۶۰۰۰ هکتار قرار گرفته، ۳۰ درصد از اراضی کشاورزی استان را شامل می‌شود. منطقه نظرآباد در موقعیت جغرافیایی ۳۵

نمونه‌برداری خاک و تجزیه نمونه

کل منطقه مورد مطالعه به ۹۵ شبکه مربعی به ابعاد ۱۶۵۰ متر × ۱۶۵۰ متر تقسیم و نمونه‌های خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) از ۹۵ مزرعه برداشت شد (شکل ۱). نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شد و ویژگی‌های فیزیکی شامل اندازه‌گیری شن، سیلت، رس به روش هیدرومتری، پایداری ساختمان خاک به روش الک تر، چگالی ظاهری به روش سیلندر، چگالی حقیقی به روش پیکنومتر، تخلخل خاک از طریق چگالی ظاهری و حقیقی، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم به وسیله صفحات فشاری، آب قابل استفاده از طریق رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی دائم، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (برای نمونه‌های با بافت متوسط) و بار افتان (برای نمونه‌های با بافت سنگین) (۲) و ویژگی‌های شیمیایی شامل شوری عصاره اشباع به وسیله EC سنج، واکنش گل اشباع به وسیله pH سنج، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (۳۴)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (۲۲)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (۲۱) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، سدیم محلول خاک به وسیله دستگاه فلیم فتومتر و مقدار کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره اشباع خاک توسط روش کمپلکسومتری و از طریق تیتراسیون با EDTA در حضور معرف‌های اریوکروم بلاکتی و موروکساید (۲۲)، اندازه‌گیری و نسبت جذب سدیم (SAR) محاسبه شد (۲۲). از بین مزرعه‌های انتخاب شده، ۳۲ مزرعه تحت کشت گندم بودند و عملکرد دانه گندم در هر مزرعه با استفاده از روش کیل‌گیری با استفاده از شبکه یک متر مربعی اندازه‌گیری شد.

انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک

برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، در نرم افزار ۲۴ SPSS با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مؤلفه‌های اصلی (PC) و ارزش ویژه (EV) تعیین شد. سپس در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بالای یک، در هر مؤلفه، ویژگی با بالاترین ضریب بارگذاری انتخاب و ویژگی‌هایی با اختلاف ده درصد از بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. ضریب بارگذاری، نشان‌دهنده توان مؤلفه‌های تعیین شده در تبیین واریانس متغیرهای مورد مطالعه است. برای تعیین مناسب بودن داده‌ها برای PCA از ضریب KMO استفاده شد. مقدار این ضریب همواره بین صفر و یک متغیر است. در صورتی که مقدار این ضریب کمتر از ۰/۵ باشد، داده‌ها برای تحلیل عاملی مناسب نیستند و اگر بین ۰/۵ تا ۰/۶۹ باشد با احتیاط بیشتر از

داده‌ها می‌توان استفاده کرد. اگر بین ۰/۷ تا ۱ باشد تجزیه به مؤلفه‌های اصلی در کاهش داده‌ها مؤثر است (۱۲). یکی از فرض‌های اساسی در تحلیل عاملی این است که بین متغیرها باید همبستگی وجود داشته باشد. لذا برای اطمینان از وجود همبستگی بین متغیرها از آزمون بارتلت استفاده شد (۱۰). همچنین با توجه به این که ویژگی‌های انتخاب‌شده دارای واحدهای متفاوتی هستند، به منظور این که بتوان آن‌ها را در قالب یک شاخص کلی درآورد، ویژگی‌ها باید بدون واحد شوند. برای این منظور از توابع عضویت فازی استفاده شد (۳۲). با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تبدیل شدند (۳۷).

سه نوع منحنی نمره‌دهی "More is better"، "Less is better" و "Optimum range" برای تبدیل مقادیر به امتیاز استفاده شد. منحنی‌های نمره‌دهی "More is better" و "Less is better" به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) و منحنی "Optimum range" از تلفیق روابط (۱) و (۲) به دست آمد (۱۸).

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x, a, b) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0 & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

که در آنها: $f(x)$ امتیاز ویژگی که بین صفر و یک است، x مقدار ویژگی، a مقدار آستانه پایین ویژگی و b مقدار آستانه بالای ویژگی هستند.

جدول ۱- طبقه بندی شاخص‌های کیفیت خاک (۲۰)

Table 1- Classification of soil quality grades

شاخص Index	روش انتخاب ویژگی Indicator method	کلاس کیفیت خاک (Soil quality grade)				
		(I) خیلی خوب Very high	(II) خوب High	(III) متوسط Moderate	(IV) پایین Low	(V) خیلی پایین Very high
NQI	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> 0.44	0.38- 0.44	0.31- 0.38	0.24- 0.31	< 0.24
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> 0.48	0.41-0.48	0.34- 0.41	0.27- 0.34	< 0.27
IQI _a	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> 0.70	0.60- 0.70	0.50- 0.60	0.40- 0.50	< 0.40
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> 0.71	0.61- 0.71	0.51- 0.61	0.41- 0.51	< 0.41
IQI _w	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> 0.69	0.59- 0.69	0.49- 0.59	0.39- 0.49	< 0.39
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> 0.72	0.62- 0.72	0.52- 0.62	0.42- 0.52	< 0.42

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در نمونه‌های اندازه‌گیری شده (n=۹۵)

Table 2- Soil physical and chemical properties and the yield of wheat in determined samples

ویژگی‌های خاک (soil properties)		کمینه (Min)	بیشینه (Max)	میانگین (Average)	انحراف معیار (Std. deviation)	کشیدگی (Skewness)	چولگی (Kortosis)
شن	Sand (%)	16.50	92.00	45.40	18.70	0.56	-0.50
سیلت	Silt (%)	1.50	48.50	29.50	11.40	-0.84	-0.13
رس	Clay (%)	3.00	45.00	25.10	9.20	0.09	-0.43
چگالی ظاهری	BD(g.cm ⁻³)	1.20	1.72	1.45	0.12	0.08	-0.28
تخلخل	F (%)	35.23	54.40	45.60	4.30	-0.21	-0.18
میانگین وزنی قطر خاکدانه	MWD (cm)	0.00	2.48	0.64	0.45	0.97	2.07
آب قابل دسترس	AW (%)	4.94	19.90	12.28	3.06	-0.11	-0.07
هدایت هیدرولیکی اشباع	Ks (m.day ⁻¹)	0.001	4.89	0.77	0.95	1.91	4.06
اسیدیته	pH	7.22	8.47	7.97	0.23	-1.04	1.86
هدایت الکتریکی	EC (dS.m ⁻¹)	0.56	18.16	2.68	2.83	2.75	9.84
ماده آلی	OM (%)	0.46	4.68	1.61	0.35	1.50	5.69
کرنات کلسیم معادل	CCE (%)	7.70	34.60	16.19	4.35	0.69	3.11
نسبت جذب سدیم	SAR	0.48	217.00	5.52	2.07	9.56	29.50
فسفر قابل استفاده	P _{ava} (mg.kg ⁻¹)	3.00	174.00	27.50	33.24	2.21	4.88
پتاسیم قابل استفاده	K _{ava} (mg.kg ⁻¹)	135.00	1455.00	436.00	238.00	1.76	4.44
آهن	Fe (mg.kg ⁻¹)	1.70	17.36	5.82	2.48	1.24	3.64
مس	Cu (mg.kg ⁻¹)	0.62	3.38	1.74	0.63	0.63	0.35
منگنز	Mn (mg.kg ⁻¹)	2.56	22.22	9.04	3.74	1.29	1.95
بور	B (mg.kg ⁻¹)	0.00	19.89	2.75	2.55	4.82	28.4
روی	Zn (mg.kg ⁻¹)	0.22	4.92	1.21	1.01	1.86	3.36
تنفس میکروبی	SMR (mg CO ₂ . day ⁻¹ .g ⁻¹)	0.31	1.79	0.92	0.27	0.34	0.48
عملکرد دانه	Grain Yield (kg.ha ⁻¹)	2700	10000	5934	1592	0.51	0.34

جدول ۳- همبستگی بین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در نمونه های اندازه گیری شده

Table 3- Correlation between soil physical and chemical properties and the yield of wheat in measured samples

	Sand	Silt	Clay	BD	F	Ks	AW	MWD	pH	EC	OM	TNV	SAR	P _{ava}	K _{ava}	Fe	Mn	Zn	Cu	B	SMR	Yield
Sand	1																					
Silt	-0.93**	1																				
Clay	-0.89**	0.65**	1																			
BD	0.02	-0.03	0.0	1																		
F	-0.06	0.09	0.01	-0.98**	1																	
Ks	0.67**	-0.59**	-0.63**	-0.24**	0.23*	1																
AW	-0.89**	0.85**	0.76**	0.19*	-0.13	-0.62**	1															
MWD	-0.63**	0.52**	0.63**	-0.11	0.12	-0.45**	0.51**	1														
pH	0.11	-0.19*	0.01	0.0	-0.04	0.08	-0.10	-0.01	1													
EC	-0.05	0.07	0.0	0.01	0.02	-0.06	0.04	-0.05	-0.54*	1												
OM	-0.48**	0.36**	0.53**	-0.31**	0.29**	-0.37**	0.43**	0.52**	-0.17*	0.06	1											
TNV	-0.24*	0.04	0.43**	-0.12	0.08	-0.20*	0.22*	0.27**	0.11	-0.12	0.55**	1										
SAR	-0.04	0.03	0.04	0.03	-0.02	-0.07	0.03	-0.07	-0.22*	0.30**	0.07	0.03	1									
P _{ava}	-0.08	0.04	-0.13	-0.16	0.13	-0.07	0.05	0.04	-0.23*	0.25**	-0.54**	0.21*	-0.11	1								
K _{ava}	-0.13	0.08	0.17*	-0.11	0.07	-0.11	0.11	0.04	0.16	0.24*	0.38**	0.09	0.25**	0.72**	1							
Fe	-0.09	0.0	0.19*	-0.08	0.02	-0.14	0.04	0.15	0.02	-0.23*	0.42**	0.17	-0.05	0.34**	0.18**	1						
Mn	-0.22*	0.24**	0.14	0.12	-0.10	-0.16	-0.23*	-0.15	-0.36**	0.29**	-0.22*	-0.14	-0.05	-0.36**	0.26**	0.19*	1					
Zn	-0.14	0.12	0.13	-0.18*	0.18*	-0.03	0.09	-0.04	-0.38**	0.33**	0.48**	0.20*	-0.09	0.82**	0.46**	0.33**	0.43**	1				
Cu	-0.67**	0.63**	0.60**	-0.03	0.04	-0.48**	0.52**	0.40**	-0.27**	0.16	0.34**	0.04	0.09	0.25**	0.26**	0.33**	0.43**	0.32**	1			
B	0.11	-0.10	-0.09	-0.01	0.02	0.09	-0.09	-0.09	0.12	0.09	0.13	0.01	0.03	0.26**	0.35**	0.13	0.08	0.04	-0.06	1		
SMR	-0.42**	0.34**	0.44**	-0.25**	0.25**	-0.19*	0.42**	0.44**	0.10	-0.08	0.55**	0.33**	0.03	0.18*	0.23	0.30**	-0.01	0.05	0.22*	0.36**	1	
Yield	0.05	0.02	-0.11	-0.15	-0.13	0.01	-0.11	0.16	-0.28	0.37*	-0.17	0.30*	0.26	0.35*	-0.10	-0.31*	-0.05	0.33*	-0.22	-0.21	-0.04	1

علامت استفاده شده در معادلات عبارتند از: P_{ava}: فسفر قابل استفاده، K_{ava}: پتاسیم قابل استفاده، pH: واکنش، TNV: کرنیت کلسیم معادل، Fe: آهن، Zn: روی، Cu: مس، Mn: منگنز، B: بور، EC: شوری، SAR: نسبت سدیم تبادل، OM: ماده آلی، Silt: سیلت، Clay: رس، BD: چگالی ظاهری، F: تخلخل، AW: آب قابل دسترس، MWD: پایداری ساختمان خاکدانه، Ks: هدایت هیدرولیکی اشباع، SMR: تنفس میکروبی خاک.

* و ** به ترتیب معنی داری در سطح یک درصد و ۵ درصد است.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشتزارها

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم را در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با توجه به میانگین رس (۲۵ درصد)، سیلت (۳۰ درصد) و شن (۴۵ درصد)، بیشتر نمونه‌ها دارای بافت لوم و لوم رسی هستند. مقدار pH خاک‌های منطقه در محدوده ۷/۴۷-۸/۲۲ و میانگین آن حدود ۸ است. نظر به اینکه pH مطلوب برای رشد گندم ۷ است (۳۱)، لذا pH خاک کشتزارهای منطقه بالاتر از حد مطلوب برای رشد گندم است. منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار آهن، روی، منگنز، بر، مس، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، شوری و سدیمی بودن محدودیتی برای رشد گندم ندارد. به دلیل ماده آلی پایین، منطقه مورد مطالعه از نظر پایداری ساختمان و آب قابل دسترس ضعیف و دارای محدودیت است. با توجه به وجود تغییرات زیاد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه، عملکرد گندم در منطقه به شدت متغیر است و از ۲۷۵۰ تا ۱۰۵۰۰ کیلوگرم با میانگین عملکرد ۵۹۳۰ کیلوگرم در هکتار تغییر می‌کند.

جدول ۳ همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گندم در کشتزارهای گندم آبی را نشان می‌دهد. عملکرد دانه گندم همبستگی معنی‌دار ($p < 0.01$) با فسفر قابل استفاده ($r = 0.35$)، آهن ($r = 0.31$)، روی ($r = 0.33$)، شوری ($r = 0.37$) و کربنات کلسیم معادل ($r = 0.30$) دارد. بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، تنفس میکروبی خاک با ویژگی‌های فیزیکی، کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، آهن و بر همبستگی معنی‌داری ($p < 0.01$) دارد. آب قابل استفاده و هدایت هیدرولیکی اشیاع بیشترین همبستگی ($p < 0.01$) را با اجزای بافت خاک، پایداری ساختمان خاک و کربن آلی دارند.

جدول ۴ نتایج آزمون بارتلت و KMO را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج مقادیر KMO بالاتر از ۰/۷ است و آزمون بارتلت در سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار است و نشان می‌دهد که داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و انتخاب حداقل ویژگی‌ها مناسب هستند.

انتخاب مؤلفه‌های اصلی کیفیت خاک

جدول ۵ مقادیر ارزش ویژه (EV)، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده را در مؤلفه‌های انتخاب شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، شش مؤلفه دارای مقدار ارزش ویژه (EV) بزرگ‌تر از یک هستند. در مؤلفه اول با ارزش ویژه ۶/۰۶، شن با بالاترین ضریب بارگذاری ۰/۹۰-، مؤلفه دوم با ارزش ویژه ۳/۱۷، فسفر قابل استفاده با ضریب بارگذاری ۰/۷۷، مؤلفه سوم با ارزش ویژه ۲/۴۸، چگالی ظاهری با ضریب بارگذاری ۰/۶۶-، مؤلفه چهارم با ارزش ویژه ۱/۷۷، تخلخل با ضریب بارگذاری ۰/۶۳-، مؤلفه

در ادامه سهم اشتراک‌پذیری^۱ هر ویژگی به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به وسیله نرم‌افزارهای SPSS ۲۴ انجام شد سپس نسبت مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، به عنوان وزن هر ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک در نظر گرفته شد. سپس وارد معادلات شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی ساده (IQI_A) و وزنی (IQI_W) و کیفیت نمورو (NQI) شدند و در نهایت یک مقدار به عنوان شاخص کیفیت خاک ارائه شد (۲۳). شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده (IQI_A) و وزنی (IQI_W) به ترتیب به صورت زیر هستند:

$$IQI_W = \sum_{i=1}^n S_i W_i \quad (3)$$

$$IQI_A = \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{n} \quad (4)$$

که در آنها: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر است (۱۸). شاخص کیفیت نمورو (NQI) از رابطه زیر به دست آمد:

$$NQI = \sqrt{\frac{P_{ava}^2 + P_{min}^2}{2}} \times \frac{n-1}{n} \quad (5)$$

که در آن: P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار موجود در بین ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر برای محاسبه هر شاخص است.

جدول ۴- تست بارتلت و KMO

Table 4- Bartlett's test and Kaiser-Meyer-Olkin	
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)	0.72
آماره کای اسکوار	2102.4
آزمون کرویت بارتلت	Approx. Chi-Square
(Bartlett's test)	درجه آزادی (df)
	210
معنی‌داری (Significance)	0.0001

اعتبارسنجی شاخص‌های کیفیت خاک

برای اعتبارسنجی شاخص‌های کیفیت خاک، همبستگی بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI)، تجمعی ساده (IQI_A) و وزنی (IQI_W) در کل ویژگی‌های خاک و نیز در حداقل ویژگی‌های انتخاب شده خاک تعیین شد و بهترین شاخص کیفیت خاک برای منطقه نظرآباد معرفی شد.

”Less is better“ و برای ویژگی‌های مانند واکنش، شن، سیلت و رس از منحنی ”Optimum range“ استفاده شد (۵).

وزندهی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

جدول ۷ مقادیر اشتراک‌پذیری و وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در دو روش (استفاده از کل ویژگی‌ها و استفاده از حداقل ویژگی‌های انتخاب شده) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در هر دو سری (کل و حداقل ویژگی‌ها)، ویژگی‌های فیزیکی وزن بالاتری نسبت به ویژگی‌های شیمیایی خاک دارند. بنابراین منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی دارای محدودیت کمتری نسبت به ویژگی‌های شیمیایی خاک است. لذا با مدیریت کوددهی مناسب و بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک می‌توان کیفیت خاک منطقه را بهبود بخشید. کاربرد کود دامی علاوه بر بهبود شرایط شیمیایی خاک موجب بهبود شرایط فیزیکی خاک مثل افزایش آب قابل دسترس، بهبود ساختمان خاک شده و موجب بهبود کیفیت خاک و افزایش عملکرد گندم آبی خواهد شد. همچنین با توجه به اسیدیته خاک منطقه، با مدیریت کوددهی مناسب و استفاده از اصلاح‌کننده‌هایی مثل گوگرد می‌توان اسیدیته خاک را کاهش داد و شرایط جذب عناصر غذایی را بهبود و موجب افزایش عملکرد گندم شد. رضانی و همکاران (۲۶) با بررسی کیفیت خاک در منطقه خوزستان اشاره کردند که pH بالا (۷/۲۷-۸/۱۹) با کاهش قابلیت جذب فسفر و عناصر کم مصرف بیشترین محدودیت را برای رشد گیاهان و کاهش کیفیت خاک داشتند. خادم و همکاران (۱۴) طی پژوهشی نشان دادند که با افزایش گوگرد به خاک اسیدیته خاک کاهش یافته و میزان عناصر کم مصرف آهن و منگنز قابل جذب خاک افزایش یافته است.

پنجم با ارزش ویژه ۱/۳۱، نسبت جذب سدیم (SAR) با ضریب بارگذاری ۰/۶۳، مؤلفه ششم با ارزش ویژه ۱/۱۶، بر (B) با ضریب بارگذاری ۰/۶۰، با بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند و رس و آب قابل استفاده در مؤلفه اول، روی در مؤلفه دوم و کربنات کلسیم معادل در مؤلفه ششم با ضریب بارگذاری بالا تا ۱۰ درصد کمتر از بالاترین ضریب بارگذاری مؤلفه‌های مربوط نیز انتخاب شدند سپس در هر مؤلفه همبستگی بین ویژگی‌های انتخاب شده بررسی شد.

در مؤلفه اول بین شن، رس و آب قابل استفاده، در مؤلفه دوم بین فسفر قابل استفاده و روی و در مؤلفه سوم بین چگالی ظاهری و تخلخل همبستگی بالایی وجود داشت. بر این اساس در مؤلفه اول شن، در مؤلفه دوم فسفر قابل استفاده، در مؤلفه سوم چگالی ظاهری، در مؤلفه پنجم نسبت جذب سدیم و در مؤلفه ششم کربنات کلسیم معادل و بر به عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک (MDS) انتخاب شدند. جیوهوز و همکاران (۱۱) نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۷۶ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند.

جدول ۶ منحنی نمره‌دهی، حد بهینه، حد کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد محصول گندم آبی را نشان می‌دهد. با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر تا یک تبدیل شدند. برای این منظور برای ویژگی‌های تخلخل، پایداری خاکدانه‌ها، آب قابل دسترس، هدایت هیدرولیکی اشباع، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، آهن، منگنز، مس، روی و تنفس میکروبی از منحنی ”Less is better“، برای ویژگی‌های نسبت جذب سدیم، چگالی ظاهری، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل از منحنی

جدول ۵- مقادیر ارزش ویژه، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده در مؤلفه‌ها

Table 5- Eigenvalues, cumulative percent of variance and loading coefficient of selected properties in the components

	مؤلفه‌ها Components					
	1	2	3	4	5	6
ارزش ویژه (Eigen value)	6.06	3.17	2.48	1.77	1.31	1.16
درصد تجمعی واریانس (Cumulative percent)	28.84	43.93	55.74	64.19	74.44	75.97
P _{ava}	-	0.77	-	-	-	-
Zn	-	0.71	-	-	-	-
AW	0.81	-	-	-	-	-
TNV	-	-	-	-	-	-0.59
B	-	-	-	-	-	0.60
SAR	-	-	-	-	0.63	-
BD	-	-	-0.66	0.57	-	-
F	-	-	0.63	-0.63	-	-
Clay	0.85	-	-	-	-	-
Sand	-0.90	-	-	-	-	-

جدول ۶- تابع نمره‌دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد گندم

Table 6- Scoring functions and upper, optimum and lower threshold values of measured properties for wheat growth

ویژگی‌های خاک soil properties	تابع نمره‌دهی scoring Function	حد کمینه محدود کننده		حد بهینه محدود کننده	
		Lower threshold values	Optimum threshold values	Upper threshold values	حد بیشینه محدود کننده
شن	Sand (%)	Optimum range	10	40	85
سیلت	Silt (%)	Optimum range	20	40	60
رس	Clay (%)	Optimum range	10	20	60
چگالی ظاهری	BD (g.cm ⁻³)	Less is better کمتر بهتر است			1.8
					1.75
					1.7
					1.65
					1.5
					1.4
					32
تخلخل	F (%)	More is better بیشتر بهتر است			34
					36
					38
					43
					47
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	MWD (cm)	More is better	0		3.38
آب قابل دسترس	AW (%)	More is better	15		25
هدایت هیدرولیکی اشباع	Ks (m.day ⁻¹)	More is better	0.002		2
اسیدیته	pH	Optimum range	5	7	8.4
هدایت الکتریکی	EC (dS.m ⁻¹)	Less is better	6		20
ماده آلی	OM (%)	More is better	0		2
کربنات کلسیم معادل	CCE (%)	Less is better	15		50
نسبت جذب سدیم	SAR	Less is better	13		20
فسفر قابل استفاده	P _{ava} (mg.kg ⁻¹)	More is better	5		15
پتاسیم قابل استفاده	K _{ava} (mg.kg ⁻¹)	More is better	100		200
آهن	Fe (mg.kg ⁻¹)	More is better	2.5		7.5
مس	Cu (mg.kg ⁻¹)	More is better	0		0.5
منگنز	Mn (mg.kg ⁻¹)	More is better	3		10
بور	B (mg.kg ⁻¹)	More is better	1		3
روی	Zn (mg.kg ⁻¹)	More is better	0.25		1
تنفس میکروبی	SMR (mg CO ₂ .day ⁻¹ .g ⁻¹)	More is better	0		1.78

وضعیت کیفیت خاک منطقه

جدول ۸ وضعیت کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه نظرآباد را با استفاده از شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (IQI_a) و وزنی (IQI_w) در کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های انتخاب شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، منطقه نظرآباد دارای محدوده وسیعی از نظر مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک است ولی با توجه به میانگین و میانه شاخص‌های کیفیت (جدول ۸) بیش از ۵۰ درصد نقاط مورد مطالعه در کلاس خوب و خیلی خوب قرار دارد. جدول ۹ همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد

گندم آبی در کشتزارهای نظرآباد را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، بین مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک (IQI_a و IQI_w، NQI) که بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک و کل ویژگی‌های خاک به دست آمده‌اند، همبستگی معنی‌دار ($p < 0.01$) وجود دارد. به طوری که بین دو حالت (کل ویژگی‌های خاک و حداقل ویژگی‌های خاک) همبستگی معنی‌دار در شاخص‌های NQI ($r = 0.68$)، IQI_w ($r = 0.76$) و IQI_a ($r = 0.73$) مشاهده شد. شهاب آرخازلو و همکاران (۲۹) در پژوهشی نشان دادند که در زمین‌های کشاورزی بین استفاده از حداقل داده‌ها و کل داده‌ها در شاخص کیفیت نمورو ($r = 0.87$) و

تجمعی وزنی ($r=0/90$) همبستگی معنی‌داری ($p<0/01$) است. همچنین در هر دو روش انتخاب ویژگی‌های خاک (حداقل داده‌ها و کل داده‌ها)، بین IQI_w ، NQI و IQI_a همبستگی معنی‌داری ($p<0/01$) وجود دارد. رحمانی‌پور و همکاران (۲۴) در پژوهشی در زمین‌های کشاورزی استان قزوین نشان دادند که مدل IQI ($0/34$) $r=$ بهتر از مدل NQI ($r=0/23$) است. نبی‌اللهی و همکاران (۲۰) نیز در پژوهشی در اراضی کشاورزی تحت تأثیر شوری در استان کردستان ایران نشان دادند که IQI_w ($R^2 = 0/82$) بهتر از IQI_a ($R^2 = 0/78$) و NQI ($R^2 = 0/74$) است. بین عملکرد گندم آبی و

ویژگی‌ها همبستگی معنی‌دار ($p<0/01$) است و این همبستگی در روش استفاده از کل ویژگی‌ها به ترتیب $0/61$ ، $0/58$ و $0/58$ است. لی و همکاران (۱۶) در پژوهشی در استان جیانگشی چین نشان دادند که بین شاخص کیفیت خاک و عملکرد برنج همبستگی معنی‌دار ($p<0/01$) است. سینگ و همکاران (۳۰) در پژوهشی نشان دادند که بین کیفیت خاک نسبی ($RSQI$) و عملکرد محصول کنف ($r=0/89$) و عملکرد گندم ($r=0/90$) همبستگی معنی‌داری مشاهده شد.

جدول ۷- مقادیر وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در روش استفاده از کل ویژگی‌ها (TDS) و حداقل ویژگی‌های (MDS)

Table 7- weight values of soil properties in the TDS and MDS methods

ویژگی‌های خاک (Soil properties)		کل داده‌ها (TDS)		حداقل داده‌ها (MDS)	
		اشتراک‌پذیری (Communality)	وزن (Weight)	اشتراک‌پذیری (Communality)	وزن (Weight)
شن	Sand (%)	0.95	0.06	0.63	0.17
سیلت	Silt (%)	0.87	0.05		
رس	Clay (%)	0.83	0.05		
چگالی ظاهری	BD ($g.cm^{-3}$)	0.96	0.06	0.55	0.15
تخلخل	F(%)	0.97	0.06		
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	MWD (cm)	0.57	0.04		
آب قابل دسترس	AW (%)	0.84	0.05		
هدایت هیدرولیکی اشباع	Ks ($m.day^{-1}$)	0.65	0.04		
اسیدیته	pH	0.63	0.04		
هدایت الکتریکی	EC ($dS.m^{-1}$)	0.69	0.04		
ماده آلی	OM (%)	0.81	0.05		
کربنات کلسیم معادل	CCE (%)	0.77	0.05	0.57	0.15
نسبت جذب سدیم	SAR	0.57	0.04	0.68	0.18
فسفر قابل استفاده	P _{ava} ($mg.kg^{-1}$)	0.85	0.05	0.64	0.17
پتاسیم قابل استفاده	K _{ava} ($mg.kg^{-1}$)	0.67	0.04		
آهن	Fe ($mg.kg^{-1}$)	0.67	0.04		
مس	Cu ($mg.kg^{-1}$)	0.67	0.04		
منگنز	Mn ($mg.kg^{-1}$)	0.68	0.04		
بور	B ($mg.kg^{-1}$)	0.82	0.05	0.64	0.17
روی	Zn ($mg.kg^{-1}$)	0.82	0.05		
تنفس میکروبی	SMR ($mg CO_2, day^{-1}.g^{-1}$)	0.72	0.04		

جدول ۸- وضعیت کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه

Table 8- Soil quality status in agricultural areas of the study area

شاخص Index	روش انتخاب ویژگی Indicator method	کمینه Min	بیشینه Max	میانگین Mean	میانه Median
NQI	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	0.23	0.81	0.44	0.43
	کل ویژگی‌ها (TDS)	0.29	0.53	0.42	0.43
IQI _a	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	0.39	0.98	0.71	0.72
	کل ویژگی‌ها (TDS)	0.43	0.79	0.62	0.63
IQI _w	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	0.39	0.98	0.71	0.72
	کل ویژگی‌ها (TDS)	0.40	0.81	0.62	0.64

جدول ۹- همبستگی بین شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد گندم در کشتزارهای آبی منطقه مورد مطالعه

Table 9- Correlation between soil quality indices and the yield of wheat in the irrigated farms of the study area

شاخص * Index	انتخاب ویژگی Indicator method	حداقل ویژگی‌ها (MDS)			کل ویژگی‌ها (TDS)			عملکرد گندم Wheat Yield
		IQI _w	IQI _a	NQI	IQI _w	IQI _a	NQI	
IQI _w	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	1						
IQI _a		1.00**	1					
NQI		0.94**	0.94**	1				
IQI _w	کل ویژگی‌ها (TDS)	0.76**	0.76**	0.79**	1			
IQI _a		0.72**	0.73**	0.68**	0.99**	1		
NQI		0.72**	0.73**	0.68**	0.99**	1.00**	1	
عملکرد گندم (Wheat Yield)		0.68**	0.67**	0.62**	0.61**	0.58**	0.58**	1

*: IQI_w: شاخص کیفیت تجمعی وزنی (Weighted additive soil quality index)، IQI_a: شاخص کیفیت تجمعی ساده (Additive soil quality index) و (index) و NQI: شاخص کیفیت نمورو (Nemero quality index)

جدول ۱۰- مساحت زمین‌های کشاورزی در کلاس‌های کیفیت خاک (درصد)

Table 10- Land area in soil quality classes (%)

شاخص Index	روش انتخاب ویژگی Indicator method	کلاس کیفیت خاک Soil quality grade				
		خیلی خوب (I) Very high	خوب (II) High	متوسط (III) Moderate	پایین (IV) Low	خیلی پایین (V) Very high
NQI	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	42.11	29.47	20.00	7.37	1.05
	Minimum data set					
	کل ویژگی‌ها (TDS)	15.79	42.11	29.47	12.63	0
IQI _a	Total data set					
	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	56.84	24.21	13.68	4.21	1.05
	Minimum data set					
IQI _w	کل ویژگی‌ها (TDS)	17.89	45.26	27.37	9.47	0
	Total data set					
	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	56.84	25.26	11.58	6.32	0
	Minimum data set					
	کل ویژگی‌ها (TDS)	15.79	38.95	28.42	15.79	1.05
	Total data set					

مناطق زعفران کاری ایران (منطقه قائن در خراسان جنوبی)، نشان دادند که شاخص کیفیت تجمعی (IQI) با استفاده از مجموعه کل داده‌ها ($r=0.44$) مؤثرترین روش برای ارزیابی کیفیت خاک در مزارع زعفران است. همچنین در روش IQI_a سطح کشتزارهای با کیفیت خیلی خوب بالاترین و در روش NQI، پایین‌ترین است ولی در کلاس خوب بالاترین و پایین‌ترین سطح به ترتیب مربوط به NQI و IQI_w است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که در کشتزارهای منطقه نظرآباد عملکرد گندم آبی تحت تأثیر بافت، فسفر قابل استفاده، آهن، بر، چگالی ظاهری،

جدول ۱۰ مساحت زمین‌های کشاورزی منطقه نظرآباد را در کلاس‌های کیفیت خاک نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در شاخص های IQI_w، IQI_a و NQI در روش استفاده از حداقل ویژگی‌ها نسبت به روش استفاده از کل ویژگی‌ها، درصد کشتزارهایی با کیفیت خیلی خوب (کلاس I) بیشتر ولی سایر کلاس‌ها کمتر شده است. یعنی در روش استفاده از حداقل داده‌ها سطح کلاس کیفیت خاک بیشتر شده است در صورتیکه نبی‌اللهی و همکاران (۲۰) در اراضی شور استان کردستان ایران نشان داد که در روش استفاده از حداقل داده‌ها نسبت به کل داده‌ها مساحت و نمرات کلاس خیلی خوب و خوب کاهش و مساحت و نمرات زمین‌های با کیفیت پایین و خیلی پایین افزایش داشت. رنجبر و همکاران (۲۶) با بررسی کیفیت خاک در برخی از

خوب و خوب و به ترتیب حدود ۶ و ۸ درصد منطقه از کلاس پایین و خیلی پایین برخوردار است و منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی مانند بافت خاک، چگالی ظاهری دچار محدودیت کمتری است. لذا با توجه به کیفیت مناسب خاک منطقه نظرآباد، می‌توان با مدیریت مناسب، عملکرد گندم را بالا برد. با توجه به محدودیت ماده آلی منطقه می‌توان با کاربرد کود دامی شرایط فیزیکی خاک را بهبود بخشید و موجب افزایش کیفیت خاک و عملکرد محصول گردید. همچنین با توجه به اسیدیته خاک منطقه، با استفاده از اصلاح کننده‌هایی مثل گوگرد می‌توان اسیدیته خاک را کاهش داد و شرایط جذب عناصر غذایی را بهبود و موجب افزایش عملکرد گندم شد.

نسبت جذب سدیم و کربنات کلسیم معادل خاک قرار دارد. بین روش‌های شاخص کیفیت تجمعی وزنی (IQI_w) و ساده (IQI_a) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. همچنین بین شاخص‌های کیفیت تجمعی وزنی و ساده و شاخص کیفیت نمورو بر مبنای استفاده از حداقل ویژگی‌ها و کل ویژگی‌ها همبستگی معنی‌دار است. همبستگی بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های کیفیت خاک بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک قوی‌تر از استفاده از کل ویژگی‌های خاک است لذا استفاده از حداقل ویژگی‌ها به دلیل نتایج بهتر و صرف زمان و هزینه کمتر مناسب‌تر از روش استفاده از کل ویژگی‌ها است. با توجه به نتایج، در روش‌های کیفیت تجمعی و نمورو به ترتیب حدود ۸۲ و ۷۲ درصد از کشتزارهای منطقه از کلاس خیلی

منابع

- 1- Aparicio V., and Costa J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research* 96(1): 155-165.
- 2- Aria P., and Mirkhani R. 2005. Methods of Soil Physical Analysis, Technical Bulletin, Soil and Water Research Institute, Iran, No:479. (In Persian)
- 3- Brejda J.J., Moorman T.B., Smith J.L., Karlen D.L., Allan D.L., and Dao T.H. 2000. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. *Soil Science Society of America Journal* 64(3): 974-982.
- 4- Cheng J., Ding C., Li X., Zhang T., and Wang X. 2016. Soil quality evaluation for navel orange production systems in central subtropical China. *Soil and Tillage Research* 155: 225-232.
- 5- Cherubin M.R., Karlen D.L., Cerri C.E., Franco A.L., Tormena C.A., Davies C.A., and Cerri C.C. 2016. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PloS one* 11(3): e0150860.
- 6- de Paul Obade V., and Lal R. 2016. Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma* 265: 96-102.
- 7- Doran J.W., and Parkin T.B. 1996. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. Methods for assessing soil quality/editors, John W. Doran and Alice J. Jones; editor-in-chief SSSA, Jerry M. Bigham; managing editor, David M. Kral; associate editor, Marian K. Viney.
- 8- Friedman D., Hubbs M., Tugel A., Seybold C., and Sucik M. 2001. Guidelines for soil quality assessment in conservation planning. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation.
- 9- Gong L., Ran Q., He G., and Tiyp T. 2015. A soil quality assessment under different land use types in Keriya river basin, Southern Xinjiang, China. *Soil and Tillage Research* 146: 223-229.
- 10- Jolliffe I.T. 1986. Principle component analysis. Springer-Verlag.
- 11- Juhos K., Szabó S., and Ladányi M. 2015. Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach, *International Agrophysics* 29: 433-440.
- 12- Kaiser H.F. 1970. A Second-Generation Little Jiffy. *Psychometrika* 35(4): 401-415.
- 13- Karlen D.L., Rosek M.J., Gardner J.C., Allan D.L., Alms M.J., Bezdicsek D.F., Flock M., Huggins D.R., Miller B.S., and Staben M.L. 1999. Conservation reserve program effects on soil quality indicators. *Journal of Soil and Water Conservation* 54(1): 439-444.
- 14- Khadem A., Golchin A., Mashhadi Jafarloo A., Zaree E., and Naseri E. 2014. Effect of Highly Acidified Soil on Soil Nutrient Availability and Corn (*Zea mays* L.) Growth. *Agronomy Journal (Pajouhesh & Sazandegi)* 107: 1-7.
- 15- Larson W.E., and Pierce F.J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for sustainable land management in the developing world: proceedings of the International Workshop on Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, Chiang Rai, Thailand 15-21.
- 16- Li P., Zhang T., Wang X., and Yu D. 2013. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China. *Soil and Tillage Research* 126: 112-118.
- 17- Masto R.E., Chhonkar P.K., Singh D., and Patra A.K. 2008. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment* 136(1-3): 419-435.
- 18- MATLAB R2015b. 2015. Software for technical computing and model-based design. The Math Works Ins, USA.
- 19- Moshiri F., Shahabi A.A., Keshavarz P., Khogar Z., Feyzi Asl V., Tehrani M.M., Asadi Rahmani H., Samavat S., Gheibi M.N., Sedri M.H., Rashidi N., Saadat S., and Khademi Z. 2014. Guidelines for integrated soil fertility and

- plant nutrition management of wheat. Soil and Water Research Institute, Iran. (In Persian)
- 20- Nabiollahi K., Taghizadeh-Mehrjardi R., Kerry R., and Moradian S. 2017. Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. *Ecological Indicators* 83: 482-494.
- 21- Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939 pp.
- 22- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- 23- Qi Y., Darilek J.L., Huang B., Zhao Y., Sun W., and Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149(3): 325-334.
- 24- Rahmanipour F., Marzaioli R., Bahrami H.A., Fereidouni Z., and Bandarabadi S.R. 2014. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators* 40: 19-26.
- 25- Ramezani F., Jafari S., Salavati A., and Khalili Moghaddam B. 2011. Study the Soil Quality Changes Indicators Using Nemoro and Integrated Quality Index Models in Some Khuzestan's Soils. *Journal of Water and Soil* 29(6): 1629-1639. (In Persian with English abstract)
- 26- Ranjbar A., Emami H., Khorasani R., and Karimi Karoyeh A.R. 2016. Soil Quality Assessments in Some Iranian Saffron Fields. *Journal of Agricultural Science and Technology* 18(3): 865-878.
- 27- Sánchez-Navarro A., Gil-Vázquez J. M., Delgado-Iniesta M.J., Marín-Sanleandro P., Blanco-Bernardeau A., and Ortiz-Silla R. 2015. Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena* 131: 35-45.
- 28- Shahab Arkhazloo H., Emami H., Haghnia G.H., and Karimi A. 2013. Pore size distribution as a soil physical quality index for agricultural and pasture soils in northeastern Iran. *Pedosphere* 23(3): 312-320.
- 29- Shahab Arkhazloo H., Emami H., Haghnia Gh., and Karimi A. 2011. Determining most Important Properties for Soil Quality Indices of Agriculture and Range Lands in a some Parts of Southern Mashhad. *Journal of Water and Soil* 25(5), 1197-1205. (In Persian with English abstract)
- 30- Singh A.K., Mazumdar S.P., Saha A.R., and Kundu D.K. 2017. Soil Quality Changes Resulting from long-term fertilizer application under intensive cropping system in alluvial soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 48(13): 1503-1510.
- 31- SYS C., Van Ranst E., and Debaveye J. 1993. land evaluation. part III: crop requirements. General Administration for Development cooperation, Agricultural publication, No: 7, Brussels Belgium, 199 pp.
- 32- Torbert H.A., Krueger E., and Kurtener D. 2008. Soil quality assessment using fuzzy modeling. *International Agrophysics* 22(4): 365-370.
- 33- USDA. 2008. Soil Quality Indicator Sheets. USDA Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov>.
- 34- Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37.
- 35- Wander M.M., Walter G.L., Nissen T.M., Bollero G.A., Andrews S.S., and Cavanaugh-Grant D.A. 2002. Soil quality. *Agronomy Journal* 94(1): 23-32.
- 36- Wang X.J., and Gong Z.T. 1998. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma* 81: 339-355
- 37- Yanbing Q., Darilek J.L., Biao H., Yongcun Z., Sun W., and Gu Z. 2009. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma* 149: 325-334.



Investigation of the Soil Quality Indices in Irrigated Wheat Farms of Nazarabad Region in West of Alborz Province

R. Mirkhani¹- A.R. Vaezi^{2*}- H. Rezaei³

Received: 17-02-2020

Accepted: 26-07-2020

Introduction: Awareness of the physical, chemical and biological quality of soil in agriculture and natural resources is essential for optimal land management and achieving maximum economic productivity. Soil has various functions, including crop production ability, carbon storage, water retention, nutrient cycling, water filtering and etc. Thereby, the quality of soils can be taken into consideration depended on the purpose of their use. The soil quality indices are often regional; therefore, a set of indices cannot be used consistently to determine soil quality in all areas. In this study, the Nemero Soil Quality Index (NQI), the Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w), and the Additive Soil Quality Index (SQI_a) were determined using the total data set (TDS) and minimum data set (MDS) and the impact of properties affecting the soil quality and the yield of irrigated wheat were investigated, in Nazarabad region.

Materials and Methods: This study was carried out in 26000 hectares of Nazarabad agricultural lands, known as an area with irrigated farms in western Alborz province. The Nazarabad area was sub-divided into a network consisting of 95 squares of 1650 m × 1650 m. The surface soil (0-30 cm) was sampled from the farms located in the middle of each square (9+5 soil samples from 95 farms) and the irrigated wheat was sampled from 32 farms. Then, soil physical properties including sand, silt, and clay percentages, soil structural stability (MWD), bulk density (BD), particle density, soil porosity (F), field capacity (FC) and permanent wilting point (PWP), available water (AW), saturated hydraulic conductivity (Ks) and soil chemical properties including salinity (EC), pH, organic matter (OM), equivalent calcium carbonate (TNV), available phosphorus (P_{ava}), available potassium (K_{ava}), sodium absorption ratio (SAR) and soil microbial respiration (SMR) were measured. Effective properties on soil quality were selected using SPSS 24 by principal component analysis method (PCA). For this purpose, components with Eigen values greater than one were selected and in each component, properties with high loading coefficient up to 10% lower than the highest loading coefficient were selected MDS affecting soil quality. Then, the Nemero Soil Quality Index (NQI), the Weighted Additive Soil Quality Index (SQI_w) and Additive Soil Quality Index (SQI_a) were determined using TDS and MDS. For validating soil quality indices, the correlation between the yield of irrigated wheat and NQI, IQI_a and IQI_w indices were determined in MDS and TDS.

Results and Discussion: The results showed that the correlation between the soil quality indices (NQI, SQI_w and SQI_a) using TDS and MDS were significant ($p < 0.01$). In addition, a significant correlation was observed between methods of MDS and TDS in IQI_w ($r=0.76$), IQI_a ($r=0.73$) and NQI ($r=0.68$) indices. According to the results, there was a significant correlation ($p < 0.01$) between the yield of irrigated wheat and IQI_w ($r=0.68$), IQI_a ($r=0.67$) and NQI ($r=0.62$) using MDS method; and using TDS method this correlation values were 0.61, 0.58 and 0.58, respectively. The results indicated that using NQI, SQI_w and SQI_a indices based on MDS, 42, 57 and 57% of the study area were in very high quality category and 29, 25 and 24% were in high quality category, respectively. However, using NQI, SQI_w and SQI_a indices based on TDS, 16, 16 and 18% of the study area were in very high quality class and 42, 39 and 45% were in high quality class, respectively.

Conclusion: The results showed that in Nazarabad region, the yield of irrigated wheat was affected by texture, P_{ava}, B, SAR, Bd and TNV. There was no significant difference between IQI_w and IQI_a and NQI indices.

1 and 2- Ph.D. Student and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: vaezi.alireza@gmail.com)

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

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.85526

In addition, the correlation between soil quality indices based on MDS and total data set was significant, and the correlation between the yield of irrigated wheat and the soil quality indices was stronger while using MDS rather than the use of TDS. Therefore, it seems that the use of MDS is more appropriate due to better results and fewer properties and less cost. According to the results obtained from Nazarabad region using NQI and SQI_w indices, nearly 82% and 72% of the area are in the very high and high quality class, about 6% and 8% are in the moderate quality class and about 7% are in very low and low quality class, respectively. The studied area is less restricted in terms of physical properties such as soil texture and bulk density. Consequently, due to the high quality of soils in Nazarabad region, it is possible to improve the yield of wheat by proper management

Keywords: Additive soil quality index, Nemero Quality Index, Principal component analysis, The yield of wheat

مقاله علمی-پژوهشی

الگوهای کاربردی جدید برآورد میانگین دمای روزانه در نواحی مختلف اقلیمی ایران

بهاره میرکماندار^{۱*} - سید حسین ثنائی نژاد^۲ - حجت رضائی پزند^۳ - محبوبه فرزندی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۲۴

چکیده

تأثیر اقلیم بر الگوهای رفتاری تغییرات دما در روش‌های موجود مورد توجه قرار نگرفته است. با رسم دقیق منحنی تغییرات روزانه دما در یک روز عادی نشان می‌دهد که توزیع این متغیر نرمال نیست و یک منحنی چوله به راست است. بنابراین استفاده از ضرایب مساوی برای برآورد میانگین دمای روزانه خطا دارد. این مقاله الگوهای جدیدی را برای برآورد میانگین دمای روزانه در سه ناحیه مختلف اقلیمی ایران و ایستگاه‌های نمونه مربوطه ارائه داده است. به این منظور خوشه‌بندی اقلیمی که مطابق آن کشور ایران به سه خوشه ساحلی، کوهستانی و بیابانی و نیمه بیابانی تقسیم شده، انتخاب و نمونه‌گیری سیستماتیک برای تعیین ایستگاه‌های منتخب صورت گرفت. سپس الگوهای رگرسیونی خطی پس از غربال و آماده‌سازی بر داده‌ها برازش داده شد. نتایج ارائه شده وجود عرض از مبدأ را در تمام الگوها تأیید می‌کند. که دامنه آن برای سه خوشه و ایستگاه‌های نمونه از ۱/۷۳۵- تا ۰/۲۶ می‌باشد. ضریب استاندارد شده (Beta) متغیرهای پیشگو، بیانگر نابرابری وزن این متغیرها در تمامی الگوها است. این ضریب در الگوی برآورد میانگین دمای روزانه خوشه ساحلی برای متغیرهای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب ۴۸/۲٪ و ۵۱/۸٪ می‌باشد. این مقادیر نشان می‌دهد دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر است. بیشترین تأثیر دمای بیشینه به مقدار ۶۳/۱٪ در خوشه کوهستانی برای برآورد میانگین دمای روزانه دیده می‌شود. واسنجی و قیاس الگوهای ارائه شده در این مقاله با الگوی مرسوم برآورد میانگین دمای روزانه نشان از توانایی بالای الگوهای پیشنهادی در برآورد این میانگین دارد. میانگین مربع خطا (MSE) معیار واسنجی و مقایسه الگوهاست. بیشترین اختلاف برآورد میانگین دمای روزانه میان الگوی مرسوم با الگوی ارائه شده برای خوشه کوهستانی بوده که ۲۴٪ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوی رگرسیونی، دمای بیشینه، دمای کمینه، میانگین دمای روزانه، نمونه‌گیری سیستماتیک

مقدمه

محاسبه می‌شود. چون دمانگار در همه ایستگاه‌ها وجود ندارد، بنابراین میانگین دمای روزانه (رابطه ۱) به عنوان یک دستورالعمل استاندارد جهانی از میانگین ساده دماهای کمینه و بیشینه مشاهداتی در طول شبانه‌روز برآورد می‌شود. روابط مرسوم برای برآورد میانگین دمای روزانه با فرض متقارن بودن منحنی این متغیر ارائه شده و به صورت معادلات خطی با عرض از مبدأ صفر است. چون منحنی نامتقارن است، بنابراین این برآورد خطا آمیز است. همچنین مسأله اقلیم ضعف دیگر رابطه (۱) است. زیرا اقلیم در شکل منحنی دمای روزانه موثر است. یعنی به صورت یک عامل مقیاس اثر می‌کند (۱۶).

$$\bar{T} = 0.5T_{\max} + 0.5T_{\min} \quad (1)$$

بنابراین نیاز به انتخاب خوشه‌بندی اقلیمی هست تا روابط متناسب با اقلیم مربوطه ارائه شوند. بنابراین ارائه روابطی که بتوانند میانگین دمای روزانه را با دقت بیشتری محاسبه کنند ضروری است. پژوهشگران روش‌های مختلفی را به صورت مستقیم و

دما یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی محسوب می‌شود و یکی از مهم‌ترین عناصر اقلیمی است. این متغیر شاخص مهمی در طبقه‌بندی اقلیمی بوده و اثرات انکارناپذیری در فعالیت‌های انسانی، طبیعی و به ویژه در زمینه کشاورزی دارد.

منحنی دما در یک روز عادی شکلی شبیه یک منحنی تک نمایی چوله به راست دارد. این منحنی توسط دستگاه دمانگار رسم می‌شود. میانگین دمای واقعی روزانه با انترگرال‌گیری از روی منحنی مربوطه

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(*)- نویسنده مسئول: Email: bahar.mirkamandari@gmail.com

۲ و ۴- به ترتیب دانشیار و دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- عضو هیات علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

$$T = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \cos \left[\frac{\pi(t - t_x)}{2(t_x - t_{min})} \right]$$

(b) الگوی محاسبه‌ی دمای ساعتی در طول شب:

$$T = T_{sky} + \quad (11)$$

$$(T_{set} - T_{sky}) \exp\{-k[t - (12 + (Da/2) - \alpha Da)]\}$$

$$t = 12 + (Da/2) - \alpha Da \quad (12)$$

$$T_{set} = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \cos \left[\frac{\pi(1 - 4\alpha)}{2(3 - 4\alpha)} \right] \quad (13)$$

$$K = \frac{\ln \left[\frac{T_{set} - T_{sky}}{T_{min} - T_{sky}} \right]}{24 - D_a + 2\alpha D_a} \quad (14)$$

D_a طول روز نجومی، T_{set} دما در زمان غروب آفتاب، t_{set} زمان غروب آفتاب، T_{sky} دمای آسمان شب با شروع از یک ساعت قبل از غروب خورشید و مقدار α برابر ۰/۰۶ است.

رضایی‌پژند و همکاران (۱۶) الگوهای مختلفی را برای برآورد متوسط دمای روزانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک استان خراسان بررسی و الگوی نهایی (۱۵) را با عرض از مبدأ و ضرایب جدید برای برآورد متوسط دمای روزانه ارائه کرده‌اند.

$$\bar{T} = -1.132 + 0.417T_{min} + 0.591T_{max} \quad (15)$$

فرزندی و همکاران (۱۶) الگویی برای برآورد متوسط دمای روزانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران پیشنهاد دادند. نتیجه به صورت ترکیب غیرخطی از دماهای بیشینه و کمینه‌ی روزانه مطابق رابطه‌ی (۱۶) ارائه شده است.

$$\ln(T_{avg} + 30) = -7.023 \times 10^{-2} + 0.377 \ln(T_{min} + 30) + 0.635 \ln(T_{max} + 30) \quad (16)$$

پژوهش‌ها نشان می‌دهند روش‌های مرسوم برای برآورد میانگین دما از دقت قابل قبولی برخوردار نیستند. هدف مقاله حاضر ارائه الگوهای خطی جدید برای محاسبه میانگین دمای روزانه در نواحی مختلف اقلیمی ایران است. بنابراین الگوهای اصلاح شده و دقیق‌تر برای برآورد این میانگین روزانه متناسب با اقلیم مربوطه براساس داده‌های اندازه‌گیری شده (نمونه) در ساعت‌های رسمی ارائه شده است. کشور ایران با روش افرازی میانه محور به سه اقلیم ساحلی، کوهستانی و بیابانی و نیمه‌بیابانی تقسیم شده است (۶). نتایج حاصل از این خوشه‌بندی در انجام پژوهش حاضر به کار گرفته شده‌اند. نمونه‌گیری سیستماتیک برای انتخاب ایستگاه‌های نمونه هر خوشه مورد استفاده قرار گرفته و مقایسه نتایج ارائه شده در این مقاله با رابطه مرسوم میانگین گیری دما (رابطه ۱) نیز توسط میانگین مربعات خطاها (MSE) انجام شده است، که بیانگر توان بالای الگوهای پیشنهادی برای برآورد میانگین دمای روزانه برای این سه ناحیه اقلیمی ایران است.

غیرمستقیم برای کاهش خطا در راستای محاسبه میانگین دمای روزانه ارائه کرده‌اند. چند نمونه از آنها به شرح زیر هستند.

پارتون^۱ و لوگان^۲ (۱۴) الگوهای زیر را برای محاسبه دمای هوا از مقادیر کمینه و بیشینه‌ی دما ارائه داده‌اند:

(a) طول روز

$$T = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \sin \left[\frac{\pi(t - t_{min})}{D_a + 2a} \right] \quad (2)$$

(b) طول شب

$$T = (T_{min} - d) + [T_{set} - (T_{min} - d)] \exp \left[\frac{-b(t - t_{set})}{(24 - D_a + c)} \right] \quad (3)$$

$$d = (T_{set} - T_{min}) / [\exp(b) - 1] \quad (4)$$

$$T_i = (T_{max} - T_{min}) \sin \left(\frac{\pi m}{Y + a^2} \right) + T_{min} \quad (5)$$

$$T_i = T_{min} + (T_{set} - T_{min}) \exp \left(\frac{bn}{Z} \right) \quad (6)$$

D_a طول روز نجومی، T_{set} دما در غروب آفتاب که از معادله (۶) محاسبه می‌شود. t_{set} زمان غروب آفتاب، m تعداد ساعات پس از حداقل دما تا غروب آفتاب، n تعداد ساعات پس از غروب آفتاب تا زمان حداقل دما، T_i دما در ساعت i ام، Y تعداد ساعات طول روز، Z تعداد ساعات طول شب و در ارتفاع ۱/۵ متر از سطح زمین برای دمای هوا مقادیر ثابت a ، b ، c به ترتیب ۱/۸۶، ۲/۲ و ۰/۱۷- در معادلات فوق است.

رانینگ^۳ و همکاران (۱۵) برای برآورد دمای روزانه از روی دمای کمینه و بیشینه در یک منطقه‌ی کوهستانی با اطلاعات به‌دست آمده از کاغذهای دمانگار رابطه (۷) را پیشنهاد کردند. وزن دمای بیشینه در این رابطه ۱/۵ برابر وزن دمای کمینه است.

$$T_{avg} = 0.606T_{max} + 0.394T_{min} \quad (7)$$

کیمبال^۴ و بلامی^۵ (۸) معادلات محاسبه‌ی دمای هوا را مستقل از ثابت‌های تجربی و مجزا از یک مکان خاص ارائه کرده‌اند.

الگوی محاسبه‌ی دمای ساعتی در طول روز:

$$t_x = 12 + (Da/4) h \quad (8)$$

$$t_{min} = t_r + \alpha Da \quad (9)$$

$$T = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) \cos \quad (10)$$

1- Parton

2- Logan

3- Running

4- Kimbal

5- Belami

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

ایران کشوری پهناور است که از نظر جغرافیایی ویژگی‌های خاصی دارد و از لحاظ اقلیمی بسیار متنوع است. ایران یکی از کشورهای وسیع جهان است که در محدوده ۲۵ درجه و سه دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و پنج دقیقه تا ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه طول شرقی واقع شده است. حدود ۹۰ درصد خاک ایران در محدوده فلات ایران واقع شده است و کشوری کوهستانی محسوب می‌شود. آب و هوای ایران بیشترین تأثیر را از رشته کوه‌های زاگرس که از غرب تا جنوب غربی ایران کشیده شده‌اند و رشته کوه البرز که در بخش شمالی ایران واقع شده‌اند می‌گیرد (۱). این کشور هم‌اکنون ۲۸۹ ایستگاه سینوپتیک و تعداد بسیاری ایستگاه تبخیرسنجی و اقلیم‌شناسی وابسته به سازمان هواشناسی، ایستگاه‌های باران‌سنجی معمولی، باران‌سنجی ذخیره‌ای و تبخیرسنجی وابسته به وزارت نیرو دارد. با این حال ایستگاه‌های سینوپتیک دقت بالاتر و آمار قابل اعتماد تری دارند. آمار این ایستگاه

ها در مقاله حاضر استفاده شده است. نظر به اینکه رفتار متغیر دما در اقلیم‌های مختلف متفاوت است، بنابراین انجام این پژوهش نیازمند انتخاب خوشه‌بندی اقلیمی برای کشور ایران است. مطابق خوشه‌بندی منتخب، کشور ایران به سه اقلیم کوهستانی، ساحلی و بیابانی و نیمه بیابانی تقسیم شده است. مقاله حاضر در نظر دارد روابطی جدید برای برآورد میانگین دمای روزانه برای این سه ناحیه اقلیمی (خوشه) ایران ارائه دهد.

انتخاب خوشه‌بندی

فرزندی و همکاران (۱۳۹۰) کشور ایران را به روش افرازی میانه محور به سه خوشه ساحلی، کوهستانی و بیابانی و نیمه‌بیابانی تقسیم کردند. نتایج حاصل از این خوشه‌بندی (جدول ۱، ۲، ۳) در پژوهش حاضر استفاده شد. نقشه پهنه‌بندی ایران برای درک بهتر (شکل ۱) ارائه شده است. خوشه ساحلی با اعداد ۱، خوشه کوهستانی با اعداد ۲ و خوشه بیابانی و نیمه بیابانی با اعداد ۳ مشخص شده است.

جدول ۱- نام و شماره ایستگاه‌های خوشه ساحلی (فرزندی، ۱۳۹۰)

Table 1- Name and number of Coastal cluster stations (Farzandi, 2011)

نام ایستگاه	شماره ایستگاه	نام ایستگاه	شماره ایستگاه	نام ایستگاه	شماره ایستگاه
Station name	Station number	Station name	Station number	Station name	Station number
امیدیه آغاجاری	3	آستارا	2	آبادان	1
Omidiye aghajari		Astara		Abadan	
فرودگاه لامرد	6	بندر دایر	5	صفی آباد دزفول	4
Lamerd airport		Bandar Daier		Safi abad Dezful	
بندر ماهشهر	9	بندر لنگه	8	بندرعباس	7
Bandar Mahshahr		Bandar Lenge		Bandar Abbas	
رامسر	12	بوستان	11	بهبهان	10
Ramsar		Bostan		Behbahan	
دزفول	15	دهلران	14	بوشهر ساحلی	13
Dezful		Dehloran		Coastal Bushehr	
گنبد کاووس	18	بندر انزلی	17	قراخیل قائم شهر	16
Gonbad kavus		Bandar Anzali		Qara kheil	
جزیره قشم	21	جاسک	20	منجیل	19
Qeshm Island		Jask		Manjil	
جزیره سیری	24	جزیره ابوموسی	23	بابلسر	22
Siri Island		Abu Musa		Babolsar	
گرگان	27	میناب	26	کهنوج	25
Gorgan		Minab		Kahnnoj	
رامهرمز	30	نوشهر	29	مراوه تپه	28
Ramhormoz		Noshahr		Marave tappe	
بوشهر	33	رشت	32	پارس آباد مغان	31
Bushehr		Rasht		Pars Abad	
سرخس	36	شوشتر	35	اهواز	34
Sarakhs		Shooshtar		Ahvaz	
زهک	39	زابل	38	جزیره کیش	37
Zahak		Zabol		Kish Island	

جدول ۲- نام و شماره ایستگاه‌های خوشه کوهستانی (فرزندی، ۱۳۹۰)
 Table 2- Name and number of Mountainous cluster stations (Farzandi, 2011)

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	شماره ایستگاه	نام ایستگاه	شماره ایستگاه	نام ایستگاه
Station number	Station name	Station number	Station name	Station number	Station name
1	اهر	2	کرمانشاه	3	اراک
	Ahar		Kermanshah		Arak
4	ماهشان	5	بافت	6	بیجار
	Mahshan		Baft		Bijar
7	بیرجند	8	بروجن	9	بروجرد
	Birjand		Borujen		Borujerd
10	داران	11	اصفهان	12	اسلام آبادغرب
	Daran		Esfahan		Eslam Abad
13	ارومیه	14	قائن	15	غروه
	Urmia		Qaen		Gharve
16	گلپایگان	17	همدان فرودگاه	18	همدان نوزه
	Golpayegan		Hamedan Airport		Hamedan Airbase
19	ایلام	20	کبوترآباد	21	کنجوار
	Ilam		Kabootar Abad		Konjvar
22	الیگودرز	23	خلخال	24	سیرجان
	Aligudarz		Khalkhal		Sirjan
25	کوهرنگ	26	لردگان	27	مهاباد
	Kuhrang		Lordegan		Mahabad
28	ماکو	29	ملایر	30	مراغه
	Maku		Malayer		Maraghe
31	مریوان	32	مروست	33	مشکین شهر
	Marivan		Marvast		Meshkin shahr
34	نائین	35	شهرکرد	36	نطنز
	Naein		Shahreکرد		Natanz
37	فیروزکوه	38	پیرانشهر	39	اردبیل
	Firuzkuh		Piranshahr		Ardebil
40	سدردوزن	41	سقز	42	سهند
	Doroudzan Dam		Saghez		Sahand
43	سنندج	44	سراب	45	سردست
	Sanandaj		Sarab		Sardast
46	زنجان	47	نهایوند	48	شهرضا
	Zanjan		Nahavand		Shahreza
49	شرق اصفهان	50	تربت حیدریه	51	شمال تهران
	East Esfahan		Torbate Heydariyeh		North of Tehran
52	سیاه بیشه	53	خدابنده	54	تفرش
	Siah Bisheh		Khodabandeh		Tafresh
55	تکاب	56	یاسوج	57	شیراز
	Takab		Yasuj		Shiraz
58	شهر بابک	59	زرینه اوباتو		
	Shahre Babak		Zarrineh		

محاسبه میانگین دمای روزانه با انتگرال گیری

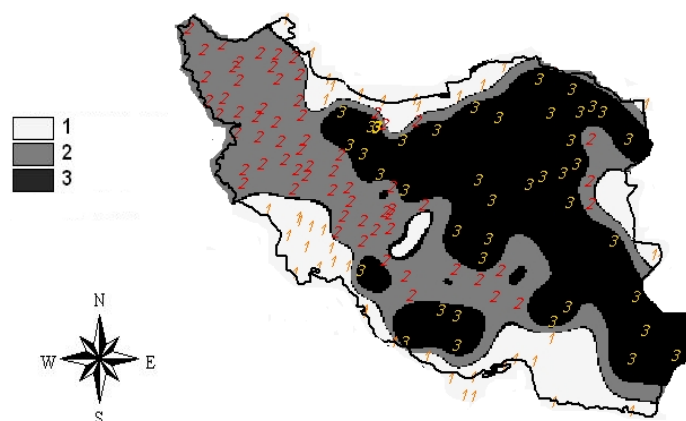
منحنی شبانه‌روزی دما یک منحنی نامتقارن، چوله به راست است. برای محاسبه میانگین دما در طول شبانه‌روز باید سطح زیر منحنی این متغیر را محاسبه کرده و بر ۲۴ (ساعات شبانه‌روز) تقسیم

کنیم. محاسبه سطح زیر منحنی دما با انتگرال گیری مطابق رابطه (۱۷) به دست می‌آید. $f(t)$ تابع انتگرال پذیر دما است.

جدول ۱- نام و شماره ایستگاه‌های خوشه بیابانی و نیمه‌بیابانی (فرزندی، ۱۳۹۰)

Table 3- Name and number of Desert and semi-desert cluster stations (Farzandi, 2011)

شماره ایستگاه Station number	نام ایستگاه Station name	شماره ایستگاه Station number	نام ایستگاه Station name	شماره ایستگاه Station number	نام ایستگاه Station name
1	طیس Tabas	2	فسا Fasa	3	بافق Bafgh
4	بم Bam	5	بیارجمند Biarjomand	6	بجنورد Bojnurd
7	بشروییه Boshruyeh	8	چیتگر Chitgar	9	دوگنبدان Dogonbadan
10	دوشان تپه Doshan Tappe	11	قم Qom	12	فردوس Ferdows
13	گرمسار Garmsar	14	قزوین Qazvin	15	رفسنجان Rafsanjan
16	قوچان Quchan	17	گلمکان Golmakan	18	حسن آباداراب Hasan Abad
19	ایران‌شهر Iranshahr	20	یزد Yazd	21	ژئوفیزیک تهران Jeophysic Tehran
22	جلفا Jolfa	23	کنجانجام Konjanjam	24	کاشان Kashan
25	کاشمر Kashmar	26	خاش Khash	27	خوربیابانک Khorbiabanak
28	خوربیرجند Khor Birjand	29	تهران مهرآباد Mehrabad Airport	30	خوی Khoy
31	لار Lar	32	مشهد Mashhad	33	میانه جیرفت Miandeh Jiroft
34	نهبندان Nehbandan	35	نیشابور Neyshabur	36	رباط پشت بادام Robate poshte Badam
37	سبزوار Sabzevar	38	زاهدان Zahedan	39	ساوه Save
40	سمنان Semnan	41	شاهرود Shahrud	42	انار Anar
43	خرم آباد Khoram Abad	44	تربت جام Torbat Jam	45	ایزه Izeh
46	سراوان Saravan				



شکل ۱- پهنه‌بندی ایران براساس خوشه‌بندی افزایی میانه محور (فرزندی، ۱۳۹۰)

(۱- ساحلی، ۲- کوهستانی، ۳- بیابانی و نیمه بیابانی)

Figure 1- Clustering of Iran based on partitioning around medoids (Farzandi, 2011)

(1- Coastal, 2- Mountainous, 3- Desert and semi-desert)

(۱۷)

$$T_{ave} = \frac{1}{24} \int_0^{24} f(t) dt$$

داده‌های در دسترس سه ساعته و به وقت گرینویچ می‌باشند. چون داده‌ها در ساعات خاصی برداشت شده و داده‌های کل ساعات شبانه‌روز موجود نمی‌باشد، بنابراین نزدیک‌ترین تقریب به میانگین واقعی دمای روزانه با انتگرال عددی فوق به روش سیمسون مطابق رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود. این روش در کتب ریاضی یکی از روش‌های دقیق و مشهور محاسبه سطح زیر منحنی با داشتن نقاط آن با معادله حاکم است (توتونیان، ۱۳۷۱).

منحنی ۲۴ ساعته دما توسط دمانگار رسم می‌شود ولی دمانگار در همه ایستگاه‌ها وجود ندارد. به همین دلیل منحنی ۲۴ ساعته دمای آن ایستگاه‌ها موجود نیست. ۸ داده دمای سه ساعته در طی شبانه‌روز در دسترس است که با استفاده از روش سیمسون ۸ نقطه‌ای (رابطه ۱۸) میانگین دمای روزانه هر ایستگاه به طور تقریبی محاسبه می‌شود. بنابراین از این تقریب به عنوان بهترین برآورد میانگین دمای روزانه در پژوهش حاضر استفاده شده است.

$$T_{avg} \cong \frac{1}{24} \{ T_0 + 4(T_3 + T_9 + T_{15} + T_{21}) + 2(T_6 + T_{12} + T_{18}) + T_{24} \} \quad (18)$$

رگرسیون

هدف این پژوهش بررسی و الگوبندی رابطه بین میانگین دمای روزانه با دمای کمینه و بیشینه روزانه است. بنابراین الگوهای رگرسیونی خطی برای انجام این مهم انتخاب و با برآزش آن‌ها به داده‌های دمای روزانه، روابط بین این متغیرها به شکل معادلات مبین الگو نمایش داده شدند.

رگرسیون روشی ریاضی است که چگونگی رابطه بین یک متغیر (به نام متغیر تابع یا پاسخ) با یک یا چند متغیر دیگر (به نام متغیرمستقل یا پیشگو) را بررسی و الگوبندی می‌کند. متغیرها در رگرسیون به انواع قطعی (تعیینی)، غیرقطعی (تصادفی و امکانی)، ابهامی (فازی) و نظایر اینها تقسیم می‌شوند.

مدل رگرسیون را به نمونه‌ای از مشاهدات این متغیرها برآزش داده و الگوبندی کرده، سپس نتایج نمونه را به کل جامعه تعمیم می‌دهیم. الگوبندی رابطه (۱) پدیده قطعی یا غیرقطعی (تصادفی) با یک یا چند پدیده دیگر، تابعی بین این متغیرها مطابق رابطه (۱۹) یا (۲۰) است. معمولاً نمی‌توانیم تمام متغیرهای مؤثر را در الگو دخالت دهیم. زیرا برخی از آنها شناخته شده نیستند یا اطلاعاتی از آنها در اختیار نیست. مؤلفه E_r جانشین تمام مواردی است که در نظر نگرفته و از آنها چشم‌پوشی کرده‌ایم. این مؤلفه را جمله یا مؤلفه تصادفی (اخلال، خطا، پسماند یا باقی‌مانده) و تابع $f(X)$ جمله یا مؤلفه قطعی نامیده می‌شود (۱۶).

الگوهای رگرسیونی

اگر همبستگی فقط دو متغیر X و Y را بررسی کنیم، آن‌را رگرسیون ساده یا دومتغیره می‌گویند (رابطه ۱۹). اگر همبستگی یک یا چند متغیر Y را با چند متغیر دیگر مانند: $X_1, X_2, \dots, X_n$ بررسی کنیم، به آن رگرسیون چندگانه می‌گویند (رابطه ۲۰).

$$Y = f(X) + E_r \quad (19)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + E_r \quad (20)$$

فرض‌های زیربنایی

پذیرش الگوی رگرسیونی خطی به دو مرحله تفکیک می‌شود. مرحله اول برآورد پارامترهای مدل، آزمون‌های لازم، تحلیل واریانس و ضریب تعیین است. اگر الگو در مرحله اول رد نشود، باید مرحله دوم را که برقراری پذیره‌های زیربنایی است بررسی کرد.

باقی‌مانده‌ها توزیع نرمال دارند.

میانگین باقی‌مانده‌ها صفر است.

باقی‌مانده‌ها واریانس مساوی دارند.

باقی‌مانده‌ها همبستگی پیاپی ندارند.

داده پرت کنترل و بررسی شود.

بررسی برقراری این فرضیات در خصوص باقی‌مانده‌ها با آزمون و رسم نمودارهای مناسب صورت می‌گیرد. الگو پس از تأیید این موارد قبول (رد نمی‌شود) و از آن استفاده می‌شود (رضایی پزند و بزرگ نیا، ۱۳۸۰).

نرم‌افزارها

نرم‌افزار Excel در بخش غربال و آماده‌سازی داده‌ها و نرم‌افزار Spss.22 در برآورد الگوهای رگرسیونی و تحلیل الگوها استفاده شده است. خروجی‌های این نرم‌افزارها شامل جداول خلاصه الگو، تحلیل واریانس، ضرائب الگو و جدول مربوط به باقی‌مانده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

- نمونه‌گیری سیستماتیک: نتایج حاصل از برآورد حجم نمونه برای سه خوشه ساحلی، کوهستانی، بیابانی و نیمه بیابانی به ترتیب هفت، پنج و پنج ایستگاه است. این نتایج برای تعیین ایستگاه‌های نمونه با نمونه‌گیری سیستماتیک استفاده شد. متناسب با حجم نمونه هر خوشه از آن خوشه نمونه‌گیری انجام شد و ایستگاه‌های نمونه هر خوشه انتخاب شدند. به عنوان مثال حجم خوشه کوهستانی (خوشه دوم)، ۵۹ ایستگاه و حجم نمونه آن ۵ ایستگاه است. با تقسیم حجم خوشه به حجم نمونه آن، فاصله نمونه‌گیری (k) حاصل می‌شود.

سال اخیر (۲۰۱۶-۱۹۸۷) برای ایستگاه‌های منتخب هر خوشه (جدول ۴ تا ۶) دریافت شد. بررسی دقت و صحت داده‌ها اولین گام در راستای انجام هر تحلیلی است. به این منظور ۸۷ هزار داده دما برای هر ایستگاه بررسی و تحلیل شد. مقادیر کمینه و بیشینه‌ی دماهای ماهانه هر ایستگاه از سایت سازمان هواشناسی مربوطه برای تعیین حدود اطمینان داده‌ها در هر ماه و بررسی دقت و صحت آنها دریافت شد. آستانه‌های دریافتی دما به صورت حداقل و حداکثر و با روش فیلتر کردن در نرم افزار اکسل غربال داده‌های هر ایستگاه انجام شد. با روش فیلتر کردن مقادیر دمای هر ساعت با همان ساعت در روز قبل و بعد مقایسه شده، داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند.

فاصله نمونه‌گیری برای این خوشه برابر ۱۱ است. اولین نمونه به صورت تصادفی (r) از میان فاصله نمونه‌گیری که اینجا از یک تا یازده است، انتخاب می‌شود. عدد دو را به شکل تصادفی انتخاب کردیم. شماره ایستگاه‌های نمونه برگزیده از جدول ۲ به ترتیب ۲، ۱۳، ۲۴، ۳۵ و ۴۶ است. ایستگاه‌های منتخب به ترتیب: کرمانشاه، ارومیه، سیرجان، شهرکرد و زنجان هستند. ایستگاه‌های نمونه دو خوشه دیگر هم به همین روش مشخص شدند. به این ترتیب هفت ایستگاه منتخب خوشه ساحلی: آستارا، بندرعباس، رامسر، بندر انزلی، بابلسر، گرگان و رشت است و ایستگاه‌های منتخب خوشه بیابانی و نیمه بیابانی به ترتیب: فسا، فرودگاه مهرآباد، قم، یزد و زاهدان هستند. - تحلیل و بررسی صحت داده‌ها: داده‌های سه ساعته دمای ۳۰

جدول ۴- مشخصات ایستگاه‌های نمونه خوشه اول

Table 4- Specifications of the first cluster sample stations

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	استان State	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (m) Elevation(m)
1	آستارا Astara	گیلان Gilan	38.36	48.85	-21.1
2	بندرعباس Bandar Abbas	هرمزگان Hormozgan	27.21	56.37	9.8
3	رامسر Ramsar	مازندران Mazandaran	36.90	50.68	-20
4	بندر انزلی Bandar Anzali	گیلان Gilan	37.47	49.46	-23.6
5	بابلسر Babolsar	مازندران Mazandaran	36.72	52.65	-21
6	گرگان Gorgan	گلستان Golestan	36.90	54.41	0
7	رشت Rasht	گیلان Gilan	37.32	49.62	-8.6

جدول ۵- مشخصات ایستگاه‌های نمونه خوشه دوم

Table 5- Specifications of the second cluster sample stations

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	استان State	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (m) Elevation (m)
1	کرمانشاه Kermanshah	کرمانشاه Kermanshah	34.35	47.15	1318
2	ارومیه Urmia	آذربایجان غربی West Azarbaijan	37.65	45.05	1328
3	سیرجان Sirjan	کرمان Kerman	29.46	55.68	1739
4	شهرکرد Shahreکرد	چهارمحال و بختیاری Chaharmahal va Bakhtiari	32.29	50.84	2048
5	زنجان Zanjan	زنجان Zanjan	36.66	48.52	1659

جدول ۶- مشخصات ایستگاه‌های نمونه خوشه سوم

Table 6- Specifications of the third cluster sample stations

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	استان State	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (m) Elevation (m)
1	فسا Fasa	فارس Fars	28.89	53.72	1268
2	فرودگاه مهرآباد Mehrabad Aripport	تهران Tehran	35.69	51.31	1191
3	قم Qom	قم Qom	34.77	50.85	879
4	یزد Yazd	یزد Yazd	31.90	54.28	1230
5	زاهدان Zahedan	سیستان و بلوچستان Systan va Baluchestan	29.47	60.90	1370

داده‌های پرت دمای ایستگاه کرمانشاه از خوشه دوم را نشان می‌دهد که برای برآورد این داده‌ها بهترین تقریب را بدست آوردیم. نتیجه برآورد داده‌های پرت این جدول پس از غربال در جدول ۸ نشان داده شده است.

نظر به اینکه شرایط نرمال است و هیچ سامانه‌ای روی منطقه وجود ندارد، داده‌های گمشده‌ای که برای هر روز شناسایی می‌شدند با الگوگیری از منحنی‌های ترسیم شده‌ی روز قبل و بعد رسم شده و با درون‌یابی خطی یا لگاریتمی برآورد شدند. جدول ۷ نمونه‌ای از

جدول ۷- نمونه‌ای از داده‌های پرت دما در ایستگاه کرمانشاه خوشه دوم

Table 7- An example of temperature irrelevant data in Kermanshah station of the second cluster

نام ایستگاه Station name	سال Year	ماه Month	روز Day	T0	T3	T6	T9	T12	T15	T18	T21	T00
کرمانشاه Kermanshah	1987	12	3	-7.6	-9.8	-4.6	8	5.4	8	1	-4.2	-5
کرمانشاه Kermanshah	1990	6	20	12	4.5	23	30	31.6	29	23	16	14.2
کرمانشاه Kermanshah	1994	9	5	12.6	12	28	21	25.8	27.2	24	19.4	16.4
کرمانشاه Kermanshah	2006	5	12	6.2	8	15.6	20.2	25.3	10	24	20	18
کرمانشاه Kermanshah	2011	7	4	16.8	17.4	19	33.4	22	19.6	17	15.4	14

جدول ۸- نمونه‌ای از داده‌های پرت دمای ایستگاه کرمانشاه خوشه دوم پس از غربال

Table 8- An example of temperature irrelevant data in Kermanshah station of the second cluster after screening the data

نام ایستگاه Station name	سال Year	ماه Month	روز Day	T0	T3	T6	T9	T12	T15	T18	T21	T00
کرمانشاه Kermanshah	1987	12	3	-7.6	-9.8	-4.6	2	5.4	8	1	-4.2	-5
کرمانشاه Kermanshah	1990	6	20	12	14.5	23	30	31.6	29	23	16	14.2
کرمانشاه Kermanshah	1994	9	5	12.6	12	18	21	25.8	27.2	24	19.4	16.4
کرمانشاه Kermanshah	2006	5	12	6.2	8	15.6	20.2	25.3	24	24	20	18
کرمانشاه Kermanshah	2011	7	4	16.8	17.4	19	20.4	22	19.6	17	15.4	14

$$T_{avg} = 0.518 T_{max} + 0.482 T_{min} \quad (22)$$

ضریب استاندارد شده (Beta)، تحلیل حساسیت را انجام می‌دهد. در واقع میزان اهمیت هر یک از متغیرهای پیشگو در برآورد متغیر پاسخ را بیان می‌کند. ضریب متغیرهای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب ۴۸/۲٪ و ۵۱/۸٪ است. می‌توان نتیجه گرفت دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه حساس‌تر است. الگوهای رایج حساسیت این دو متغیر را یکسان فرض می‌کنند.

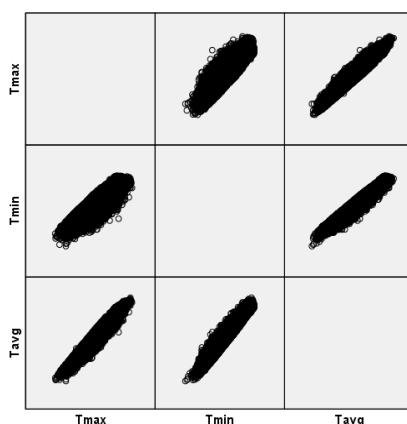
- بررسی برقراری فرض‌های زیربنایی الگوهای برآورد میانگین دمای روزانه خوشه اول: لازمه پذیرش نهایی الگوهای رگرسیونی میانگین دمای روزانه اقلیم ساحلی بررسی برقراری فرض‌های زیربنایی است. بنابراین برای بررسی برقراری فرض استقلال باقی‌مانده‌ها مقدار آماره دوربین-واتسون ۱/۹۰۱ نشان داده شده است. قرار داشتن مقدار این آماره در بازه ۱/۷۴ تا ۲/۳۶ فرض استقلال باقی‌مانده‌ها را تأیید می‌کند. جدول ۱۰ میانگین باقی‌مانده‌ها را صفر نشان می‌دهد. نمودار توزیع باقی‌مانده‌ها (نمودار ۲) با نمودار توزیع نرمال مقایسه شد و مشاهده می‌شود باقی‌مانده‌ها از توزیعی تقریباً نرمال پیروی می‌کنند. میانگین و انحراف معیار ارائه شده و نمودار احتمال باقی‌مانده‌ها (نمودار ۳) تأییدی بر نرمال بودن این نمودار است. نوار مستطیلی افقی حاصل از پراکندگی نقاط، مطابق نمودار ۴ ثابت بودن واریانس باقی‌مانده‌ها را تأیید می‌کند. برقراری فرض‌های زیربنایی پذیرش نهایی الگوی رگرسیونی برآورد میانگین دمای روزانه را برای اقلیم ساحلی (خوشه اول) به همراه داشت. الگوهای برآورد دمای روزانه برای ایستگاه‌های نمونه این اقلیم پس از آزمون‌های لازم در مورد رگرسیون، بررسی فرض‌های زیربنایی و پذیرش برقراری آن‌ها ارائه گردید. مقادیر بالای ضریب تعیین توان بالای الگوها در برآورد میانگین دمای مربوطه را نشان می‌دهند. نتایج نهایی الگوهای برآورد میانگین دمای روزانه برای اقلیم ساحلی و هر یک از ایستگاه‌های نمونه در جدول ۱۱ ارائه شده است.

- تحلیل الگوهای رگرسیونی دمای خوشه اول: الگوی رگرسیونی خطی چندگانه به روش گام به گام به منظور به‌دست آوردن رابطه رگرسیونی بین میانگین دمای روزانه (T_{avg}) با عنوان متغیر پاسخ و متغیرهای بیشینه و کمینه دما که به ترتیب با نماد T_{min} و T_{max} با عنوان متغیرهای پیشگو استفاده شد.

گام اول بررسی ارتباط بین متغیرهای پیشگو و پاسخ است. نمودار پراکنش ماتریسی، رفتار هریک از متغیرها را در مقابل دیگری نمایش می‌دهد. رسم این نمودار روشی هندسی-ریاضی است که با نمایش رفتار متغیرها در مقابل یکدیگر به اثبات رابطه بین آنها می‌پردازیم. مطابق نمودار ۱ رابطه خطی و مستقیم بین همه متغیرها ملاحظه می‌شود. همبستگی میان میانگین دمای روزانه (T_{avg}) و دماهای کمینه و بیشینه روزانه برای خوشه اول برقرار است. و مطابق ضرایب همبستگی محاسبه شده، رابطه تقریباً خطی و مستقیم برقرار است. برای الگوی پذیرفته شده مقدار ضریب تعیین ۰/۹۹۶ است که فقط ۰/۴ درصد تغییرات متغیر پاسخ توسط متغیرهای پیشگو بیان نمی‌شود. این مسئله توانایی مناسب الگو در برآورد میانگین دمای روزانه این اقلیم را نشان می‌دهد. مقدار کم خطای استاندارد برآورد الگوها، تأییدی بر این موضوع است.

همچنین در تحلیل واریانس متغیر T_{max} با بیشترین همبستگی با متغیر پاسخ اولین ورودی به الگو است. آماره فیشر محاسباتی با مقدار این آماره از جدول مقایسه شد. مقدار F محاسبه شده از مقادیر F جدول بیشتر بوده است، بنابراین معنی‌داری الگوی رگرسیون مشخص می‌گردد. مقدار P-value در سطح خطای پنج درصد این نتیجه را تأیید می‌کند. مطابق ضرایب ارائه شده در جدول ضرایب الگوها (جدول ۹) الگوی میانگین دمای روزانه (رابطه ۲۱) و رابطه‌ی تحلیل حساسیت الگوی دوم دما برای خوشه ساحلی (رابطه ۲۲) به صورت زیر است:

$$T_{avg} = 0.047 + 0.489 T_{max} + 0.508 T_{min} \quad (21)$$



نمودار ۱- پراکنش ماتریسی رفتار متغیرهای دمای ورودی الگوی خوشه اول در برابر یکدیگر

Chart 1- Matrix dispersion characteristics of the behavior of input variables in the first cluster pattern against each other

جدول ۹- ضرایب الگوهای دمای خوشه اول، آماره t و اندازه احتمال

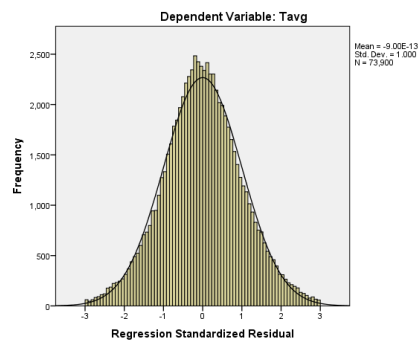
Table 9- The coefficients temperature patterns of the first cluster, t values and probability values

الگو Model	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب استاندارد شده Standardized coefficient	t	p-value
	B	Std.Error	Beta		
1 (Constant)	-1.902	0.018		-106.706	.000
Tmax	0.900	0.001	0.976	1209.238	.000
2 (constant)	0.043	0.006		7.421	.000
Tmax	0.489	0.001	0.518	925.540	.000
Tmin	0.508	0.001	0.482	860.263	.000

جدول ۱۰- مشخصات باقی مانده های الگوی دوم دمای خوشه اول

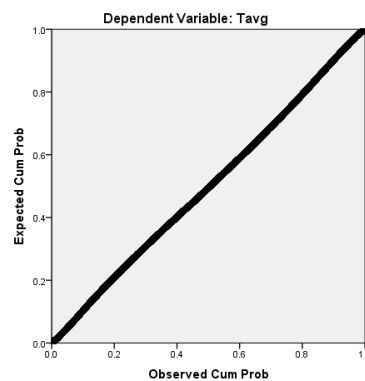
Table 10- The residual of the second temperature pattern in the first cluster

	مینیمم Minimum	ماکزیمم Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation
Residual	-1.645	1.646	.000	0.5485
Std. Residual	-2.999	3.000	.000	1.000



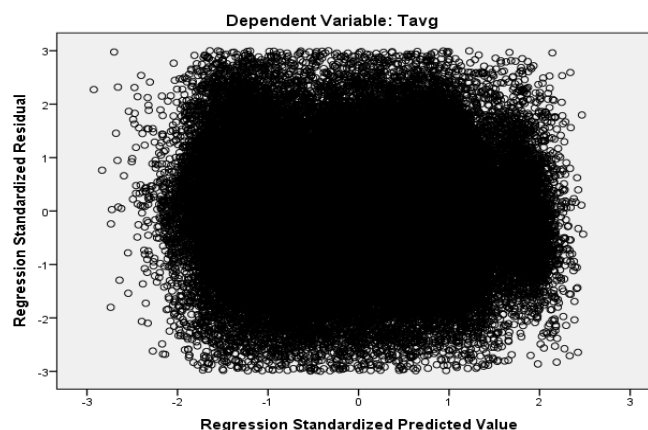
نمودار ۲- توزیع فراوانی باقی مانده های الگوی دوم دمای خوشه اول

Chart 2- Residual distribution of the second temperature pattern in the first cluster



نمودار ۳- احتمال باقی مانده های الگوی دوم دمای خوشه اول

Chart 3- Residual probability of the second temperature pattern in the first cluster



نمودار ۴- پراکنش باقی مانده‌های استاندارد شده الگوی دوم دمای خوشه اول

Chart 4- Standardized residuals distribution of the second temperature pattern in the first cluster

جدول ۱۱- الگوی نهایی برآورد میانگین دمای روزانه برای خوشه اول و هر یک از ایستگاه‌های نمونه

Table 11- Final estimating daily average of temperature patterns for the first cluster and each sample station

الگوی نهایی میانگین دمای روزانه	R2	Std Err	Durbin-Watson	F	P-value
Final daily average of temperature pattern					
خوشه اول First cluster $T_{avg} = 0.047 + 0.489T_{max} + 0.508T_{min}$	0.995	0.54	1.901	8423031.3	.000
آستارا Astara $T_{avg} = 0.066 + 0.503T_{max} + 0.497T_{min}$	0.995	0.55	1.837	1063844.8	.000
بندرعباس Bandar abbas $T_{avg} = -0.51 + 0.509T_{max} + 0.483T_{min}$	0.993	0.53	1.774	741027.6	.000
رامسر Ramsar $T_{avg} = -1.71 + 0.540T_{max} + 0.456T_{min}$	0.995	0.50	1.742	1117695.3	.000
بندر انزلی Bandar Anzali $T_{avg} = -0.178 + 0.546T_{max} + 0.456T_{min}$	0.997	0.41	1.817	1767475.3	.000
بابلسر Babolsar $T_{avg} = -0.303 + 0.513T_{max} + 0.490T_{min}$	0.996	0.47	1.880	1288166.4	.000
گرگان Gorgan $T_{avg} = 0.26 + 0.487T_{max} + 0.498T_{min}$	0.993	0.70	1.984	703866.2	.000
رشت Rasht $T_{avg} = -0.11 + 0.483T_{max} + 0.511T_{min}$	0.995	0.56	1.971	961229.8	.000

الگوهای ارائه شده برای خوشه‌ها و هر یک از شهرهای زیر مجموعه را با الگوی مرسوم نشان می‌دهند. میانگین مربع خطاها (MSE) معیار کاربردی بودن الگوها می‌باشد. MSE_1 و MSE_2 به ترتیب میانگین مربع خطا برای الگوی قدیمی رایج و الگوهای پیشنهادی پژوهش حاضر است. نتایج جداول حاکی از برتری الگوهای پیشنهادی دما و خطای کمتر آن‌ها نسبت به الگوی ۱ است. برای مثال مقدار میانگین مربعات خطا برای الگوی دمای پیشنهادی اقلیم کوهستانی و الگوی مرسوم به ترتیب $0.82/$ و $0.06/$ می‌باشد که کمترین خطا مربوط به الگوی دمای پیشنهادی برای این خوشه است.

- تحلیل الگوهای رگرسیونی دمای خوشه دوم و سوم: برآورد الگوهای رگرسیونی میانگین دمای روزانه خوشه‌های دوم و سوم نیز مانند خوشه اول می‌باشد، شرح کامل نحوه ارائه الگوها و نتایج در بخش تحلیل الگوهای رگرسیونی خوشه اول ارائه شده است. بنابراین از توضیحات مجدد در خصوص خوشه دوم و سوم خودداری شده است. نتایج در جداول ۱۲ و ۱۳ ارائه شده‌اند.

-صحت‌سنجی الگوها: دقت و توان بالای الگوهای میانگین دمای روزانه پیشنهادی برای سه اقلیم مورد نظر پس از مقایسه این الگوها با الگوهای مرسوم مطابق معیار میانگین مربعات خطاها (MSE) تأیید شد. داده‌های جداول ۱۴، ۱۵ و ۱۶ مقایسه‌ی عملی

جدول ۱۲- الگوی نهایی برآورد میانگین دمای روزانه برای خوشه دوم و هر یک از ایستگاه‌های نمونه

Table 12- Daily average of temperature patterns for the second cluster and each sample station

الگوی نهایی میانگین دمای روزانه		R2	Std Err	Durbin-Watson	F	P-valu
Final daily average of temperature pattern						
خوشه دوم Second cluster	$Tavg = -1.009 + 0.572T_{max} + 0.450T_{min}$	0.993	0.85	1.932	3596890.6	.000
کرمانشاه Kermanshah	$Tavg = -1.125 + 0.578T_{max} + 0.443T_{min}$	0.993	0.80	1.862	809487.2	.000
ارومیه Urmia	$Tavg = -0.644 + 0.539T_{max} + 0.480T_{min}$	0.994	0.77	1.786	833135.6	.000
سیرجان Sirjan	$Tavg = -0.613 + 0.549T_{max} + 0.498T_{min}$	0.990	0.92	1.860	554795.7	.000
شهرکرد Shahrekord	$Tavg = -1.735 + 0.624T_{max} + 0.403T_{min}$	0.992	0.79	1.980	662077.3	.000
زنجان Zanjan	$Tavg = -0.864 + 0.559T_{max} + 0.443T_{min}$	0.991	0.89	1.952	633049.3	.000

جدول ۱۳- الگوی نهایی برآورد میانگین دمای روزانه برای خوشه سوم و هر یک از ایستگاه‌های نمونه

Table 13- Daily average of temperature patterns for the third cluster and each sample station

Table 10: Daily average of temperature patterns for the third cluster and each sample station						
الگوی نهایی میانگین دمای روزانه Final daily average of temperature pattern		R ²	Std Err.	Durbin-Watson	F	P-value
خوشه سوم Third cluster	$Tavg = -0.935 + 0.552T_{max} + 0.479T_{min}$	0.994	0.75	1.855	4471721.4	.000
فسا Fasa	$Tavg = -0.826 + 0.531T_{max} + 0.515T_{min}$	0.993	0.76	1.952	732273.2	.000
فرودگاه مهرآباد Mehrabad Aripport	$Tavg = -0.935 + 0.589T_{max} + 0.419T_{min}$	0.997	0.57	1.789	1664172.9	.000
قم Qom	$Tavg = -1.091 + 0.561T_{max} + 0.466T_{min}$	0.995	0.76	1.987	1019191.4	.000
یزد Yazd	$Tavg = -1.246 + 0.570T_{max} + 0.456T_{min}$	0.995	0.69	1.839	1124776.6	.000
زاهدان Zahedan	$Tavg = -1.427 + 0.582T_{max} + 0.472T_{min}$	0.990	0.87	2.213	534957.4	.000

جدول ۱۴- مقایسه میانگین دمای خوشه اول به روش معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با محاسبه MSE

Table 14- Comparison of average temperature in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by calculating MSE

دما Temperature	خوشه اول First cluster	آستارا Astara	بندرعباس Bandar Abbas	رامسر Ramsar	بندر انزلی Bandar Anzali	بابلسر Babolsar	گرگان Gorgan	رشت Rasht
_۱ MSE	0.52	0.38	0.29	0.39	0.20	0.35	1.1	0.92
_۲ MSE	0.45	0.31	0.24	0.36	0.18	0.32	1.0	0.79

جدول ۱۵- مقایسه میانگین دمای خوشه دوم به روش معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با محاسبه MSE

Table 15- Comparison of average temperature in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by calculating MSE

دما Temperature	خوشه دوم Second cluster	کرمانشاه Kermanshah	ارومیه Urmia	شهرکرد Shahrekord	سیرجان Sirjan	زنجان Zanjan
$\sqrt{\text{MSE}}$	1.06	1.10	0.72	1.32	1.21	0.95
$\sqrt[3]{\text{MSE}}$	0.82	0.72	0.65	0.96	0.73	0.87

جدول ۱۶- مقایسه میانگین دمای خوشه سوم به روش های معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با محاسبه MSE

Table 16- Comparison of average temperature in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by calculating MSE

دما Temperature	خوشه سوم Third cluster	فسا Fasa	مهرآباد Mehrabad	قم Qom	یزد Yazd	زاهدان Zahedan
$\sqrt{\text{MSE}}$	0.83	0.85	0.48	0.82	0.68	1.34
$\sqrt[3]{\text{MSE}}$	0.65	0.65	0.40	0.63	0.55	0.83

نتیجه گیری

تأثیر بیشتری دارد. این نتایج با الگوی رایج (رابطه ۱) مغایرت دارد. بنابراین استفاده از الگوهای اصلاح شده پیشنهادی این پژوهش متناسب با اقلیم و ایستگاه مربوطه موجب کاهش خطای برآورد میانگین دمای روزانه می گردد. واسنجی و مقایسه الگوهای دمای پیشنهادی برای این سه اقلیم با الگوهای دمای مرسوم توان بالای الگوهای پیشنهادی این مقاله را نشان می دهد.

الگوهای ارائه شده در برآورد میانگین دمای روزانه با رعایت اصول ریاضی حاکم بر رگرسیون به دست آمده اند، درحالی که الگوهای مرسوم چنین اصولی را رعایت نکرده اند، بنابراین می توان نتیجه گرفت که الگوهای پیشنهادی این تحقیق نسبت به آنها توانا تر هستند. لذا استفاده از الگوهای اصلاح شده در این پژوهش متناسب با اقلیم و ایستگاه مربوطه موجب کاهش خطای برآورد میانگین دمای روزانه می گردد. به منظور کاهش بیشتر خطا در برآورد میانگین دمای روزانه پیشنهاد می شود خوشه بندی اقلیمی در مقیاس استانی انجام شود و براساس داده های ایستگاه های نمونه هر استان الگوهای برآورد میانگین دما در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه ارائه شوند. همچنین روش پژوهش حاضر برای برآورد میانگین دما در مقیاس ماهانه و سالانه تکرار شود. این پژوهش ارائه راهکاری برای سایر ایستگاه ها است تا بتوان الگوی خاص هر ایستگاه را محاسبه و از آن استفاده کنند. چون هر ایستگاه رفتار دمایی خود را دارد که تحت تأثیر خرد اقلیم اطراف آن نیز می باشد.

رفتار تغییرات روزانه ی دما در یک روز عادی یک منحنی چوله به راست است. بنابراین استفاده از ضرایب مساوی برای برآورد میانگین دمای روزانه خطا دارد. همچنین مسئله تأثیر اقلیم بر الگوهای رفتاری تغییرات دما در روش های موجود مورد توجه قرار نگرفته است. لذا هدف این پژوهش ارائه الگوهایی جدید برای برآورد میانگین دمای روزانه در سه ناحیه اقلیمی ایران و ایستگاه های نمونه مربوطه است. مطابق دستاوردهای حاصل از منابع، جداول و نمودارها مشاهده می شود، در منابع مختلف وجود عرض از مبدأ در الگوهای رایج برآورد میانگین دمای روزانه را صفر و وزن متغیرهای پیشگو برابر فرض شده اند. درحالی که نتایج ارائه شده در این پژوهش وجود عرض از مبدأ را در تمام الگوها تأیید می کند. ضرایب استاندارد شده (Beta) متغیرهای پیشگو بیانگر نابرابری وزن این متغیرها در تمامی الگوها است. ضرایب همبستگی در جداول خلاصه ی الگوها بیانگر رابطه خطی و مستقیم بین متغیرها است. همچنین ضرایب تعیین و خطای استاندارد برآورد الگوها در این جداول توان بالای الگو در برآورد میانگین های مربوطه را نشان می دهند. آماره فیشر محاسبه شده در تمامی جداول تحلیل واریانس از آماره فیشر جدول بیشتر بوده، پس معنی دار بودن الگوی رگرسیونی برای تمام معادلات مبین الگو مورد تأیید است.

دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه در تمامی الگوهای ارائه شده

منابع

- Ball G., and Hall D. 1967. A clustering technique for summarizing multivariate data. Behavioral Science 12: 153-155.
- Eccel E. 2012. Estimate air humidity from temperature and precipitation measures for modelling applications. Meteorological Applications 19: 118-128.
- Ephrath J.E., Goudriaan J., and Marani A. 1996. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind

- speed & relative humidity by equations from daily characteristics. *Agricultural Systems* 377-393.
4. Farris J.S. 1969. On the cophenetic correlation coefficient. *Systematic Zoology* 18: 279-285.
5. Floyd R.B., and Braddock R.D. 1984. A simple method for fitting average diurnal temperature curves. *Agriculture and Forest Meteorology* 32: 107-119.
6. Farzandi M., Rezaee-Pazhand H., and Seyyed nejad Golkhatmi N. 2012. Patterns to estimate the average daily temperature in arid and semiarid regions of Iran, International desert Research Center, university of Tehran.
7. Kelley K., and Maxwell S.E. 2003. Sample size for multiple regression: Obtaining regression coefficients that are accurate, not simply significant. *Psychological Methods* 8(3): 305-321.
8. Kimball B.A., and Bellamy L.A. 1986. Generation of diurnal solar radiation, temperature and humidity patterns. *Energy in Agriculture* 5: 185-97.
9. Kimball J.S., Running S.W., and Nemani R. 1996. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature NTSG School of Forestry. University of Montana, Missoula MT 59812, USA.
10. Kristi A., Gebhart S.C., and William C.M. 2001. Diurnal & seasonal patterns in light scattering, extinction and relative humidity, *Atmospheric Environment* 35: 5177-5191.
11. Kukal M., and Irmak S. 2016. Long-term patterns of air temperatures, daily temperature range, precipitation, grass-reference evapotranspiration and aridity index in the USA great plain. *Journal of Hydrology* 542: 978-1001.
12. Mehdizadeh S., Behmanesh J., and Khalili K. 2016. Application of gene expression programming to predict daily dew point temperature. *Applied Thermal Engineering* 9383: 1-26.
13. Peter E., Thornton H.H., and Michael A.W. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. School of Forestry, University of Montana, Missoula, MT 59812, USA.
14. Parton W.J., and Logan J.A. 1981. A model for diurnal variation in soil and air temperature. *Journal of Agriculture Meteorology* 23: 205-216.
15. Running S.W., Nemani R.R., and Hungerford R.D. 1987. Extrapolation of Synoptic meteorological data in mountainous terrain and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. 17: 472-483.
16. Rezaee-Pazhand H., Habibi M., and Farzandi M. 2008. Mean daily temperature for arid and semi-arid zones in Iran. *Iran water Resources Research* 4(1): 70-74. (In Persian with English abstract)

Regression Patterns of Diurnal Temperature in Different Climatic Regions of Iran

B. Mirkamandr^{1*}- H. Sanaeinejad²- H. Rezaee-Pazhand³ - M. Farzandi⁴

Received: 10-11-2018

Accepted: 14-09-2020

Introduction: The behavior of daily changes in temperature is not straightforward. We first drew the curve of this variable on a normal day. It can be seen that the distribution of this variable was not normal. The curve of this variable was a skewed curve to the right. Therefore, the equal coefficients could be used only as approximation for estimating daily average temperature. Climatic conditions of the meteorological stations were also another parameter to be considered. This research presents a new method for estimating daily average of temperature in three climatic regions of Iran. The patterns for the sample stations in each climatic region were presented separately.

Materials and Methods: E. Eccel (2012) developed algorithms to simulate the relative humidity of the minimum daily temperature in 23 weather stations in the ALP region of Italy. In this research, the base pattern was calibrated by temperature and precipitation measurement.

Ephrath, et al. (1996) developed a method for the calculation of diurnal patterns of air temperature, wind speed, global radiation and relative humidity from available daily data. During the day, air temperature was calculated by:

$$T_a = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})S(t) \quad (1)$$

$$S(t) = \sin\left(\pi \frac{t - LSH + \frac{DL}{2}}{DL + 2P}\right) \quad (2)$$

where $S(t)$: Dimensionless function of time, DL : Day Length h, LSH : the time of maximum solar high h, t_a : Current air Temperature, P : the delay in air $T_{\max}$ with respect to LSH h.

Farzandi, et al. (2012) presented more accurate patterns for estimating daily relative humidity from humidity of Iranian local standard hours and daily precipitation variables, the minimum, maximum and average daily temperature in coastal regions. The purpose was to present linear and nonlinear patterns of daily relative humidity separately for different months (12 patterns) and annually in coastal regions (the Caspian Sea, the Persian Gulf, and the Oman Sea). Rezaee-Pazhand, et al. (2008) introduced new patterns for estimating daily average temperature in arid and semiarid regions of Iran. Final pattern has interception and new coefficients for estimate daily average of temperature.

$$\bar{T} = -1.132 + 0.417T_{\min} + 0.591T_{\max} \quad (3)$$

Veleva, et al. (1996) showed that the atmospheric temperature-humidity complex (T-HC) of sites located in a tropical humid climate cannot be well characterized by annual average values. Better information is given by the systematic study of daily changes of temperature (T) and relative humidity (RH), which can be modeled with linear and parabolic functions. Farzandi et al. (2011) divided Iran into three climatic clusters used in the present work. First a classification which provides climatological clustering. This clustering was used the data of annual relative humidity, temperature, precipitation, altitude, range of temperature, evaporation and three indices of De

1- Ph.D. Student of Shahid Bahonar University of Kerman

(*- Corresponding Author Email: bahar.mirkamandari@gmail.com)

2 and 4- Associate Professor of Meteorology and Philosophy Doctor Agrometeorology, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

3- M.Sc. Hydrology Department of Civil Engineering, Azad University of Mashhad

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.76165

Martonne, Ivanov and Thornthwaite. Iran was partitioned into three clusters i.e. coastal areas, mountainous range and arid and semi-arid zone. Several clustering methods were used and around method was found to be the best. Cophenetic correlation coefficient and Silhouette width were validation indices. Homogeneity and Heterogeneity tests for each cluster were done by L-moments. The "R", software packages were used for clustering and validation testes. Finally clustering map of Iran was prepared using "GIS". The data of 149 synoptic stations were used for this analysis. Systematic sampling was done to select sample stations. The linear regression model was fitted after screening and data preparation. A model was presented for estimating daily average of temperature in each climatic region and sampling stations in each cluster. The best models were presented by reviewing the required statistics and analyzing the residuals. The calibration and comparison of the presented patterns in this paper with commonly applied models were undertaken to calculate the mean squared error. "SPSS.22" software was used for analysis.

Results and Discussion: The coefficient of determination (R^2) and the Fisher statistics show that the patterns have a good ability to estimate the daily average of temperature. The daily average temperature pattern confirmed an interception in the equations. Standardized coefficients showed that predictor variables were not weighted in all of the patterns. The average values of the residuals in each pattern was zero. According to the graphs, stabilization of variance can be seen based on the residual on each pattern in each cluster. The mean squared error is a measure of the applicability of patterns. The accuracy of the estimating daily average temperature by the recommended models in three climates was confirmed by calculating the mean squared error. The proposed patterns of this study had less error than common patterns. Thus, the patterns have a good ability to estimate daily average temperature.

Conclusion: The maximum temperature in calculating daily average of temperature is more effective than the minimum temperature. The standardized coefficient (Beta) of the daily average temperature patterns in coastal cluster was 48.2% for the minimum temperature and 51.8% for the maximum temperature. The largest influence of the maximum temperature was 63.1% in mountainous cluster for estimating daily average temperature. Range of the interception in the equations was from -1.735 to 0.26. The independent assumption of the residual was confirmed with the acceptable value of Durbin-Watson statistics. The average of the residuals in each patterns was zero. According to the graphs stabilization of variance can be seen based on the residual on the each pattern in each cluster. The proposed patterns were calculated according to mathematical principles but the common patterns did not consider these mathematical principles. The mean squared error (MSE) of the proposed patterns are less than common patterns. Therefore, the patterns presented in this study are more powerful than common patterns. The largest difference between the proposed patterns and the common patterns for estimate the daily average of temperature was 24% in mountainous cluster. Climatic clustering was done for states. The monthly and annual average temperature can be reliably estimated by using the data of sample stations in each state. These findings can be used to estimate daily, monthly and annual average of relative humidity in three climates and sample stations. In addition, one can employ the method for estimating daily, monthly and annual average of relative humidity and temperature based on around climatological clustering of Iran and other stations. Annual relative humidity, temperature, precipitation, altitude, range of temperature, evaporation can also be applied to estimate daily, monthly and annual average of temperature and relative humidity more accurately.

Keywords: Daily average of temperature, Maximum temperature, Minimum temperature, Regression model, Systematic sampling

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی تحت تأثیر تغییر اقلیم با رویکرد کاپولا در استان

فارس

سیدمعین فرمان‌آراء^۱ - بهرام بختیاری^{۲*} - نسرین سیاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۱۱

چکیده

کاهش بارش، رواناب و رطوبت خاک و افزایش درجه حرارت هوا و عمق سطح ایستابی نسبت به شرایط میانگین دراز مدت نشانه وقوع خشکسالی است. هدف از این پژوهش، بررسی خشکسالی هواشناسی با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در شش ایستگاه هواشناسی سینوپتیک استان فارس تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تابع کاپولا در دوره آینده می‌باشد. به این منظور داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های مورد نظر در بازه زمانی ۱۵ (۲۰۱۸-۲۰۰۴) الی ۳۳ (۲۰۱۸-۱۹۸۶) سال از سازمان هواشناسی کشور تهیه شدند. این پژوهش در سه مرحله اجرا شد. مرحله اول: ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس گردش عمومی جو (CanESM2) بر مبنای دو سناریوی حد واسطه (RCP4.5) و بدینانه (RCP8.5) با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM, ver. 4.2.9 در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ میلادی. مرحله دوم: محاسبه شاخص SPI و مشخصات خشکسالی در دوره پایه و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) در محیط برنامه‌نویسی R. مرحله سوم ترسیم منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی خشکسالی (SDF) با رویکرد کاپولا برای دوره پایه و آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5. نتایج نشان داد که فراوانی وقوع خشکسالی در استان فارس طی دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ در هر دو سناریو افزایش یافته که در سناریوی RCP8.5، با افزایش مدت خشکسالی نیز همراه می‌باشد. همچنین انتظار می‌رود که بارش در این استان در دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۲/۸ درصد افزایش و ۶/۵ درصد کاهش یافته و به طبع آن شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه در سناریو RCP8.5 افزایش یابد. انتظار می‌رود که مقدار بارش در ایستگاه شیراز تحت هر دو سناریو کاهش یابد. به همین ترتیب، انتظار می‌رود مقدار بارش در ایستگاه بوانات در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب افزایش و کاهش یابد. برای ایستگاه شیراز مدت یک رویداد خشکسالی با میزان سختی ۲ و دوره بازگشت ۵ سال، در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵/۵، ۵/۵ و ۶ ماه به دست آمد. این میزان برای ایستگاه بوانات به ترتیب ۴، ۳/۵ و ۵ ماه برآورد شد که انتظار کاهش بارش در هر دو سناریو در ایستگاه شیراز و افزایش و کاهش بارش به ترتیب تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه بوانات می‌رود.

واژه‌های کلیدی: شاخص بارش استاندارد شده، دوره خشکی، منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی، SDSM

مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخاطره‌آمیز طبیعی است که به طور مستقیم بر زندگی بشر تأثیر می‌گذارد. تعیین دقیق زمان شروع و پایان خشکسالی دشوار است از این رو برآورد اثرات و خسارات خشکسالی تا حد زیادی مشکل می‌باشد. خشکسالی‌ها را می‌توان به چهار گروه عمده هواشناسی، هیدرولوژی، کشاورزی و اقتصادی -

اجتماعی تقسیم نمود، که در خشکسالی هواشناسی مقادیر بارندگی‌ها، تبخیر-تعرق و یا سایر متغیرهای اقلیمی مرتبط با گیاه نسبت به مقدار میانگین سنجیده می‌شوند. خشکسالی پدیده‌ای است که اساساً با کمبود بارش و یا در برخی موارد با تبخیرتعرق در یک منطقه مرتبط است. بر اساس نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه خشکسالی، مشخص شده است که بارندگی، دما، تبخیر، باد و رطوبت نسبی نقش مهمی در وقوع، شدت و تداوم خشکسالی دارند. با وجود این، بارش مهم‌ترین عامل در تعیین آغاز، شدت و خاتمه خشکسالی‌ها است (۱۶). پژوهش‌های انجام شده توسط پالمر (۲۸) از جمله نخستین پژوهش‌ها در زمینه خشکسالی می‌باشد. طبق تعریف وی، خشکسالی عبارت از کمبود مستمر و غیرطبیعی رطوبت هوا، که واژه غیرطبیعی به انحراف شاخص مورد نظر از شرایط طبیعی (میانگین) و واژه مستمر به

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(Email: drbakhtiari@uk.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول
DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81899

حالت کمبود گفته می‌شود.

نظر به ساده بودن محاسبات تحلیل‌های تک متغیره نسبت به چند متغیره، در بسیاری از مطالعات خشکسالی از تحلیل‌های تک متغیره بهره گرفته شده است (۶ و ۳۱). اما خشکسالی یک پدیده تصادفی حدی و چند متغیره است و مشخصه‌های سختی و مدت آن به هم وابسته هستند و به صورت مستقل و جدای از هم تغییر نکرده و هرکدام بر دیگری تأثیرگذار است. از این رو استفاده از توابع کاپولا^۱ دومتغیره بین سختی و مدت خشکسالی می‌تواند ارتباط معنادار بین این دو ویژگی خشکسالی را نشان دهد و با استفاده از این تابع می‌توان دوره بازگشت رویدادهای خشکسالی را تعیین کرد (۴۱). توابع کاپولا ابتدا توسط اسکالر (۳۵) معرفی گردید. سپس کاربرد توابع کاپولا در هیدرولوژی توسط دی‌میچله و همکاران (۹) با مدل‌سازی همبستگی متغیرهای شدت و مدت بارش مطرح شد. بعد از آن استفاده از این توابع در هیدرولوژی توسط فاور و همکاران (۱۳) ادامه داده شد، به طوری که از کاپولا در مدل‌سازی متغیرهای هیدرولوژیک دو حوضه آبخیز در کانادا استفاده کردند. آن‌ها بیان نمودند که همبستگی بین متغیرهای موجود در مباحث هیدرولوژی را می‌توان با استفاده از این روش مدل‌سازی کرد و نتایج بهتری نسبت به روش‌های پیش‌بینی یک متغیره داشت. پس از آن توابع کاپولا در تحلیل برخی از پدیده‌ها، نظیر سیلاب (۱، ۸، ۷، ۱۴ و ۱۰)، بارش (۴۲، ۱۸ و ۴۳)، رسوب و رواناب (۴۵) مورد بررسی قرار گرفت. شیانو (۳۳) برای اولین بار از توابع کاپولا برای تحلیل خشکسالی کمک گرفت. ایشان توابع کاپولا را بر متغیرهای مدت و سختی خشکسالی برازش داد و دوره بازگشت‌های توأم این متغیرها را به دست آورد. پس از آن پژوهش‌های متعددی بر تحلیل خشکسالی با رویکرد کاپولا انجام شد (۴۴، ۲۵، ۲۲، ۳۰، ۱۹ و ۴۰).

هر پدیده خشکسالی، با سه مشخصه سختی، مدت و فراوانی وقوع شناخته می‌شود. در ارتباط با تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مقایسه شرایط اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از سناریوهای تغییر اقلیم مطالعات مختلفی در مقیاس‌های جهانی، قاره-ای یا منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی انجام شده است. وو و همکاران (۳۹) با استفاده از داده‌های بارندگی ماهانه، به ارزیابی شاخص‌های بارش استاندارد شده Z^2 (SPI)، Z چینی^۲ و عدد Z^4 در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، برای اقلیم‌های خشک و مرطوب کشور چین پرداختند. این پژوهشگران

نتیجه گرفتند که هر سه شاخص، نتایج یکسانی را برای همه مقیاس‌های زمانی به همراه داشته، ولی محاسبات مربوط به شاخص‌های CZI و عدد Z، آسان‌تر از شاخص SPI بوده است. سرینالدی و همکاران (۳۲) از توابع کاپولا در تحلیل احتمالاتی خصوصیات خشکسالی‌های جزیره‌ای درایتالیا بین سال‌های ۱۹۲۱ و ۲۰۰۳ استفاده کردند. آن‌ها یک مدل مبتنی بر کاپولا چهار بعدی از چندین مشخصه با نام طول خشکسالی، میانگین و حداقل مقادیر SPI و میانگین وسعت منطقه‌ای خشکسالی ارائه نمودند. لیو و همکاران (۲۱) با استفاده از داده‌های ۱۲۷ ایستگاه باران‌سنجی در چین، وضعیت خشکسالی را بررسی کردند. ابتدا در هر یک از ایستگاه‌ها متغیرهای سختی و مدت خشکسالی را استخراج کردند. سپس به ازای دوره بازگشت‌های یکسان، سختی و مدت خشکسالی ایستگاه‌ها را با هم مقایسه کردند. در نهایت مناطقی که دارای سختی و مدت خشکسالی بیش‌تری بودند را به عنوان مناطق با ریسک خشکسالی بیش‌تر معرفی کردند. وانگ و همکاران (۳۸) بررسی همبستگی عرضی بین خشکسالی هواشناختی و خشکسالی هیدرولوژیکی را مورد توجه قرار دادند. آن‌ها ابتدا متغیرهای مدت و کمبود خشکسالی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک را برای چند منطقه از اروپا با اقلیم‌های متفاوت استخراج کردند. سپس روابط احتمالاتی بین خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیک متعاقب را به وسیله توابع کاپولا به نمایش گذاشتند. هالواتورا و همکاران (۱۵) به منظور ترسیم منحنی‌های SDF خشکسالی در شرق استرالیا، از سه شاخص SPI، RDI و SPEI با رویکرد تابع کاپولا استفاده کردند. نتایج به دست آمده نشان داد فراوانی وقوع رویدادهای شدید و طولانی مدت در مناطق خشک بیش‌تر از مناطق معتدل می‌باشد. آزام و همکاران (۳) به شبیه‌سازی تصادفی منطقه‌ای بر پایه کاپولا جهت ارزیابی ریسک خشکسالی در کره جنوبی با شاخص SPI پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مناطق ساحلی در خطر خشکسالی‌های شدید و مناطق میانی و شمالی با خشکسالی خفیف‌تر روبرو می‌باشند. در ایران نیز پژوهش‌های چندی با استفاده از توابع کاپولا انجام شده است. فرخ‌نیا و مرید (۱۲) برای تحلیل خصوصیات احتمالاتی خشکسالی در ایستگاه مهرآباد تهران، احتمال وقوع و دوره بازگشت دو متغیره خشکسالی بر مبنای شاخص‌های SPI و خشکسالی مؤثر^۵ (EDI) را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها توزیع حاشیه‌ای مدت خشکسالی را نمایی و توزیع حاشیه‌ای شدت خشکسالی را گاما در نظر گرفتند. پس از بررسی انواع مختلف کاپولاها، مناسب‌ترین کاپولا بر اساس بیش‌ترین مقدار تابع حداکثر درست‌نمایی را انتخاب کردند. بر این اساس مناسب‌ترین تابع کاپولا برای شاخص-های SPI و EDI به ترتیب کاپولا‌های جوئی و فرانک انتخاب شدند.

- 1- Copula
- 2- Standardized Precipitation Index
- 3- China Z Index
- 4- Z-score

SPI در شرایط تغییر اقلیم. ۳- محاسبه مقادیر سختی و مدت خشکسالی در دوره‌های پایه و آتی. ۴- برآزش تابع کاپولا بر متغیرهای سختی و مدت خشکسالی. ۵- استخراج منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی (SDF) و تحلیل آن‌ها.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

استان فارس با مساحت ۱۲۲۶۰۸ کیلومتر مربع در جنوب ایران و بین طول‌های جغرافیایی ۵۰°۳۶' تا ۳۵°۵۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۷°۰۳' و ۳۱°۴۰' شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). استان فارس از شمال به استان اصفهان، از جنوب به استان هرمزگان، از شرق به استان کرمان و یزد و از غرب به استان کهگیلویه و بویراحمد محدود می‌شود.

به منظور دستیابی به اهداف این پژوهش، از بین ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در استان فارس تعداد ۶ ایستگاه که واجد آمار طولانی مدت‌تری (حداقل ۱۵ ساله) نسبت به سایر ایستگاه‌ها بودند انتخاب شدند. داده‌های بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد و اقلیم آن‌ها بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش یافته تعیین گردید (۲۰). این استان به دلیل تفاوت در ارتفاعات، دارای طبقات اقلیمی مختلفی از خشک سردسیر تا خشک گرمسیر می‌باشد (جدول ۱).

روش‌ها

ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها

در پژوهش حاضر به منظور برآورد داده‌های بارش آینده از مدل بزرگ‌مقیاس گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 و از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های خروجی استفاده شد. مدل CanESM2 یک مدل جامع و چهارمین نسل از مدل‌های گردش عمومی جفت شده (CGCM4)^۷ است و جزء و گزارش پنجم (AR5)^۸ هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۹ می‌باشد (۲). این مدل شامل یک سناریوی کاهشی سخت‌گیرانه (RCP2.6)، سناریوی حدواسط (RCP4.5) و یک سناریو بدبینانه (RCP8.5) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند که اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۸/۵، ۴/۵ و ۲/۶ وات

میراکبری و همکاران (۲۶) برای مشاهده اثرات مکانی خشکسالی، تحلیل منطقه‌ای خشکسالی را انجام داد. آن‌ها ابتدا متغیرهای مدت و سختی را برای ۴۱ ایستگاه واقع در استان خوزستان استخراج کردند. سپس با به کارگیری این متغیرها و استفاده از روش L-moments، مناطق همگن را شناسایی کردند. در نهایت توزیع توأم متغیرهای سختی و مدت را برای هر منطقه همگن با استفاده از توابع کاپولا ارائه کردند. عزیزآبادی و همکاران (۴) به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم^۱ بر منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی^۲ (SDF) خشکسالی حوضه قره‌سو با استفاده از توابع کاپولا در دوره آتی پرداختند. براساس نتایج آن‌ها متغیرهای بارش و دمای ماهانه در حوضه، عموماً در دوره آینده تحت سناریوهای مختلف به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. پیرنیا و همکاران (۲۹) به ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوضه آبخیز تمر در استان گلستان با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI^۳ تحت شرایط اقلیمی حال و آینده پرداختند. با ارائه مدل‌های گزارش پنجم و معرفی سناریوهای جدید RCP کاربرد این سناریوها مورد توجه قرار گرفت. از آنجا که مدل CanESM2^۴ یکی از معدود مدل‌هایی است که در کشور ایران دقت مناسبی دارد و قابلیت ریزمقیاس‌نمایی با مدل SDSM^۵ را دارا می‌باشد، در این مطالعه از خروجی‌های این مدل بزرگ مقیاس تحت سناریوهای مختلف RCP استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که عملکرد مدل SDSM برای پیش‌بینی داده‌های دما و بارش بسیار خوب و خروجی‌های آن نشان از افزایش دما و بارش نسبت به زمان حال است. همچنین نتایج دو شاخص مذکور نشان داد که در هر دو دوره پایه و آتی بیش‌تر خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دو دوره رخ داده است با این تفاوت که SPEI، شرایط خشکسالی شدیدتری را نسبت به SPI نشان داد. جمع‌بندی پیشینه تحقیقات نشان داد که تحلیل تک‌متغیره خشکسالی به دلیل عدم در نظر گرفتن تأثیر هم‌زمان متغیرهای همبسته دیگر، ناکارآمد بوده و از طرفی ضعف توزیع‌های دو متغیره متداول در استفاده از توزیع آماری یکسان برای دو متغیر مورد نظر، باعث شده است تا استفاده از توابع کاپولا برای ساخت توابع توزیع احتمالاتی چند متغیره راهکاری برای رفع این مشکلات باشد. بنابراین اهداف این پژوهش عبارتند از: ۱- شبیه‌سازی مقادیر بارش با مدل CanESM2 بر مبنای سناریوهای حدواسط (RCP4.5)^۶ و بدبینانه (RCP8.5). ۲- بررسی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص

1- Climate Change

2- Severity-Duration-Frequency

3- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

4- Second generation Canadian Earth System model

5- Statistical Downscaling Model

6- Representative Concentration pathway

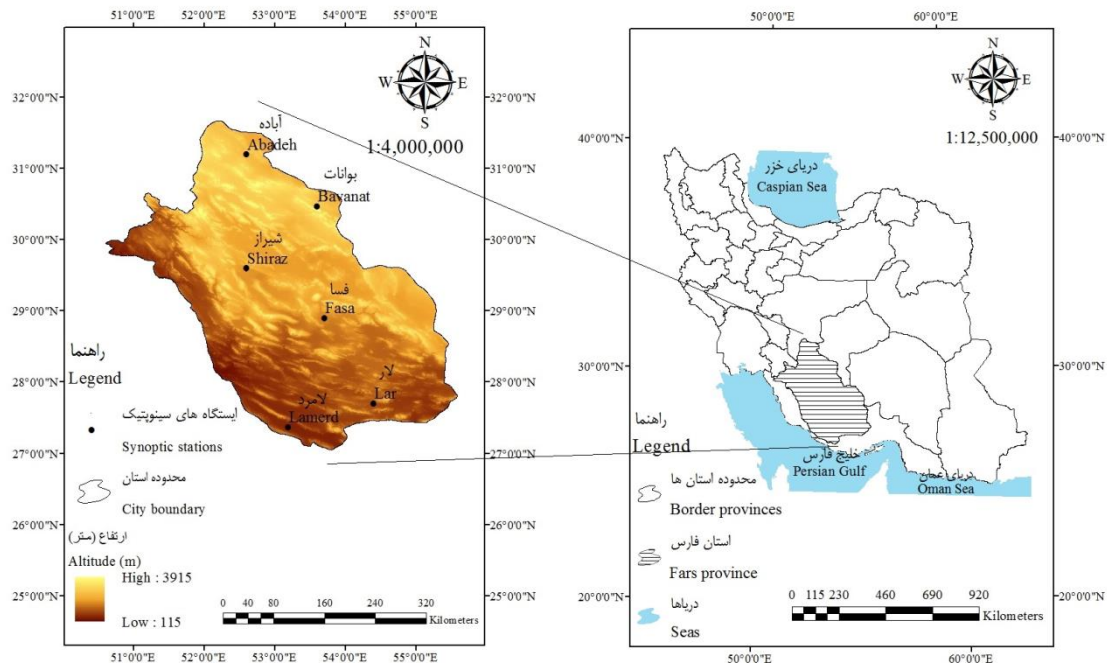
7- Fourth-generation Coupled Global Climate Model

8- Fifth Assessment Report

9- Intergovernmental Panel on Climate Change

مدل و تولید داده‌های سناریوهای آتی (۳۷). برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل SDSM در مرحله صحت‌سنجی، ۲۰ سری داده روزانه تولید شد. از بین آن‌ها سری‌ای انتخاب شد که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشت.

بر متر مربع ($W.m^2$) تخمین زده‌اند (۱۷). مدل SDSM یکی از ابزارهای ریزمقیاس نمایی آماری می‌باشد که توسط ویلی و داوسون (۳۶) برای ارزیابی اثرات محلی تغییر اقلیم توسعه داده شد. عملکرد و ساختار مدل SDSM در چهار مرحله خلاصه می‌شود: انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده به نام متغیر مستقل، واسنجی مدل، ارزیابی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مطالعاتی بر گستره ایران
Figure 1- The study area and location of the stations on Iran map

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در استان فارس

Table 1- The geographic characteristics and precipitation in the study synoptic stations in Fars province

ایستگاه Station	طول جغرافیایی (شرقی) Longitude (E)	عرض جغرافیایی (شمالی) Latitude (N)	ارتفاع (متر) Altitude (m)	دوره آماری (سال) Period (Year)	میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) Average annual precipitation (mm)	نوع اقلیم Climate type
آبادیه (Abadeh)	52°61'	31°20'	2030	1986-2018	130.4	خشک سردسیر Arid Cold
بوانات (Bavanat)	53°61'	30°48'	1365	2004-2018	168.2	خشک سردسیر Arid Cold
شیراز (Shiraz)	52°60'	29°56'	1484	1986-2018	318.8	نیمه‌خشک معتدل Semi-arid Moderate
فسا (Fasa)	53°72'	28°90'	1353	1986-2018	279.7	خشک معتدل Arid Moderate
لار (Lar)	54°37'	27°67'	792	1990-2018	201.9	خشک معتدل Arid Moderate
لامرد (Lamerd)	53°18'	27°37'	405	1995-2018	198.3	خشک گرمسیر Arid Warm

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

اساس این نمایه بر محاسبه احتمال وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است که توسط مک‌کی و همکاران (۲۳) به منظور پایش و تعیین خشکسالی‌ها ارائه شد. محاسبه شاخص SPI در هریک از مقیاس‌های زمانی را می‌توان از مزیت‌های این شاخص و عدم تأثیر گرمایش جهانی بر خشکسالی، طول دوره ثبت داده‌های بارش و همچنین ماهیت توزیع‌های احتمالاتی را از جمله محدودیت‌های این شاخص به شمار آورد (۲۴). به منظور محاسبه این شاخص ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و سری‌های زمانی آن‌ها تشکیل می‌گردد. سپس میانگین و انحراف معیار سری‌های زمانی مورد نظر محاسبه شده و مقادیر شاخص SPI تعیین می‌شوند. شدت هر خشکسالی به صورت جمع مقادیر شاخص مورد نظر، از زمانی که شاخص به زیر حد آغاز خشکسالی رسیده باشد تا زمانی که به حد پایان آن برسد تعریف می‌گردد و مدتی که این حالت ادامه دارد مدت مربوط به آن خشکسالی می‌باشد. حد شروع و پایان خشکسالی برای شاخص SPI به ترتیب مقادیر -0.99 و 0 صفر می‌باشد.

کاربرد تابع کاپولا در تحلیل زمانی

کلمه کاپولا واژه‌ای لاتین به معنی اتصال و گره می‌باشد که برای اولین بار در ریاضیات و آمار توسط اسکالر (۳۵) به کار گرفته شد. از یک نقطه نظر، کاپولاها توابی می‌باشند که توابع توزیع چند متغیره را به توابع توزیع حاشیه‌ایشان متصل می‌کنند و از طرف دیگر، کاپولاها نوعی از توابع توزیع چند متغیره هستند که حاشیه‌های تک‌بعدی‌شان بر بازه $(0, 1)$ یکنواخت می‌باشد (۲۷). تابع توزیع احتمال دو متغیره به صورت معادله (۱) به دست می‌آید.

$$F_{D,S}(d, s) = C(F_D(d), F_S(s)) = C(u, v) \quad (1)$$

که در آن C یک تابع کاپولا و $F_D(d)$ و $F_S(s)$ توابع توزیع حاشیه‌ای هستند. برای انجام تحلیل فراوانی ابتدا باید یک تابع توزیع احتمال مناسب بر متغیرها برازش داده شود. در این پژوهش از تابع توزیع نرمال و لوگ‌نرمال به ترتیب جهت برازش بر مؤلفه‌های سختی و مدت خشکسالی و همچنین از تابع کاپولا دومتغیره ارشمیدسی گامبل جهت محاسبه دوره بازگشت‌های شرطی استفاده شد. شیائو و مدرس (۳۴) برای تعیین روابط SDF خشکسالی، دوره بازگشت شرطی $T_{SD}(s|d)$ را تعریف کردند که از معادله‌های (۲) و (۳) به دست می‌آید.

$$T_{SD}(s|d) = \frac{1}{g \{1 - F_{SD}(s|d)\}} = \frac{1}{g \{1 - C_{F_D|F_S}(F_S(s)|F_D(d))\}} \quad (2)$$

$$C_{F_D|F_S}(F_S(s)|F_D(d)) = \frac{C(F_S(s), F_D(d))}{F_D(d)} \quad (3)$$

که در آن $F_S(s)|F_D(d)$ تابع کاپولا شرطی می‌باشد و نشان‌دهنده میزان احتمال توأم وقوع خشکسالی با مقدار سختی s به

ازای مدت خشکسالی برابر یا کم‌تر از مقدار d می‌باشد. $T_{SD}(s|d)$ برابر است با دوره بازگشت رویداد خشکسالی با مقدار سختی معین برای زمانی که مدت خشکسالی از حد آستانه d کم‌تر یا برابر باشد. γ نرخ بازگشت خشکسالی می‌باشد (۳۴). برای رسم منحنی‌های SDF ابتدا تابع کاپولا شرطی بر طبق معادله (۳) محاسبه می‌شود. در معادله (۲)، مقادیر $1/25$ ، 2 ، 5 ، 10 ، 20 ، 50 ، 100 ، 200 و 500 سال برای $T_{SD}(s|d)$ و مقادیر معین مدت خشکسالی در بازه زمانی معینی از اعداد طبیعی در نظر گرفته می‌شود و مقادیر γ نیز محاسبه می‌شود. در نهایت با تعدادی معادله غیرخطی تک‌متغیره روبرو هستیم که در آن تابع توزیع سختی خشکسالی مجهول می‌باشد. پس از حل معادلات مذکور در محیط برنامه نویسی R، مقدار احتمال تجمعی مدت معین به دست می‌آید. سپس توزیع معکوس تابع توزیع حاشیه‌ای مربوط به سختی خشکسالی را بر مقادیر $F_S(s)$ برازش می‌دهیم و مقادیر سختی به ازای دوره بازگشت و مدت معین خشکسالی به دست می‌آیند و با داشتن سختی و مدت‌های مختلف به ازای دوره بازگشت معین می‌توان منحنی‌های SDF را رسم کرد.

نتایج و بحث

واسنجی خروجی‌های مدل بزرگ‌مقیاس جوی با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از پیشگوهای منتخب مربوطه انجام گرفت. متغیرهای پیشگوی منتخب در ایستگاه آباده شامل سرعت نصف النهاری در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-V$)، و اگرایی در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-ZH$) و رطوبت ویژه سطحی ($SHUM$)، در ایستگاه بوانات شامل قدرت جریان هوا در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-F$)، قدرت جریان هوا در ارتفاع 850 میلی‌بار ($P8-F$) و رطوبت ویژه سطحی ($SHUM$)، در ایستگاه فسا ژئوپتانسیل در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P500$)، و اگرایی در ارتفاع 850 میلی‌بار ($P8-ZH$)، بارش ($PREC$) و رطوبت ویژه سطحی ($SHUM$)، در ایستگاه لامرد شامل سرعت مداری سطحی ($P-U$)، و اگرایی در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-ZH$) و رطوبت ویژه سطحی ($SHUM$)، در ایستگاه لار شامل قدرت جریان هوا در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-F$)، سرعت مداری در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P5-U$)، بارش ($PREC$) و رطوبت ویژه سطحی ($SHUM$) و در ایستگاه شیراز شامل فشار سطح صفر ($MSLP$) و ژئوپتانسیل در ارتفاع 500 میلی‌بار ($P500$) هستند. انتخاب بهترین دوره واسنجی هر ایستگاه با سعی و خطا و استفاده از معیارهای R^2 و SE انجام گرفت. دوره $1986-2001$ و $2002-2017$ به ترتیب برای واسنجی و صحت سنجی متغیر بارش ایستگاه شیراز در مدل SDSM مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بالاترین همبستگی در مرحله واسنجی و شبیه‌سازی دوره پایه در مرحله صحت سنجی مربوط به ایستگاه شیراز می‌باشد (جداول ۲ و ۳).

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل SDSM در مرحله واسنجی

Table 2- The results of the SDSM model evaluation at the calibration period

ایستگاه Station	دوره واسنجی Calibration Period	R ²	SE
آباده (Abadeh)	1986-2001	0.28	0.47
بوانات (Bavanat)	1986-2010	0.32	0.36
شیراز (Shiraz)	1986-2001	0.37	0.39
فسا (Fasa)	1986-2001	0.29	0.34
لار (Lar)	1986-2003	0.31	0.35
لامرد (Lamerd)	1986-2006	0.26	0.33

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل SDSM در مرحله صحت سنجی

Table 3- The results of the SDSM model evaluation at the validation period

ایستگاه Station	دوره صحت سنجی Validation period	R ²	RMSE	MAE	NSE
آباده (Abadeh)	2002-2017	0.87*	0.22	0.14	0.81
بوانات (Bavanat)	2011-2017	0.71*	0.21	0.16	0.87
شیراز (Shiraz)	2002-2017	0.93*	0.31	0.17	0.95
فسا (Fasa)	2002-2017	0.44**	0.60	0.43	0.70
لار (Lar)	2004-2017	0.69*	0.27	0.22	0.80
لامرد (Lamerd)	2007-2017	0.80*	0.24	0.17	0.89

آماره‌های معنی‌دار در سطح احتمال ۹۰ و ۹۵ درصد در آزمون تجزیه واریانس به ترتیب به وسیله‌ی علائم * و ** نشان داده شده‌اند.

مقایسه بارش محاسباتی و مشاهداتی نشان داد که مقادیر میانگین بارش برای ایستگاه لامرد بیش برآورد، برای ایستگاه آباده، لار، شیراز و فسا کم برآورد و برای ایستگاه بوانات بدون تغییر بوده (شکل ۳). بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف مقادیر محاسباتی و مشاهداتی بارش در منطقه مطالعاتی مربوط به ایستگاه‌های لامرد و بوانات به ترتیب به مقدار ۰/۱۹ و ۰/۰۱ میلی‌متر در مقیاس روزانه می‌باشد (شکل ۳).

داده‌های بارش برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲۰-۲۰۵۰ تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 تولید می‌شوند. نتایج نشان داد که به طور میانگین در استان فارس، افزایش و کاهش بارش تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲/۸ و ۶/۵ درصد خواهد بود (شکل ۴). به طور کلی بیش‌ترین اختلاف بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه مربوط به ماه‌های سرد سال می‌باشد. کم‌ترین و بیش

به طور کلی بیش‌ترین و کم‌ترین اختلاف در مقادیر محاسباتی (مقادیر پیشگویی شده بارش آتی) و مشاهداتی به ترتیب مربوط به ایستگاه لامرد و بوانات می‌باشد. مقادیر محاسباتی متغیر بارش در دوره صحت‌سنجی در ایستگاه‌های بوانات، لار و شیراز بیشتر از مقادیر مشاهداتی و در ایستگاه‌های آباده، فسا و لامرد کمتر از مقادیر مشاهداتی برآورد شده است (شکل ۲).

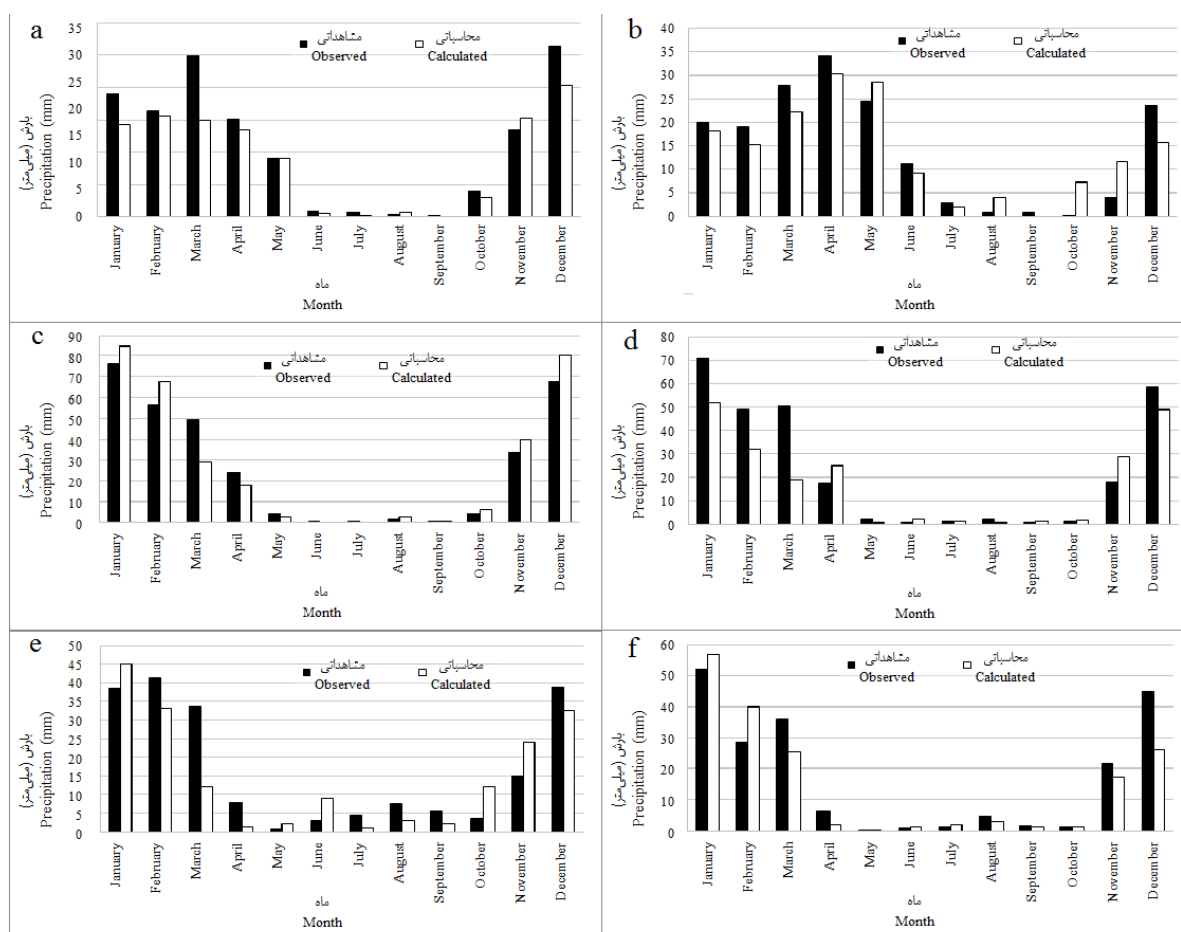
نقشه پهنه‌بندی بارش محاسباتی و مشاهداتی در دوره ۲۰۱۷-۲۰۲۲ با استفاده از نرم‌افزار GIS, ver. 10.3.1^۱ و با روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW)^۲ برای ایستگاه‌های منتخب رسم گردید.

1- Geographical information system

2- Inverse Distance Weighted

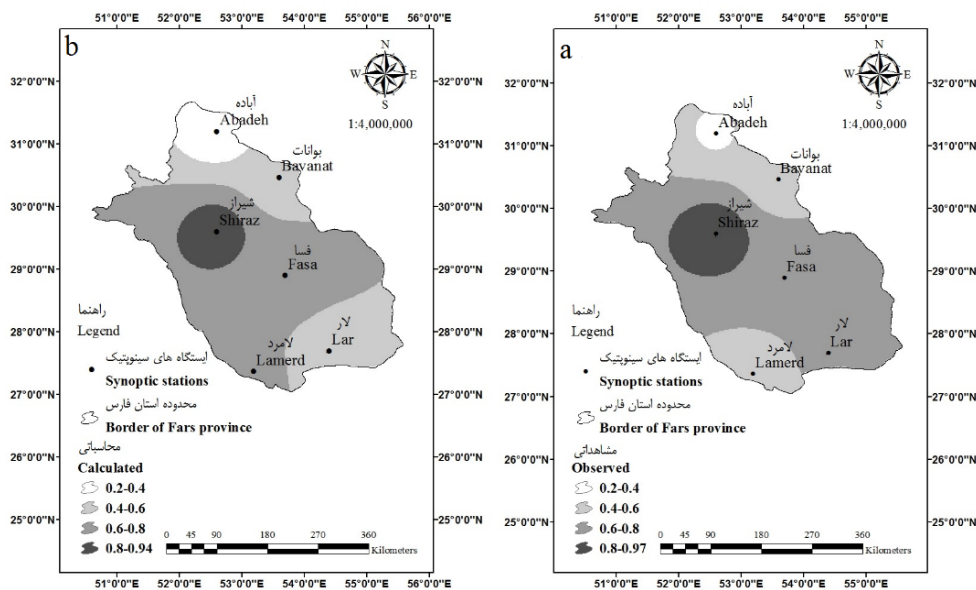
نیمه ابتدایی دوره‌های پایه و آتی رخ داده است. به طور کلی شهر شیراز در دوره تاریخی (۲۰۰۷-۲۰۱۸) و دوره آتی (۲۰۳۵-۲۰۵۰) دچار افزایش فراوانی و مدت دوره‌های خشک شده است. بیش‌ترین تداوم دوره خشک و مرطوب به ترتیب در دوره ۲۰۳۹-۲۰۴۴ مربوط به سناریو RCP4.5 و دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۷ مربوط به سناریو RCP8.5 بود. به طور میانگین برای استان فارس در دوره آتی انتظار افزایش فراوانی خشکسالی‌ها به خصوص در دوره (۲۰۳۴-۲۰۵۰) می‌رود که با افزایش مدت دوره‌های خشک همراه است. این افزایش‌ها در سناریو RCP8.5 دارای شدت به نسبت بالاتری است. البته نتایج برای بعضی از ایستگاه‌ها کمی متفاوت است به طور کلی در بازه زمانی مختلف تعداد خشکسالی‌های اتفاق افتاده بیش‌تر در دوره آتی رخ داده است که فراوانی آن در سناریو RCP8.5 بیشتر از سناریو RCP4.5 بوده (شکل‌های ۶ تا ۸).

ترین میزان متوسط بارش ماهانه در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب متعلق به ایستگاه آباده به مقدار ۱۰/۹، ۱۱ و ۹/۱ میلی‌متر و ایستگاه شیراز به مقدار ۲۶/۶، ۲۵/۹ و ۲۵/۵ میلی‌متر می‌باشد. در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 در ایستگاه‌های بوانات، فسا و لار افزایش بارش و در ایستگاه‌های آباده، شیراز و لامرد کاهش بارش انتظار می‌رود، در حالی که در سناریو RCP8.5 در تمامی ایستگاه‌ها کاهش بارش انتظار می‌رود (شکل ۵). جهت استخراج شاخص SPI، آمار مجموع بارش ماهانه شش ایستگاه منتخب استان فارس به عنوان ورودی مدل استفاده شد. مقادیر و سری زمانی شاخص مذکور در مقیاس سه ماهه، شش ماهه، دوازده ماهه و بیست و چهار ماهه توسط برنامه نویسی R به دست آمد. بررسی مقادیر شاخص SPI به‌دست آمده برای ایستگاه شیراز نشان داد، بیش‌ترین خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و

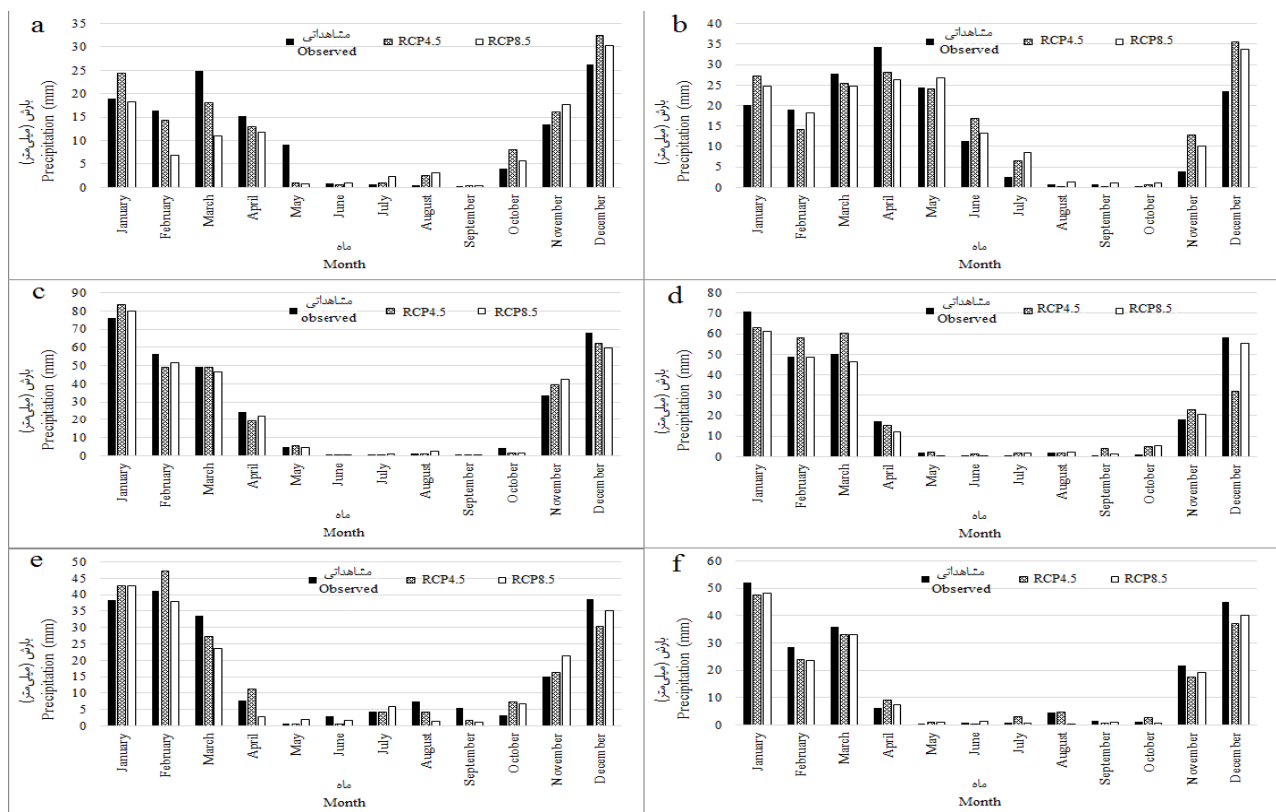


شکل ۲- مقایسه داده‌های محاسباتی و مشاهداتی میانگین بارش در دوره صحت سنجی در ایستگاه (a) آباده، (b) بوانات، (c) شیراز، (d) فسا، (e) لار و (f) لامرد

Figure 2- The comparison of observed and calculated average precipitation in the validation period at the a) Abadeh, b) Bavanat, c) Shiraz, d) Fasa, e) Lar and f) Lamerd station

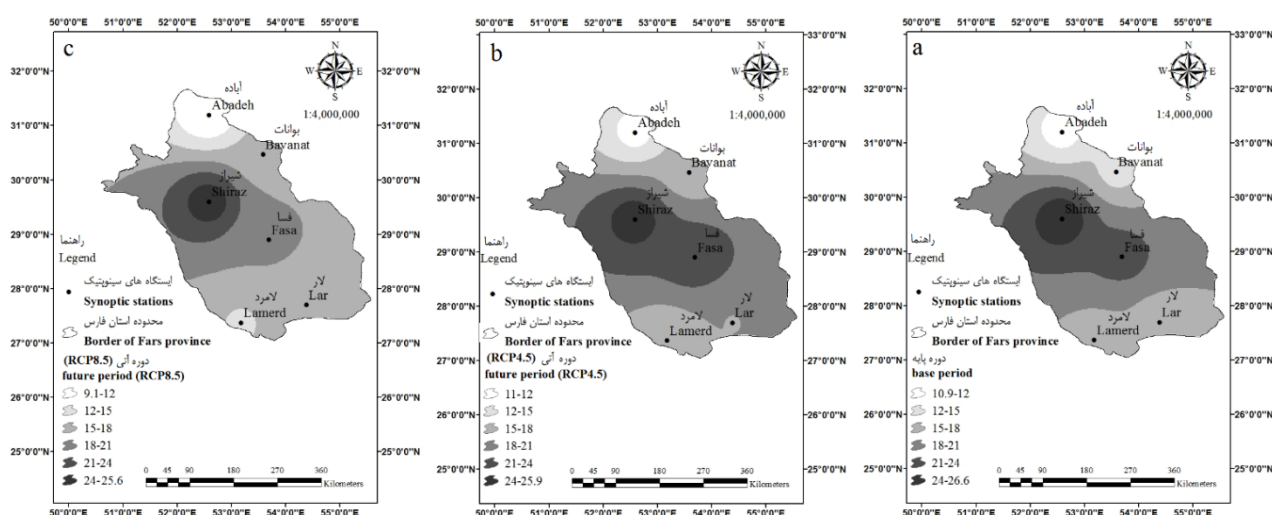


شکل ۳- پهنه‌بندی مقادیر بارش بر اساس داده‌های (a) مشاهداتی و (b) محاسباتی در استان فارس
Figure 3- Zoning precipitation values based on the a) observed data and b) calculated data at Fars province



شکل ۴- مقایسه میانگین ماهانه بارش در دوره‌های پایه و آتی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در ایستگاه (a) آبدیه، (b) بوانات، (c) شیراز، (d) فسا، (e) لار و (f) لامرد

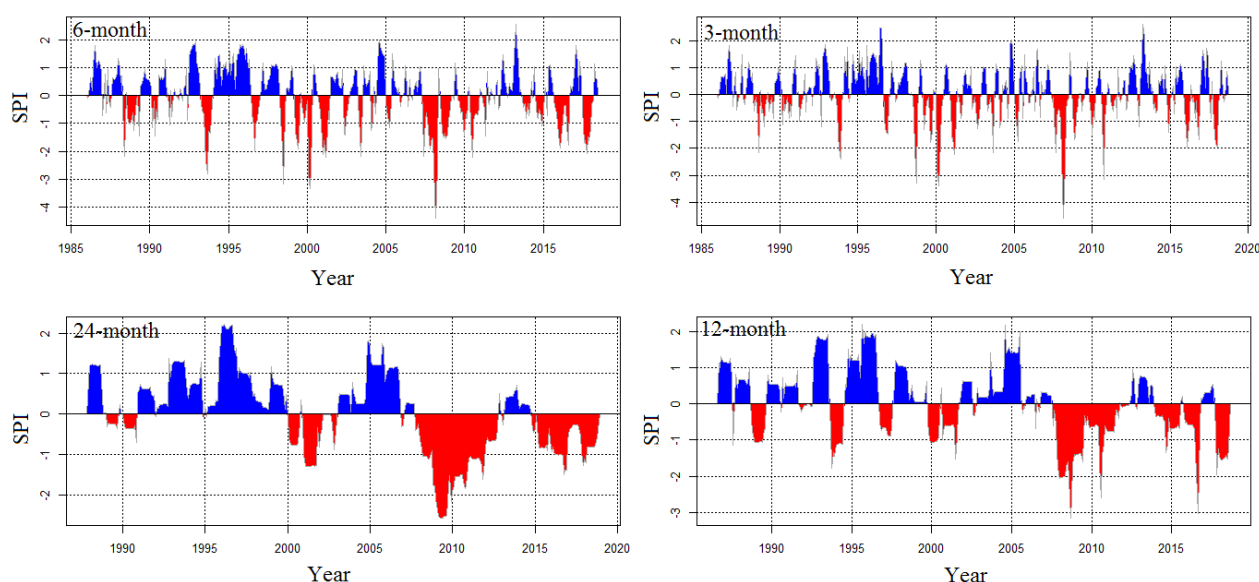
Figure 4- The comparison of average monthly precipitation in the base and future period under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios at the a) Abadeh, b) Bavanat, c) Shiraz, d) Fasa, e) Lar and f) Lamerd station



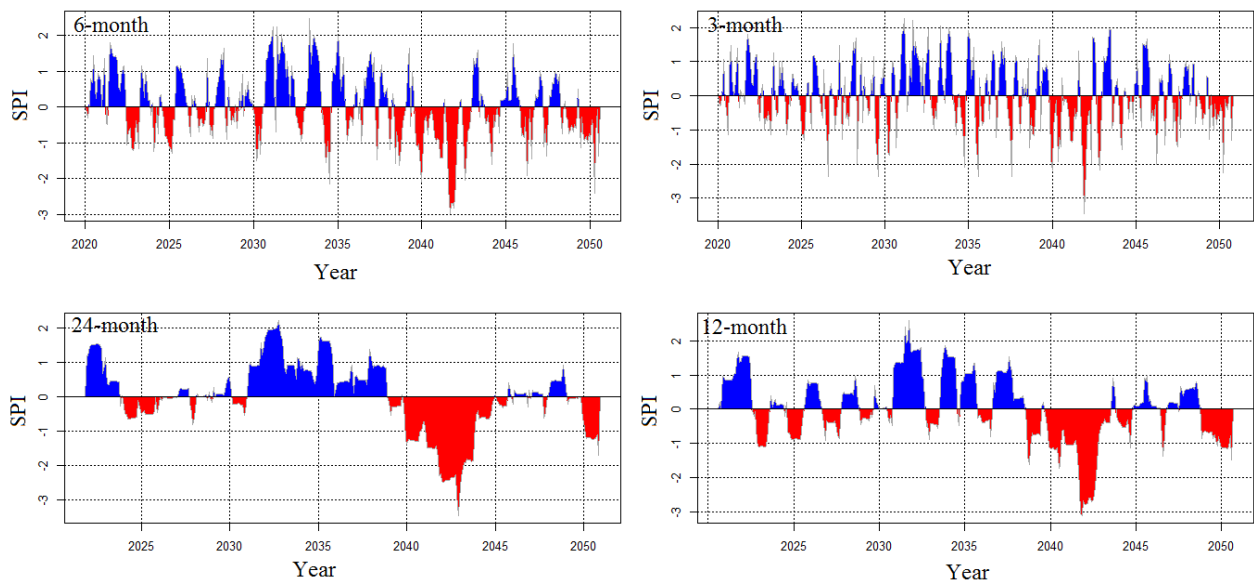
شکل ۵- پهنه‌بندی مقادیر بارش ماهانه در دوره‌های (a) پایه و آتی تحت سناریو (b) RCP4.5 و (c) RCP8.5 در ایستگاه‌های مطالعاتی
Figure 5- Zoning monthly precipitation in the a) base period b) future period under RCP4.5 and c) RCP8.5 scenarios at the study stations

ثابت می‌رسد (شکل ۹). به عبارت دیگر در تداوم‌های کوتاه، با تغییر مقدار سختی و مدت، دوره بازگشت تغییرات زیادی دارد و با افزایش تداوم از تغییرپذیری آن کاسته می‌شود. همچنین برای هر تداوم معین خشکسالی، به ازای طولانی‌تر شدن دوره بازگشت، مقادیر سختی افزایش می‌یابد. به طور کلی در رویدادهای کمتر از ۱۱ ماه دوره بازگشت‌ها برای دوره پایه و آتی ثابت است.

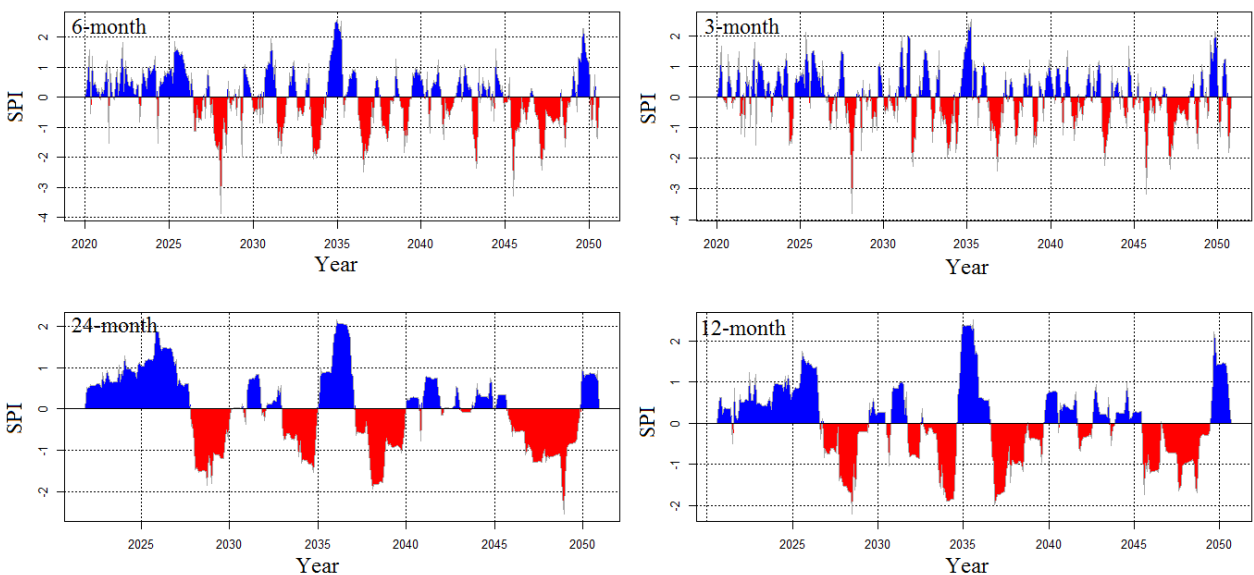
برازش تابع کاپولا و استخراج منحنی‌های SDF
منحنی‌های SDF خشکسالی بر مبنای تابع کاپولا گامبل با دوره بازگشت‌های ۱/۲۵، ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ سال در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 با استفاده از برنامه‌نویسی R رسم گردیدند. محذب بودن الگوی منحنی‌های SDF نشان‌گر افزایش سرعت سختی خشکسالی در تداوم‌های کوتاه، نسبت به تداوم‌های طولانی است، که در نهایت به یک مقدار



شکل ۶- سری زمانی SPI در دوره پایه برای ایستگاه شیراز
Figure 6- The SPI time series in the base period at Shiraz station



شکل ۷- سری زمانی شاخص SPI در دوره آتی تحت سناریو RCP4.5 برای ایستگاه شیراز
Figure 7- The SPI time series in the future period under RCP4.5 scenario at Shiraz station



شکل ۸- سری زمانی شاخص SPI در دوره آتی تحت سناریو RCP8.5 برای ایستگاه شیراز
Figure 8- The SPI time series in the future period under RCP8.5 scenario at Shiraz station

به طور کلی انتظار می‌رود استان فارس دوره آینده در تداوم‌های کمتر از هشت ماه با افزایش سختی خشکسالی نسبت به دوره پایه مواجه شود. در تداوم‌های بالای هشت ماه در هر دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 میزان سختی و دوره بازگشت افزایش می‌یابد. به طور میانگین در استان فارس در یک تداوم با دوره بازگشت ۲۰ سال و مقدار سختی ۳ در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۷، ۶/۵ و ۱۲ ماه به دست آمد (شکل ۹). به طور میانگین با مقایسه نتایج حاصل برای سختی و دوره بازگشت

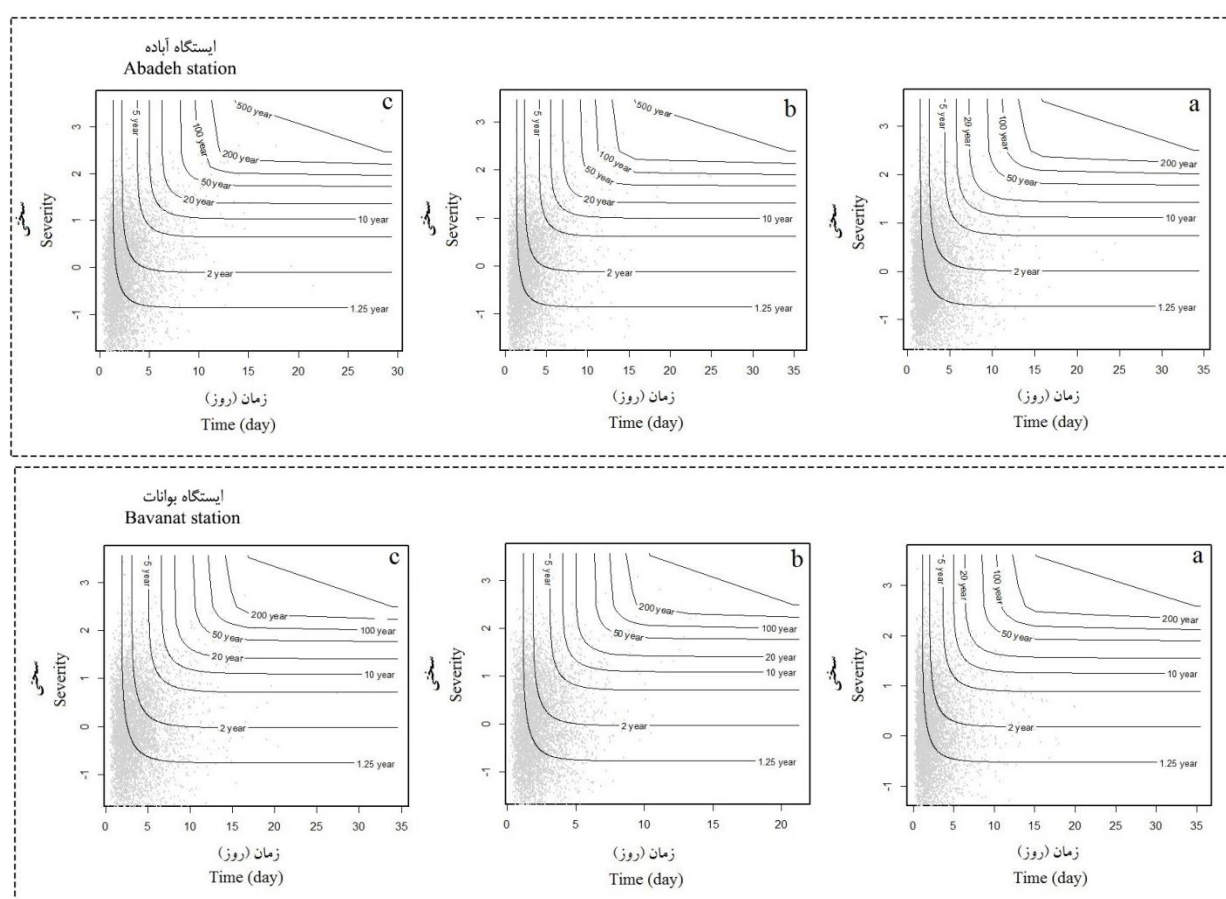
در دوره آتی برای رویدادهای کمتر از ۱۰ ماه و دوره بازگشت معین پنج سال میزان سختی خشکسالی افزایش می‌یابد که این افزایش در سناریو RCP8.5 بیش‌تر است. در حالی که در تداوم‌های بالای ۱۱ ماه سختی به مقدار ناچیزی افزایش پیدا می‌کند و در تداوم‌های بیش از ۱۵ ماه اختلاف دوره بازگشت حال و آینده تقریباً به صفر می‌رسد. در دوره بازگشت‌های ۱/۲۵ تا ۵۰ سال بالاترین میزان تغییرات سختی در دوره‌های پایه و آتی تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲ تا ۱۲/۵ می‌باشد (شکل ۹).

منابع آب در قرن حاضر می‌باشد. بررسی نحوه تغییر شرایط خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشد. زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلند مدت، لازم است که چشم اندازی از وضعیت آینده بارش و دوره‌های خشکسالی و ترسالی برای منطقه ترسیم گردد. در پژوهش حاضر، کارایی توزیع آماری دو متغیره سختی و مدت خشکسالی بر مبنای توابع کاپولا مورد مطالعه قرار گرفت. مزیت استفاده از این توابع، دخالت همبستگی بین سختی و مدت و همچنین امکان استفاده از توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت می‌باشد. مقایسه دوره خشک استخراج شده شاخص SPI برای دوره‌های پایه و آتی نشان داد که به طور کلی در اثر نوسانات اقلیمی انتظار می‌رود که تعداد دوره‌های خشک افزایش یابد.

خشکسالی مشخص گردید که این دو ویژگی خشکسالی در سناریو RCP8.5 به ترتیب بیش‌ترین مقدار افزایش و کاهش را نسبت به دوره پایه داشته است. در حالی که در سناریو RCP4.5 در برخی از ایستگاه‌ها کاهش سختی و افزایش دوره‌بازگشت نسبت به دوره پایه و در مابقی ایستگاه‌ها نتایج مشابه سناریو RCP8.5 به دست آمد، با این تفاوت که شدت تغییرات این دو ویژگی در اکثر ایستگاه‌ها از سناریو RCP4.5 بیشتر بوده. زیرا در سناریو RCP8.5 میزان واداشت تابشی در انتهای قرن بیست و یکم به $8/5$ وات بر متر مربع می‌رسد و بیش‌ترین رشد جمعیت و استفاده از انرژی در این سناریو لحاظ شده است.

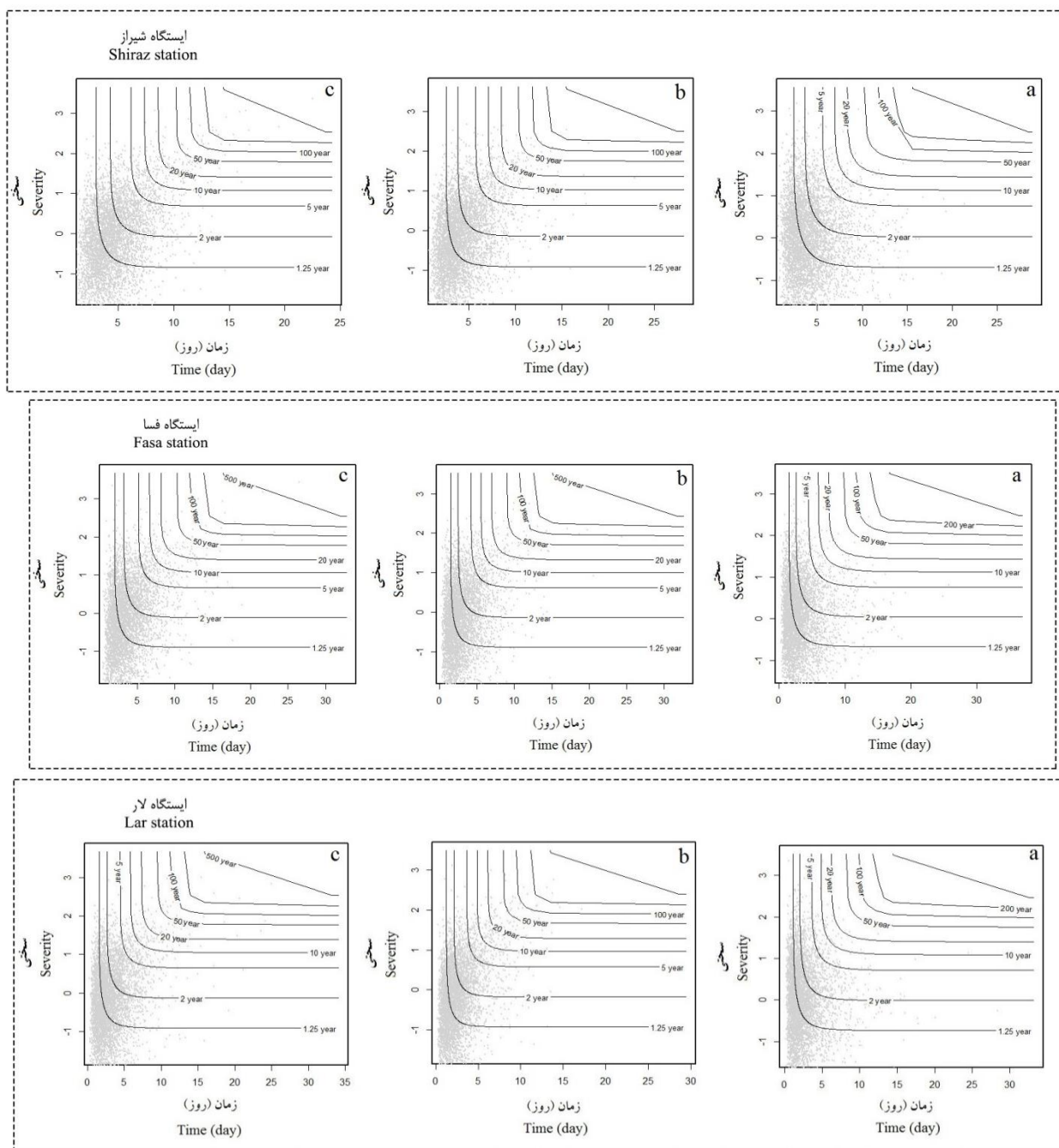
نتیجه‌گیری

پدیده تغییر اقلیم و اثرات آن، یکی از چالش‌های مهم مدیریت



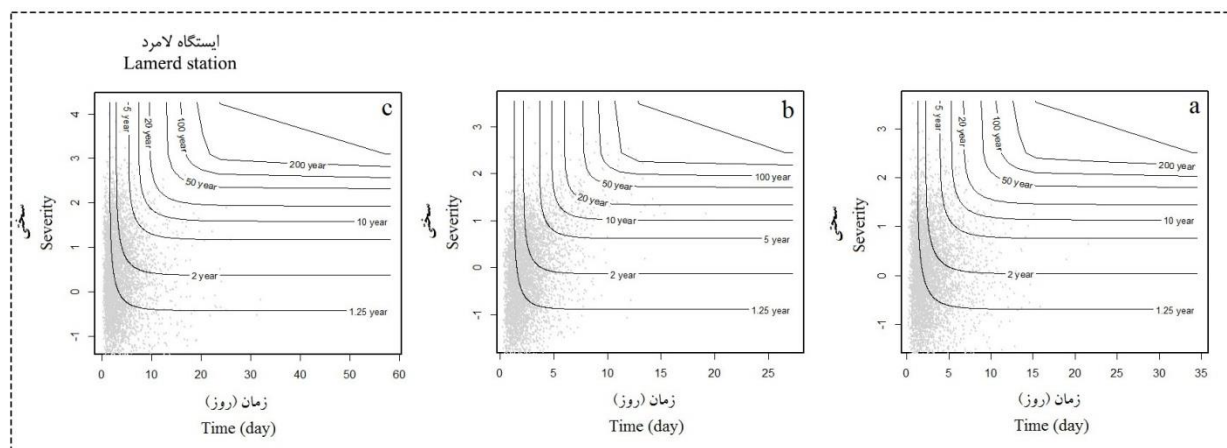
شکل ۹- منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی (SDF) خشکسالی در دوره‌های (a) پایه و آتی تحت سناریو (b) RCP4.5 و (c) RCP8.5 در ایستگاه‌های مطالعاتی

Figure 9- Severity-Duration-Frequency drought curves in the a) base period b) future period under RCP4.5 and c) RCP8.5 scenarios at the study stations



ادامه شکل ۹

Figure 9- Continued



ادامه شکل ۹

Figure 9- Continued

مدل‌سازی این متغیر را در دوره‌های گذشته و آینده در سطح معنی دار ۹۰ و ۹۵ درصد برای استان فارس دارا می‌باشد. انتظار می‌رود که در صورت در نظر گرفتن اصلاحات موجود در گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بتوان به دقت بیشتری در مدل‌سازی بارش دست یافت. لذا پیشنهاد می‌شود تا با در دسترس بودن نتایج حاصل از گزارش ششم استخراج منحنی‌های SDF مورد بازبینی قرار گیرد.

متغیر بارش منطقه عموماً در دوره آینده تحت سناریو سناریو RCP8.5 کاهش می‌یابد. همچنین نتایج مربوط به رسم منحنی‌های SDF نشان داد که مقادیر سختی و دوره بازگشت خشکسالی به ترتیب بیش‌ترین مقدار افزایش و کاهش را در سناریو RCP8.5 داشته است. به طور کلی معیارهای ارزیابی، مقادیر ضریب تبیین بر اساس درجه آزادی مورد استفاده بارش نشان داد که مدل SDSM توانایی

منابع

- 1- Abbasian M.S., and Moosavi S. 2013. Joint analysis of peak discharge and runoff volume using Copula Functions. 7th National Congress on Civil Engineering Sistan and Baluchestan University, 8p. (In Persian)
- 2- Arora V.K., Scinocca J.F., Boer G.J., Christian J.R., Denman K.L., Flato G.M., Kharin V.V., Lee W.G., and Merryfield W.J. 2011. Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases. *Geophysical Research Letters* 38(5): 1-6.
- 3- Azam M., Maeng S.J., Kim H.S., and Murtazaev A. 2018. Copula-Based Stochastic Simulation for Regional Drought Risk Assessment in South Korea. *Water* 10: 359-388.
- 4- Azizabadi M., Bakhtiari B., Qaderi K., and Rezapour M. 2016. The survey of climate change impact on drought severity-duration-frequency curves using Copulas 47(4): 743-754.
- 5- Castellvi F., Mormeneo I., and Perez P.J. 2004. Generation of daily amounts of precipitation from standard climatic data: a case study for Argentina. *Journal of Hydrology* 289: 286-302.
- 6- Chung C.H., and Salas J.D. 2000. Drought occurrence probabilities and risks of dependent hydrologic processes. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE* 5(3): 259-268.
- 7- Chebana F., and Ouarda T.B.M.J. 2009. Index flood-based multivariate regional frequency analysis. *Water Resources Research* 45(10): 1-15.
- 8- Chen L., Singh V.P., Guo S., Hao Z., and Li T. 2012. Flood coincidence risk analysis using multivariate Copula functions. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(6): 742-755.
- 9- De Michele C., and Salvadori G. 2003. A Generalized Pareto intensity-duration model of storm rainfall exploiting 2-copulas. *Journal of Geophysical Research* 108(D2): 40-67.
- 10- De Michele C., Salvadori G., Canossi M., Petaccia A., and Rosso R. 2005. Bivariate statistical approach to check adequacy of dam spillway. *Journal of Hydrologic Engineering* 10(1): 50-57.
- 11- Edwards D.C., and McKee T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report Number 97-2 Department of Atmospheric Science Colorado State University Fort Collins Colorado*, 155.
- 12- Farrokhnia A., and Morid S. 2008. Analysis of drought severity and duration using Copula functions. 4th National Congress on Civil Engineering, 6-8 May. (In Persian with English abstract)
- 13- Favre A.C., El Adlouni S., Perreault L., Thie'monge N., and Bobe'e B. 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using Copulas. *Water Resources Research* 40: 1-12.

- 14- Genest C., Favre A.C., Beliveau J., and Jacques C. 2007. Metaelliptical Copulas and their use in frequency analysis of multivariate hydrological data. *Water Resources Research* 43(9): 1-12.
- 15- Halwatura D, Lechner A.M., and Arnold S. 2015. Drought severity-duration-frequency curves: a foundation for risk assessment and planning tool for ecosystem establishment in post-mining landscapes. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(2): 1069-1091.
- 16- Heim R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83:1149-1165.
- 17- IPCC. 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team R K Pachauri and L A Meyer (eds.)] IPCC Geneva Switzerland, 151.
- 18- Kao S.C., and Govindaraju R.S. 2008. Trivariate statistical analysis of extreme rainfall events via the Plackett family of Copulas. *Water Resources Research* 44(2): 1-11.
- 19- Kao S.C., Govindaraju R.S., and Niyogi D. 2009. A spatio-temporal drought analysis for the midwestern US. *Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 World Environmental and Water Resources Congress 2009 Great Rivers* 342: 4654-4663.
- 20- Khalili A. 1997. Integrated water plan of Iran. Meteorological studies Ministry of power Iran.
- 21- Liu C.L., Zhang Q., Singh V.P., and Cui Y. 2011. Copula-based evaluations of drought variations in Guangdong South China. *Natural Hazards* 59(3): 1533-1546.
- 22- Ma M.W., Song S.b., Ren L.L., Jiang S.H., and Song J.L. 2012. Multivariate drought characteristics using trivariate Gaussian and Student t Copulas. *Hydrological Processes* 27(8): 1175-1190.
- 23- Mackee B., Nolan T., Dooesken J., and Kleist J. 1995. Drought monitoring with multiple timescales 9th Conference on Applied Climatology 15-20. January Boston Massachusetts:223-236 drought indices for drought assessment and monitoring in Greece 8th International Conference on Environmental Science and Technology Lemons Island, 8-10 September:484-491.
- 24- Mishra A., and Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology* 391: 202-216.
- 25- Mirabbasi R., Fakheri-Fard A., and Dinpashoh Y. 2012. Bivariate Drought Frequency Analysis Using the Copula Method. *Theoretical and Applied Climatology* 108(1-2): 191-206.
- 26- Mirakbari M., Ganji A., and Fallah S.R. 2010. Regional Bivariate Frequency Analysis of Meteorological Droughts. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(12): 985-1000.
- 27- Nelsen R.B. 2007. An introduction to Copulas (2thed.). New York Springer.
- 28- Palmer W.C. 1965. Meteorological drought. USWB, Res 45.
- 29- Pirnia A., Golshan M., Bigonah S., and Solaimani K. 2018. Investing the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *EcoHydrologi* 5(1): 215-228.
- 30- Reddy M.J., and Ganguli P. 2011. Application of Copulas for derivation of drought severity-duration- frequency curves. *Hydrological Processes* 26(11): 1672-1685.
- 31- Salas J.D., Fu C., Cancelliere A., Dustin D., Bode D., Pineda A., and Vincent E. 2005. Characterizing the severity and risk of drought in the Poudre River, Colorado. *Journal of Water Resources Planning and Management ASCE* 131(5): 383-393.
- 32- Serinaldi F., Bonaccorso B., Cancelliere A., and Grimaldi S. 2009. Probabilistic characterization of drought properties through Copulas. *Journal of Physics and Chemistry of the Earth* 34: 596-605.
- 33- Shiau J.T. 2006. Fitting drought duration and severity with two-dimensional Copulas. *Water Resources Management* 20: 795-815.
- 34- Shiau J.T., and Modarres R. 2009. Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran. *Meteorological Applications* 16(4): 481-489.
- 35- Sklar A. 1959. Distribution functions of n Dimensions and Margins. *Publications of the Institute of Statistics of the University of Paris* 8: 229-231. (In French)
- 36- Wilby R.L., Dawson C.W., and Barrow E.M. 2002. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modelling Software* 17: 145-157.
- 37- Wilby R.L., Dawson C.W., Murphy C., Connor P.O., and Hawkin E.h. 2014. tati tical own calling Mo l – ci ion ntric (SDSMD) conceptual basis and applications. *Climate Research* 61(3): 251-268.
- 38- Wong G., Van Lanen H.A.J., and Torfs P.J.J.F. 2013. Probabilistic analysis of hydrological drought characteristics using meteorological drought. *Hydrological Sciences Journal* 58(2): 253-270.
- 39- Wu H., Hayes M.J., Weiss A., and Hu Q. 2001. An Evaluation of the standardized precipitation index the china-z index and the statistical z-score. *International Journal of Climatology* 21:745-758.
- 40- Yan B., Guo S., Xiao Y., and Fang B. 2007. Analysis on Drought Characteristics Based on Bivariate Joint Distribution. *Arid Zone Research* 24(4): 537-542. (In Chinese)
- 41- Yusof F., Hui-Mean F., Suhaila J., and Yusof Z. 2013. Characterization of Drought Properties with Bivariate Copula Analysis. *Water Resources Management* 27(12): 4183-4207.

- 42- Zhang L., and Singh V.P. 2007. Bivariate rainfall frequency distributions using Archimedean Copulas. *Journal of Hydrology* 332:93-109.
- 43- Zhang Q., Li J., Singh V.P., and Xu C.Y. 2012. Copula-based spatiotemporal patterns of precipitation extremes in China. *International Journal of Climatology* 35(5): 1140-1152.
- 44- Zhang Q., Xiao M., Singh V.P., and Chen X. 2013. Copula-based risk evaluation of droughts across the Pearl River basin China. *Theoretical and Applied Climatology* 111(1-2): 119-131.
- 45- Zhang J., Ding Z., and You J. 2014. The joint probability distribution of runoff and sediment and its change characteristics with multi-time scales. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 62(3): 218-225.



Meteorological Drought Characteristics Analysis under Climate Change Effect Using Copula in Fars Province

S.M. Farmanara¹- B. Bakhtiari^{2*}- N. Sayari³

Received: 24-07-2019

Accepted: 01-07-2020

Introduction: Drought is an extreme climate effect and a creeping phenomenon which directly affects the human life. A drought analysis usually requires characterizing drought severity, duration and frequency (SDF). These characteristic variables are commonly not independent, so this phenomenon is a complex natural disaster and climate change makes it likely to become more frequent and immense in many areas across the world. Therefore, in drought analysis, it is needed to investigate its multivariate nature and spatial variability clearly. Copula, as a model of multivariate distribution, has been used widely in hydrological studies. As the standardized precipitation index (SPI) is more accessible than other indices, it is the most commonly used indicators for analyzing the SDF of meteorological drought. Here, the study has two major focuses: 1) Fitting drought characteristics from SPI to appropriate copulas, then using fitted copulas to estimate conditional drought severity distribution and joint return periods for both historical and future time periods in Fars province. 2) Inquiring the effects of climate change on the frequency and severity of meteorological drought.

Materials and Methods: Among the weather stations of Fars province, six synoptic stations were selected, which had longer historical data than others. The data used included 24-hour precipitation during 15 (2004-2018) to 33 (1986-2018) years. Three steps were carried out. Stage one: downscaling of outputs of the large scaling (CanESM2) based on two intermediate (RCP4.5) and pessimistic (RCP8.5) scenarios using SDSM, ver. 4.2.9 during the period of 2020 to 2050. Stage two: calculation of SPI and drought characteristics in the base and future periods (2050-2020). Stage three: extracting SDF curves for the base and future periods under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios using copula. The SPI was used to extract the drought duration and drought severity in the Fars province using GCM models under two selected scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) from the IPCC Fifth Assessment Report (AR5) scenarios. The gamble copula function was used to construct the joint distribution function for evaluating the drought return periods in the study area. Because short-term drought prediction is more practical than long-term prediction, we used the 1-month SPI for the copulas-based analysis. Drought severity and duration were calculated based on computed SPI values by using the past available data. Drought duration is defined as successive months with SPI value less than -1 and drought severity as the accumulative SPI value during the period with successive SPI value less than -1. The normal and log-normal functions were selected as the candidate distribution function for drought duration and drought severity.

Results and Discussion: The results showed that the frequency of drought occurrence in the Fars province will increase during the period of 2020-2050 under the both two scenarios. In the RCP8.5 scenario, the duration of the drought will also increase. The increase and decrease of monthly rainfall in RCP 4.5 and RCP 8.5 were 2.8 and 6.5%, respectively. The duration of the drought were obtained to be 5.25, 5.5 and 6 days at Shiraz station, with a 2 and 5 years return period, in the baseline and future periods under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively. These values were estimated to be 4, 3.5 and 5 days at Bavanat Station. It is expected that the precipitation will decrease at Shiraz station under the two scenarios. Similarly, this amount is expected to increase and decrease at Bavanet station in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively.

Conclusion: Changing droughts based on climate change is important in many aspects. In this study, the performance of two-variable statistical distribution of severity and duration of drought was investigated based on the copula function. The comparison of the drought period calculated using the SPI showed that due to the climate change, the frequency of drought periods is expected to increase in the base and future periods. The results showed that the value of the precipitation changes in the RCP8.5 scenario is higher than the RCP4.5

1, 2 and 3- M.Sc. Graduated, Associate Professor and Assistant Professor Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: drbakhtiari@uk.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.81899

scenario. Generally, the performance criteria showed that the SDSM had a good performance for the past and the future periods in Fars province for precipitation data. It is expected that with consideration of the amendments in the sixth report of the IPCC, more precision can be obtained in precipitation modeling. Therefore, reviewing the output of the SDF curves with the availability of the results of this report is suggested.

Keywords: Drought period, SDSM, Severity–duration–frequency curve, Standardized Precipitation Index

مقاله علمی-پژوهشی

آشکارسازی چگونگی واکنش خطی-غیرخطی و ترکیبی تبخیر پتانسیل به متغیرهای هواشناختی (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک تبریز)

حمید میرهاشمی^{*}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

تبخیر پتانسیل به عنوان یکی از مهمترین مؤلفه‌های چرخه آب به شمار می‌رود که برآیند اندرکنش چندین متغیر هواشناختی است. در این پژوهش به منظور آشکارسازی روابط خطی و غیرخطی و چگونگی تأثیر متغیرهای هواشناختی بر مقادیر تبخیر پتانسیل ایستگاه سینوپتیک تبریز از مدل‌های جمعی تعمیم‌یافته (GAM) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) استفاده شد. به این ترتیب، مقادیر ماهانه متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، فشار هوا، نم‌نسیبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به عنوان متغیرهای شناختی و مقدار تبخیر از تحت تبخیر به عنوان متغیر پاسخ در این مدل‌ها در نظر گرفته شدند. همچنین برای تعیین گره و گرادیان‌های واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی از ترکیب الگوریتم سیمپلکس و مدل تطبیقی مارس اسپالین تحت سه سناریوی آب و هوایی S-1، S-2 و S-3 که بر پایه داده‌های ایستگاه تبریز تعریف شده بودند استفاده شد. نتایج حاصل از دو مدل GAM و GLM نشان داد که نم‌نسیبی در ترکیب با سایر متغیرهای هواشناختی از تأثیر خطی و غیرخطی معناداری بر گرادیان تبخیر پتانسیل برخوردار نیست. چنانکه با کنترل دمای هوا، نقش نم‌نسیبی در گرادیان تبخیر ناچیز و قابل چشم‌پوشی شد. در این خصوص بهترین ترکیب متغیرهای هواشناختی در مدل‌های GAM و GLM براساس آماره AIC به ترتیب به مقدار ۸۴- و ۶۲- و خطای محاسباتی ۰/۷۱ و ۰/۷۶ میلی‌متر به دست آمد. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی مؤلفه‌های هموارساز اسپالین مدل GAM و ترکیب الگوریتم سیمپلکس - مدل تطبیقی مارس اسپالین نشان داد که واکنش انفرادی و ترکیبی تبخیر به متغیرهای هواشناختی تنها منوط به یک سطح نیست بلکه واکنش تبخیر از گرادیان‌های متفاوتی در مقابل تغییرات این متغیرها برخوردار است. چنانکه حساسیت و واکنش تبخیر نسبت به هر واحد تغییر از این متغیرها به مقدار مطلق آن متغیر در ترکیب با سایر متغیرها بستگی داشت. یعنی اثر هریک از متغیرهای هواشناختی بر مقدار تبخیر تا حد زیادی منوط به رابطه‌ای است که این متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی دارند، در صورتی که چنین موضوعی برای دمای هوا چندان صدق نمی‌کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سیمپلکس، تبخیر، غیرخطی، سناریو، مدل ترکیبی، مؤلفه هموارساز

مقدمه

توان تبخیر جو نامیده می‌شوند (۱۵ و ۱۶). بنابراین، پتانسیل تبخیر جو، برآیند اثر ترکیبی چندین متغیر هواشناختی است (۲) که مهمترین آنها عبارتند از دمای هوا، نم‌نسیبی (یا اختلاف بخار برای اشباع هوا)، سرعت باد، ساعات آفتابی و فشار هوا (۱۱) (۱۸ و ۲۱). چنانکه مقدار تبخیر پتانسیل، وابسته به چگونگی اندرکنش این متغیرها در هر منطقه آب و هوایی است. واکنش کلی تبخیر پتانسیل به هریک از این متغیرها، بستگی به اهمیتی دارد که آن متغیر در محیط مورد بررسی برعهده دارد. به عنوان نمونه، در مکان‌های بادخیز، اهمیت سرعت باد در میزان تبخیر پتانسیل نسبت به مکان‌های با هوای آرام، افزایش پیدا می‌کند. با تغییر هر یک از این متغیرهای هواشناختی، ضمن اینکه مابقی متغیرها به تغییر یادشده واکنش نشان می‌دهند، اثر کلی این تغییر و واکنش‌ها، در مقدار تبخیر پتانسیل نمود پیدا می‌کند

از نظر هیدرولوژی تبخیر به مجموعه پدیده‌هایی گفته می‌شود که آب را صرفاً از راه یک فرایند فیزیکی به بخار تبدیل می‌کنند. عواملی که میزان تبخیر را مشروط می‌سازند بر حسب اینکه وابسته به هوای مجاور یا سطح تبخیرکننده باشند به دو دسته کاملاً متمایز تقسیم شده‌اند. عواملی که مربوط به هوای مجاور سطح تبخیر بوده و به‌واقع محرک آن هستند به عنوان عوامل هواشناختی و یا عوامل قدرت و یا

^۱ - استادیار آب و هواشناسی گروه جغرافیا دانشگاه لرستان

(Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir)

(*) - نویسنده مسئول:

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.82703

(۹). بنابراین بدیهی است که واکنش تبخیر پتانسیل نسبت به متغیرهای هواشناختی با توجه به تغییرات مکانی و زمانی که این متغیرها دارند، از ماهیت پیچیده‌ای برخوردار باشد. از سویی به سبب رابطه تنگاتنگی که تبخیر پتانسیل به طور مستقیم با بسیاری از جنبه‌های حیات بشر دارد، پژوهش‌های فراوانی در مورد پیش‌بینی و ارتباط متغیرهای هواشناختی با این متغیر هیدرو - متئورولوژیکی با استفاده از روش‌های آماری، تجربی، آزمایشگاهی، هوش مصنوعی انجام گرفته که حجم و تاریخچه این مطالعه‌ها نشان از اهمیت و توجه جوامع علمی از دیرباز به پدیده تبخیر و مؤلفه‌های مرتبط با آن دارد.

دهقانی و همکاران (۳) با بهره‌گیری از متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، نم‌نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به عنوان ورودی و مقدار تبخیر حاصل از تشت به عنوان خروجی مدل شبکه عصبی، تأثیر متغیرهای هواشناختی را در برآورد تبخیر و حساسیت تبخیر را نسبت به این متغیرها ارزیابی کردند. براساس نتایج آنها، سرعت باد و دمای هوا به ترتیب به عنوان کم‌اثرترین و موثرترین متغیر در تخمین تبخیر روزانه به شمار می‌روند. رحیمی خوب و محمودی (۱۴) به منظور برآورد تبخیر - تعرق بر پایه‌ی حداقل داده‌های هواشناختی در حوضه امامه از چهار نوع شبکه عصبی استفاده کردند. ایشان، متغیرهای دمای بیشینه و دمای کمینه، نم‌نسبی و سرعت باد را به عنوان حداقل داده‌های هواشناختی مورد نیاز برای برآورد تبخیر - تعرق معرفی کردند. سلطانی و همکاران (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به مقایسه کارایی دو روش غیرخطی خودرگرسیون با ورودی برون‌زا (NN-ARX) و سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) در مدل‌سازی تبخیر سه اقلیم خشک و گرم، خشک و گرم ساحلی و نیمه خشک و معتدل گرم پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از تکنیک گام‌است مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، بهترین ترکیب ورودی دو مدل غیرخطی یادشده را از بین ۵ متغیر اقلیمی شامل دمای هوا، نم‌نسبی، سرعت باد، کمبود فشار بخار اشباع و ساعات آفتابی را برای هر ایستگاه مشخص کردند. بر مبنای نتایج گزارش شده، کارایی هر دو مدل در تخمین مقدار تبخیر اقلیم خشک و گرم بیشتر از دو اقلیم دیگر بوده و به‌طور کلی مدل ANFIS با خطای کمتری نسبت به مدل NN-ARX، مقدار تبخیر روزانه را برآورد می‌کند. ولیزاده کامران (۲۰) با محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل به روش استنفزا در آذربایجان شرقی و ترسیم نقشه پدیده یادشده برای روز ۱۱ خردادماه به این نتیجه رسید که ارتفاع و جهت شیب به عنوان مهمترین عامل در ایجاد نوسان مکانی تبخیر-تعرق پتانسیل در آذربایجان شرقی محسوب می‌شوند. خورشیددوست و همکاران (۱۱) با مدل‌سازی و ارزیابی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم عوامل هواشناسی بر تبخیر پتانسیل دوره گرم شهرستان تبریز با استفاده از معادلات ساختاری نشان دادند که چه مقدار از تأثیر هر یک از متغیرهای هواشناسی بر تبخیر پتانسیل ناشی از متغیر رابطه‌ی است

که چه بسا با کنترل و یا ثابت نگهداشتن آن متغیر واسطه، می‌توان به میزان تأثیرگذاری واقعی هر متغیر بر تبخیر پتانسیل آگاهی پیدا کرد. عیسی‌زاده و همکاران (۸) با ۱۰ ترکیب گوناگون از ۷ متغیر هواشناختی شامل دمای هوا، دمای شب‌نم، نم‌نسبی، فشار سطح ایستگاه، سرعت باد، بارش و ساعات آفتابی به بررسی کارایی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان در برآورد مقدار تبخیر ایستگاه سینوپتیک تبریز و مراغه پرداختند. یافته‌های آنها نشان داد که در حالت کلی هر دو مدل از کارایی مناسبی در تخمین تبخیر هر دو ایستگاه برخوردارند. همچنین نتایج حاصل از برازش تک ورودی متغیرها نشان داد که دمای هوا و ساعات آفتابی بیشترین تأثیر را در برآورد تبخیر دارند. نتایج حاصل از برازش انفرادی هریک از این ۷ متغیر نیز نشان داد که استفاده از دمای هوا و ساعات آفتابی در هر دو مدل، کم‌ترین خطا را نسبت به سایر متغیرها در برآورد تبخیر به دنبال دارند. ژو و سینگ^۱ (۲۲) وابستگی تبخیر به پنج متغیر هواشناختی شامل تابش خورشید، نم‌نسبی، دمای هوا، سرعت باد و اختلاف فشار بخار را در مقیاس‌های زمانی ساعتی، روزانه، ۱۰ روز و ماهانه بررسی کردند. آنها دریافتند که تأثیر این متغیرها بر تبخیر با تغییر مقیاس زمانی، تغییر پیدا می‌کند. دمای هوا و نم‌نسبی در مقیاس‌های زمانی کوتاه و اختلاف فشار بخار در تمامی مقیاس‌های زمانی از همبستگی بسیار بالایی با تبخیر پتانسیل برخوردار بودند. سرعت باد در مقایسه با سایر متغیرها، دارای کمترین همبستگی با تبخیر بود. رن^۲ و همکاران (۱۷) با استفاده از رگرسیون خطی و آزمون من - کندال مشخص کردند که دمای هوا و نم‌نسبی در تمامی مقیاس‌های زمانی، به عنوان مهمترین متغیرهای موثر بر تبخیر پتانسیل در حوضه رودخانه هایلار (ایستگاه واقع در کشور چین) به شمار می‌روند. در صورتی که با تغییر مقیاس زمانی، تأثیر سرعت باد و ساعات آفتابی بر تبخیر پتانسیل، غیرمعنادار می‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمون من - کندال، روند افزایشی را برای تبخیر پتانسیل و دمای هوا و روند کاهشی را برای سرعت باد، ساعات آفتابی و نم‌نسبی، نشان می‌دهد. شی^۳ و همکاران (۱۹) با مطالعه نوسانات فضایی و زمانی تبخیر پتانسیل و عوامل محرک آن با استفاده از اطلاعات ثبت شده در ۲۲ ایستگاه هواشناسی در تبت دریافتند که تبخیر پتانسیل طی دوره آماری ۱۹۶۱-۲۰۰۱ دستخوش کاهش معناداری شده است. همچنین ایشان با ارزیابی متغیرهای هواشناختی مؤثر در تبخیر پتانسیل، اختلاف فشار بخار اشباع را به عنوان مهمترین عامل در تعیین تبخیر پتانسیل نشان دادند. یان^۴ و همکاران (۲۳) به منظور شناسایی الگوهای فضای و زمانی

1- Xu and Singh

2- Ren

3- Shi

4- Yan

انجام شده نقش مهمی در گرایش تبخیر پتانسیل دارند به عنوان متغیرهای مستقل یا تبیینی در نظر گرفته شدند. با احتساب به اینکه میزان تبخیر اندازه گیری شده توسط تشت یا حوضه های آزمایشی و سفره های آزاد آب کم عمق نیز می توانند با وجود اینرسی حرارتی کم و بیش زیاد این وسایل، تا اندازه ای معرف پتانسیل تبخیر جو باشند (۱۶)، داده های ماهانه تبخیر از تشت ایستگاه سینوپتیک تبریز نیز به عنوان متغیر پاسخ یا وابسته در نظر گرفته شد. شایان توجه است که داده های هواشناختی و داده های تبخیر با پوشش زمانی ۱۹۹۲-۲۰۱۱ مربوط به ماه های، آوریل، مه، ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر یعنی ماه های که مقدار تبخیر در ایستگاه تبریز ثبت شده اند است. زیرا در سایر ماه های سال که عمدتاً در فصل زمستان قرار دارند، مقدار تبخیر در این ایستگاه اندازه گیری نمی شود.

روش ها

اندرکنش و تأثیر متغیرهای هواشناختی و هیدرولوژیکی به صورت خطی و غیرخطی است. بنابراین در این مطالعه برای آگاهی از چگونگی رابطه و تأثیر انفرادی و ترکیبی متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل از چندین رویکرد که هرکدام قادر به کشف روابط خطی و غیرخطی هستند استفاده شد. به این ترتیب که ابتدا از طریق مدل جمعی تعمیم یافته (GAM)^۲، مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین و مدل خطی تعمیم یافته (GLM)^۳ به ترتیب رابطه غیرخطی و خطی متغیرهای هواشناسی با تبخیر پتانسیل شناسایی شد. در گام بعدی با کاربرد الگوریتم سیمپلکس بر مدل تبخیر کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، سطوح گرادیان پاسخ تبخیر به متغیرهای هواشناختی به صورت انفرادی معین شدند. همچنین برای آگاهی از فرایند پاسخ خالص تبخیر به هرکدام از این متغیرها تحت شرایط متفاوت آب و هوایی، ابتدا سه وضعیت آب و هوایی مبتنی بر داده های ایستگاه سینوپتیک تبریز به صورت سه سناریو در قالب S-1، S-2 و S-3 تعریف شدند که سناریو اول (S-1) اشاره به شرایط نرمال، سناریو دوم (S-2) و سوم (S-3) به ترتیب به شرایطی مشابه با فصل بهار و تابستان آب و هوای ایستگاه سینوپتیک تبریز دارند. در ادامه با کنترل و ثابت نگه داشتن متغیرهای هواشناختی تحت این سه سناریو، و ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلاین، گرادیان خالص واکنش تبخیر به تغییرات متغیرهای هواشناختی ارزیابی شد.

رابطه متغیرهای هواشناختی با تبخیر پتانسیل در حوضه رودخانه واقع در چین، ابتدا با کاربرد روش خوشه بندی k-means و براساس داده های ۴۴ ایستگاه ها هواشناختی، این حوضه را به ۶ زیرحوضه تقسیم کردند. در ادامه با کاربرد آزمون همبستگی اسپرمن نشان دادند که اگرچه در مجموع کل حوضه، مؤلفه های میانگین، کمینه و بیشینه دمای هوا، نم نسبی، سرعت باد، بارش و ساعات آفتابی دارای رابطه معنادار با تبخیر پتانسیل هستند اما نقش و مقدار تأثیر آنها بر تبخیر پتانسیل در هرکدام از زیر حوضه ها متفاوت است. مانوچ و مرگن^۱ (۵) با ارزیابی وابستگی تبخیر روزانه به متغیرهای هواشناختی در منطقه جانگده هندوستان دریافتند که تابش خورشید، بیشینه دما و اختلاف فشار بخار به طور معناداری بر تبخیر پتانسیل موثرند. در صورتی که ساعات آفتابی و سرعت باد از کمترین همبستگی با تبخیر پتانسیل برخوردار بودند. چنانکه این دو متغیر را به عنوان متغیرهای بدون تأثیر بر تبخیر پتانسیل به حساب آوردند. همچنین آنها رابطه معکوسی بین نم نسبی و تبخیر پتانسیل تشخیص دادند.

به طور کلی تبخیر پتانسیل از یک سو به عنوان مهمترین عامل در ترازمندی انرژی در مقیاس محلی، نقش تعیین کننده ای در منابع آب قابل دسترس در مقیاس یادشده ایفا می کند (۱۷) و از سوی دیگر، این پدیده عمدتاً تحت تأثیر متغیرهای هواشناختی قرار دارد (۱۰)؛ بنابراین، لازم است تا گستره های متفاوتی که در آن، متغیرهای هواشناختی به صورت خطی و غیرخطی، تبخیر پتانسیل را دستخوش تغییر می کنند، بررسی شوند تا ضمن روشن شدن زوایای تبخیر پتانسیل بتوان راهبردهای کشاورزی - مدیریتی را به صورت بهینه تری مبتنی بر پتانسیل های موجود محیطی استوار ساخت. بنابراین مهمترین هدف این مطالعه، بررسی چگونگی واکنش تبخیر پتانسیل ماه های گرم - نسبتاً گرم سال ایستگاه سینوپتیک شهرستان تبریز در مقابل گرادیان های ترکیبی و انفرادی متغیرهای هواشناختی ایستگاه یادشده و کشف روابط خطی و غیرخطی که این متغیرها به صورت ترکیبی با این پدیده دارند است تا براین اساس بتوان به درک مناسبی از تفاوت های موجود در واکنش تبخیر برحسب مقادیر متفاوت این متغیرهای هواشناختی در طی ماه های گرم - نسبتاً گرم سال دست یافت.

مواد و روش ها

از آنجایی که رهیافت این مطالعه مبتنی بر مدل سازی و ارزیابی تأثیر متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل شهر تبریز است، ابتدا داده های ماهانه متغیرهای هواشناختی شامل دمای هوا، فشار هوا در سطح دریا، سرعت باد، نم نسبی و ساعات آفتابی که در بررسی منابع

۲- Generalized Additive Model (GAM)

3- Generalized Linear Model (GLM)

1- Manoj and Mrugen

مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (GLM) و جمعی تعمیم‌یافته (GAM)

مدل GLM یک مدل پارامتری بوده که بسط مدل‌های خطی است. در این مدل، فرمول ارائه می‌شود و رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته به وسیله پارامتر برآوردشده رگرسیون و فاصله‌های اطمینان سنجش می‌شود. مدل GLM بسط مدل‌های خطی را به صورت رابطه نشان ۱ می‌دهد.

$$g(\mu) = a + \sum \beta_j x_j \quad (1)$$

که g : تابع پیوند از خانواده نمایی است. از سویی، GAM یک مدل ناپارامتری بوده که بسط مدل‌های GLM است (۷). در این مدل‌ها برخلاف مدل‌های پارامتری که در آنها رابطه بین متغیرهای مستقل و وابسته به وسیله فرمول ارائه می‌شود، اجازه داده می‌شود، داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند. در این مدل‌ها، فرض بر این است که متغیر وابسته یا پاسخ، دارای توزیعی از خانواده نمایی با میانگین $\mu = E(Y|X_1, \dots, X_p)$ است که از طریق تابع پیوند g به متغیرهای مستقل (X_j) متصل می‌شود. به واقع، GAM فرم پارامتری متغیرهای مستقل را در مدل خطی به فرم ناپارامتری بسط می‌دهد. این مدل به صورت رابطه ۲ ارائه شده است.

$$g(\mu) = a + \sum_{j=1}^p f_j(X_j) \quad (2)$$

در این جا فرض می‌شود که f_j ها توابعی نامعلوم و هموار و X_j متغیرهای مستقل هستند. به‌طور خاص، f_j از روی داده‌ها و با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته هموارساز نمودار پراکنش برآورد می‌شود. بنابراین چنانکه ذکر شد به‌جای اینکه منحنی پاسخ توسط اشکال موجود در کلاس پارامتری محدود شود، GAM اجازه می‌دهد که داده‌ها شکل منحنی پاسخ را تعیین کنند. تفاوت اساسی این مدل با مدل‌های پارامتری در این است که توابع خطی به وسیله توابع هموار نامعلوم جایگزین می‌شوند. دارا بودن هموارسازها یکی از مزایای مهم GAM است که آن را از سایر مدل‌ها متمایز می‌کند. این توابع، قابلیت جمع‌پذیری دارند، به این معنا که می‌توان در حالی که مدل به داده‌ها برازش شده است اثرات هر یک از متغیرهای پیشگو را به‌طور جداگانه آزمون کرد. به عبارتی، از آنجا که اثر هر متغیر، به صورت جداگانه بیان می‌شود، هر تابع می‌تواند برای آزمون نقش متغیرها در پیشگویی پاسخ به‌صورت جداگانه بررسی شود (۶). وجود هموارسازها در این مدل سبب توانایی آن در شناسایی روابط غیرخطی شده است (۴).

الگوریتم بهینه‌ساز سیمپلکس

الگوریتم سیمپلکس یک تکنیک جستجوی غیرگرادیان مبتنی بر

الگوریتم بهینه‌سازی است که برای کمینه کردن یک تابع دلخواه در یک تعداد دوره تکرار محدود بکار می‌رود. این الگوریتم برای هر تعداد از متغیرهای پیوسته کار می‌کند و هیچ پیش‌فرضی در مورد تابعی که باید بهینه شود به‌جز اینکه پیوسته باشد ندارد. این الگوریتم در ابتدا با ارائه یک راه‌حل و آزمون بهینه‌سازی آن راه‌حل، شروع به کار می‌کند. اگر بهینه‌سازی رضایت‌بخش باشد، الگوریتم متوقف می‌شود در غیر این صورت، الگوریتم با ترسیم کردن یک سیمپلکس، نقطه بهینه دیگری را شناسایی می‌کند. آنگاه بهینه‌سازی این راه‌حل نیز آزمون می‌شود. به این ترتیب، تمامی پروژه تا زمانی که یک مجموعه مقادیر مستقل برای دستیابی مدل به متغیر وابسته دلخواه پیدا شوند انجام می‌گیرد (۱۳). به‌منظور ارزیابی صحت‌سنجی و گزینش بهترین ترکیب متغیرهای هوشناختی در هر یک از مدل‌ها GLM و GAM از معیار آکائیک (AIC) و ضریب همبستگی پیرسون (R) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

$$AIC = n \times \ln(RSS/n) + 2 \times K \quad (3)$$

در رابطه ۳، AIC معیار آکائیک، n : حجم داده‌ها، RSS: مجموع مربعات خطای مدل و K : تعداد پارامترها.

نتایج و بحث

ویژگی‌های آماری متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه در جدول شماره ۱ آورده شده است. مقایسه پراکنش سری زمانی این متغیرهای هوشناختی بر پایه ضریب پراکندگی نشان می‌دهد که پراکنش سالانه این متغیرها نسبتاً پایین است. دمای هوا با ضریب ۲۶ درصد و فشار هوا با ضریب ۰/۵ درصد به ترتیب از کمترین و بیشترین نظم حول میانگین بلندمدت برخوردارند. با این وجود، در مقیاس زمانی ماهانه، بعد از فشار هوا، کمترین ضریب پراکندگی به دمای هوا تعلق دارد که این فرایند، نظم رژیم دمای ماهانه را نسبت به رژیم دمای سالانه ایستگاه سینوپتیک تبریز نشان می‌دهد. به‌واقع هم‌گام با افزایش میانگین دمای ماهانه، پراکنش دما نیز کاهش پیدا می‌کند. سایر متغیرهای هوشناختی نیز از رژیم ماهانه منظم‌تری نسبت به رژیم سالانه برخوردارند. تبخیر پتانسیل با ضریب تغییرات ۳۵ درصد، رژیم نسبتاً نامنظمی را نشان می‌دهد. از سویی، گرایش و کجی سری زمانی تمامی متغیرها در مقیاس سالانه نشان از کجی اندک این متغیرها دارد. به طوری که اگر ضریب چولگی به‌عنوان مقیاسی از درجه تقارن شمرده شود، می‌توان ادعا کرد که سری زمانی تمامی متغیرها در مقیاس سالانه از درجه تقارن مناسبی برخوردارند.

برای آگاهی از تأثیر غیرخطی و خطی متغیرهای هوشناختی بر تبخیر پتانسیل، به ترتیب مدل جمعی تعمیم‌یافته (GAM) و مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM) اجرا شدند که نتایج حاصل از آن در جدول شماره ۲ آورده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های آماری متغیرهای هواشناختی و تبخیر پتانسیل ایستگاه سینوپتیک تبریز

Table 1- Statistical characteristics of meteorological variables and potential evaporation of Tabriz synoptic station

متغیر Variable	میانگین Average	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	چولگی Skew	ضریب تغییرات Coefficient of variability
دما (°C) Temperature (°C)	20.33	9.92	28.77	-0.27	26%
نم نسبی (%) Humid (%)	41.33	25.23	61.70	0.46	21%
فشار (mb) Pressure (mb)	1008.86	1000.76	1021.47	0.29	0%
سرعت باد (m/s) Wind (m/s)	3.81	2.07	5.62	0.08	20%
ساعات آفتابی (h) Sun (h)	9.59	5.58	12.43	-0.47	19%
تبخیر (mm) Evaporation (mm)	9.11	3.83	15.45	0.00	35%

مساوی ۲ در این جدول نشان از تأثیر غیرخطی متغیرهای هواشناختی بر تبخیر پتانسیل دارند.

برحسب مقادیر درجه آزادی و مقدار ضریب معناداری (P-value) حاصل از مدل مشخص می‌شود که از نظر آماری، تمامی متغیرهای هواشناختی به جزء نم نسبی، از رابطه غیرخطی معناداری با تبخیر پتانسیل برخوردارند. این مهم نشان می‌دهد که در صورت حذف اثر سایر متغیرهای هواشناختی، نم نسبی قادر نیست به طور معناداری تبخیر پتانسیل را متحمل تغییر کند. بنابراین، با حذف متغیر نم نسبی از مجموع متغیرهای هواشناختی، فرایند مدل سازی تبخیر پتانسیل با استفاده از مدل GAM پیاده سازی شد. میزان خطای محاسباتی و ضریب همبستگی چندگانه خروجی از این مدل به ترتیب به مقدار ۰/۷۱ میلی متر و ۰/۹۷ بدست آمدند که این مقادیر نشان از عملکرد مناسب مدل دارد.

به واقع اطلاعات مندرج در این جدول مبتنی بر انتخاب متغیرها با استفاده از بهترین زیرمجموعه و معیار AIC تا ۵ زیر مجموعه برای هر دو مدل GAM و GLM است. نتایج این محاسبه نشان می‌دهد که در کلیه ترکیب‌ها، مقدار خطای محاسباتی مدل GAM کمتر از مدل GLM است. همچنین با احتساب به معناداری متغیرها در هر مدل، ترکیب دما، فشار، سرعت باد و ساعات آفتابی به عنوان بهترین زیرمجموعه از متغیرهای مؤثر در پراکنش تبخیر پتانسیل در هر دو مدل به حساب می‌آیند. از سویی، نم نسبی در این دو مدل خطی و غیرخطی، در ترکیب با سایر متغیرها، رابطه معناداری با تبخیر پتانسیل نشان نمی‌دهد. در ادامه، برای نیل به اهداف مطالعه، ابتدا مدل جمعی تعمیم یافته (GAM) با توزیع گاما و تابع پیوند همانی با ترکیب متغیرهای دمای هوا، فشار هوا، نم نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به عنوان متغیرهای مستقل در مقابل تبخیر پتانسیل به عنوان متغیر پاسخ به صورت ترکیبی اجرا شد (جدول ۳). درجه‌های آزادی بیشتر و

جدول ۲- نتایج آماری گزینش بهترین زیرمجموعه معنادار از متغیرهای هواشناختی در مدل GAM و GLM

Table 2- Statistical results of best subset of meteorological variables selected in GLM and GAM model

گام Step	متغیر Variable	مدل Model					
		GLM			GAM		
		AIC	R	RMSE	AIC	R	RMSE
1	دما، فشار، ساعات آفتابی، سرعت باد، نم نسبی Temperature, Pressure, Sun, Wind, Humid	-51	0.97	0.794	-84	0.976	0.69
2	دما، فشار، ساعات آفتابی، سرعت باد Temperature, Pressure, Sun, Wind	-62	0.972	0.76	-86	0.976	0.71
3	دما، فشار، سرعت باد Temperature, Pressure, Wind	-39	0.966	0.843	-54	0.97	0.8
4	دما، فشار، سرعت باد، نم نسبی Temperature, Pressure, Wind, Humid	-37	0.966	0.843	-56	0.97	0.78
5	دما، ساعات آفتابی، سرعت باد، نم نسبی Temperature Sun, Wind, Humid	-30	0.965	0.868	-65	0.97	0.76

جدول ۳- نتایج حاصل از اجرای مدل GAM بر روی متغیرهای هواشناختی در مقابل تبخیر

Table 3- Performance results for GAM model with meteorological variables vs evaporation

متغیر Variable	مدل ترکیبی Hybrid Model				مدل انفرادی Single Model		
	میانگین Mean	درجه آزادی Degree Freedom	P-value	پارامترهای مدل Parameter of Model	درجه آزادی Degree Freedom	P-value	پارامترهای مدل Parameter of Model
دمای هوا Temperature	20.33	4.01	0.00	0.38	4	0.00	0.57
نم‌نسبی Humid	41	4.2	0.15	0.012	4	0.00	-0.31
فشار هوا Pressure	1008.86	4	0.002	-0.0055	4	0.00	-0.59
سرعت باد Wind	3.8	4.01	0.034	0.61	3.99	0.19	2.99
ساعات آفتابی Sun	9.6	4.04	0.018	0.42	4	0.0019	1.58
تبخیر Evaporation	9				-		

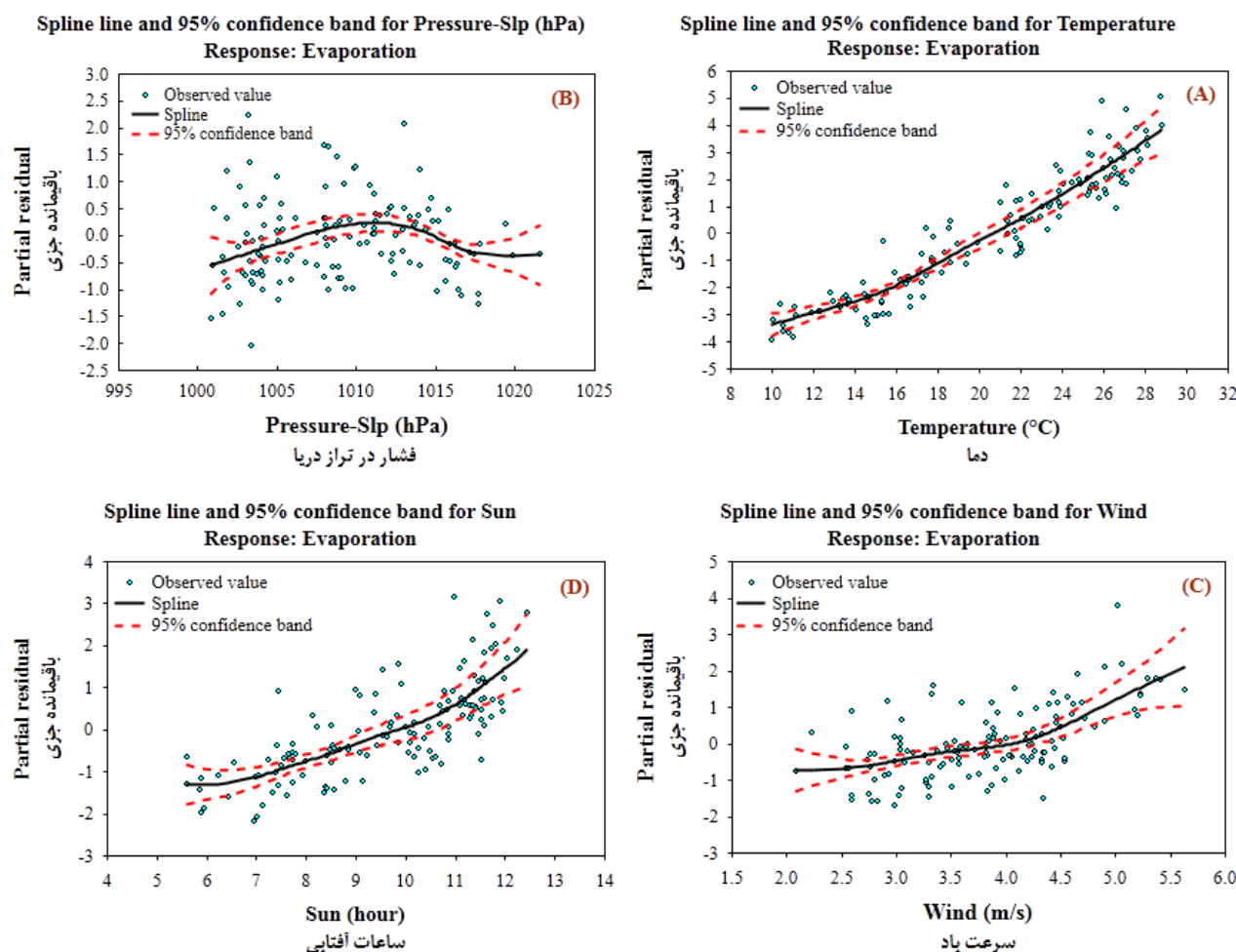
هواشناختی بر تبخیر را در پی دارد. به‌طور کلی، ارزیابی نمودارهای هموارساز ترکیبی نشان می‌دهد به‌جزء فشار هوا که دارای اثر افزایشی-کاهشی بر تبخیر است سایر متغیرها از یک نفوذ صرفاً افزایشی بر تبخیر برخوردارند که شدت این رابطه دستخوش تغییر شده است. این فرایند موجب شده تا یک مؤلفه غیرخطی در رابطه متغیرهای مستقل با تبخیر پدید آید.

از آنجا که نمودارهای هموارساز اسپلاین ترکیبی، شکل پاسخ تبخیر را در مقابل هریک از متغیرهای پیش‌بین با حذف اثر سایر متغیرها مشخص می‌کنند لذا در نظرگیری ترکیب این متغیرهای هواشناختی، اطلاعات دقیق‌تر و واقعی‌تری از رفتار تبخیر در مقابل تغییرات محیطی نشان می‌دهد. چراکه با برآزش انفرادی تبخیر در مقابل این متغیرهای هواشناختی، نمی‌توان به چگونگی عملکرد تبخیر در مقابل تغییرات محیطی آگاهی یافت. چنانکه مقایسه واکنش‌های ترکیبی و انفرادی تبخیر در مقابل متغیرهای هواشناختی، ضمن مشخص کردن اثر خالص هر کدام از این متغیرها، بیان می‌کند که چرا واکنش تبخیر در مقابل یک واحد معین از تغییر متغیرهای هواشناختی در طی زمان‌ها و مکان‌های مختلف، متفاوت است.

براساس نتایج مدل GLM، به‌جزء نم‌نسبی، مابقی متغیرها از اثر خطی معناداری بر تبخیر پتانسیل برخوردارند. بدین ترتیب، باوجود آنکه ضریب همبستگی درجه صفر نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل به مقدار ۰/۸۳- به‌دست آمد اما نتایج این مدل نیز همانند مدل GAM نشان می‌دهند که نم‌نسبی در ترکیب با سایر متغیرها، رابطه خطی معناداری با تبخیر پتانسیل ندارد. برای آگاهی از مقدار رابطه خطی واقعی نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل بدون دخالت سایر متغیرها، در یک ماتریس همانی، با کنترل اثرات دمای هوا، فشار هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی، مقدار همبستگی تفکیکی درجه ۴ و درجه ۱ نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل به مقدار ۰/۰۹۷- و ۰/۰۱۹۷+ محاسبه شد.

نمودارهای مؤلفه‌های هموارساز اسپلاین مدل GAM برای آگاهی از چگونگی واکنش ترکیبی و انفرادی تبخیر پتانسیل در مقابل هر یک از متغیرهای هواشناختی ترسیم شد. این نمودارها به تفکیک متغیرهای معنادار به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ قابل مشاهده‌اند. چنانکه از نمودارهای ترکیبی پیداست (۱-A)، تأثیر کلی دما بر تبخیر افزایشی است. اما مقدار واحد این اثر با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند. به عبارتی واکنش تبخیر در مقابل دماهای پایین‌تر، از شدت کمتری نسبت به دماهای بالاتر برخوردار است.

واکنش انفرادی تبخیر (۲-A) در مقابل دمای هوا نیز مشابه واکنش ترکیبی آن است. به این ترتیب مشخص می‌شود که سایر متغیرهای هواشناختی از نقش چندان زیادی در روند تأثیر دمای هوا بر گرادیان تبخیر برخوردار نیستند. تأثیر کلی و ترکیبی تغییرات فشار هوا بر مقدار تبخیر به‌صورت تک‌نمایی و کاهنده است (۱-B). برحسب مقادیر پارامترهای مدل و شیب منحنی اسپلاین، فشار در قیاس با سایر متغیرهای مورد مطالعه، کمترین نفوذ خالص را بر گرادیان تبخیر دارد. در عوض، اثر انفرادی این متغیر بر تبخیر، بسیار شدید و کاهنده و تاحدودی خطی است (۲-B). بنابراین عمده نفوذی که فشار هوا بر تبخیر در محیط نشان می‌دهد به سبب عملکرد متغیرهای دیگری است که در رابطه بین این دو متغیر دخالت می‌کنند. واکنش ترکیبی تبخیر در مقابل سرعت باد نیز افزایشی است، البته شدت این واکنش با افزایش سرعت باد از ۴ متر بر ثانیه شدیدتر می‌شود (۱-C). اگرچه واکنش انفرادی و غیرخطی تبخیر در مقابل سرعت باد معنادار نبود ولی گرایش این واکنش نشان از افزایش شیب آن نسبت به تغییرات سرعت باد دارد. ساعات آفتابی نیز دارای اثر خالص افزایشی بر مقدار تبخیر است (۱-D). البته شیب اثر انفرادی این متغیر نیز همانند سرعت باد بیش از اثر ترکیبی آن به حساب می‌آید (۲-D). این فرایند بیان می‌کند که افزایش ساعات آفتابی، افزایش تأثیر متغیرهای

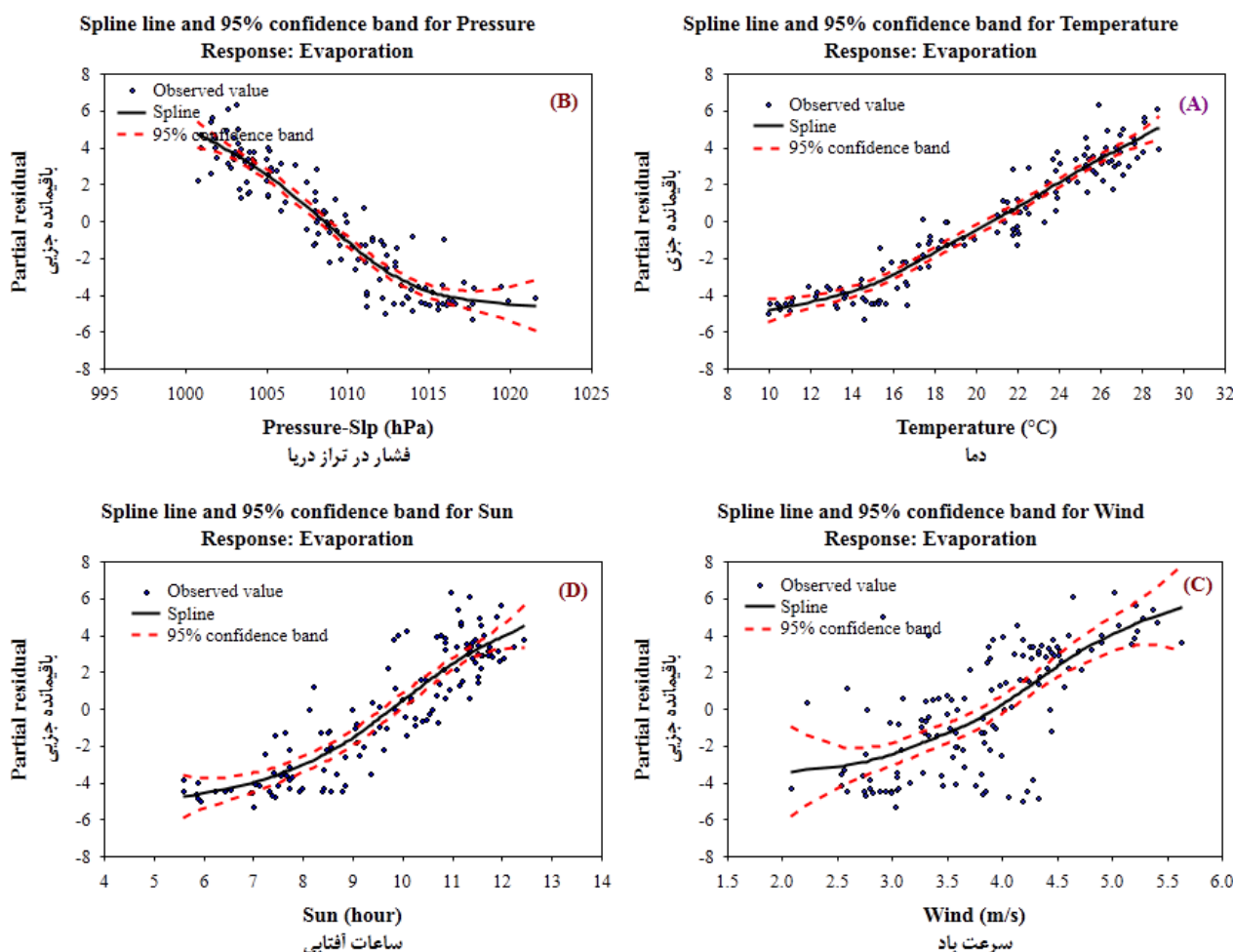


شکل ۱- واکنش ترکیبی تبخیر به متغیرهای هواشناختی دمای هوا (A)، فشار تراز دریا (B)، سرعت باد (C)، ساعات آفتابی (D)
Figure 1-Hybrid response evaporation vs meteorology variable. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

اشباع و میزان انرژی مورد نیاز که در مقدار تبخیر مؤثرند، از رابطه نمایی و غیرخطی با دمای هوا برخوردار است (۱۲). به طوری که هرچه دما بیشتر باشد به مقدار انرژی کمتری برای رخداد هر واحد تبخیر مورد نیاز است و از سوی دیگر، حساسیت فشار بخار اشباع نیز نسبت به تغییرات دما بیشتر می‌شود. به این صورت که مقدار تغییر فشار بخار اشباع نسبت به یک واحد تغییر در دمای هوای گرم بسیار بیشتر از همان واحد تغییر دما در هوای سردتر است. چنین فرایندهای موجب پدید آمدن مؤلفه‌ای غیرخطی از پاسخ تبخیر به تغییرات دما شده‌اند. از سویی، به سبب آنکه بیشینه گنجایش رطوبتی هوا وابسته به دما است بنابراین نم‌نسبی نیز علاوه بر بخار آب به دمای هوا نیز بستگی دارد. به طوری که با ثابت نگه داشتن بخار آب و تغییر همزمان دمای هوا، نم‌نسبی متحمل تغییر شدیدی خواهد شد (۱).

این مقادیر ضریب به عنوان رابطه خطی مستقیم و بدون واسطه نم‌نسبی با تبخیر پتانسیل به شمار می‌روند. بنابراین آشکار می‌شود که تأثیر نم‌نسبی بر تبخیر پتانسیل به طور بسیار شدیدی توسط سایر متغیرها به ویژه دمای هوا کنترل می‌شود. این دستاورد با نتایج مطالعه خورشیدوست و همکاران (۱۱) که در یک مدل ترکیبی با استفاده از معادلات ساختاری و همبستگی درجه صفر مشخص کردند که مجموع تأثیر غیرمستقیم متغیرها بر تبخیر بیش از اثر مستقیم آنها است همخوانی دارد.

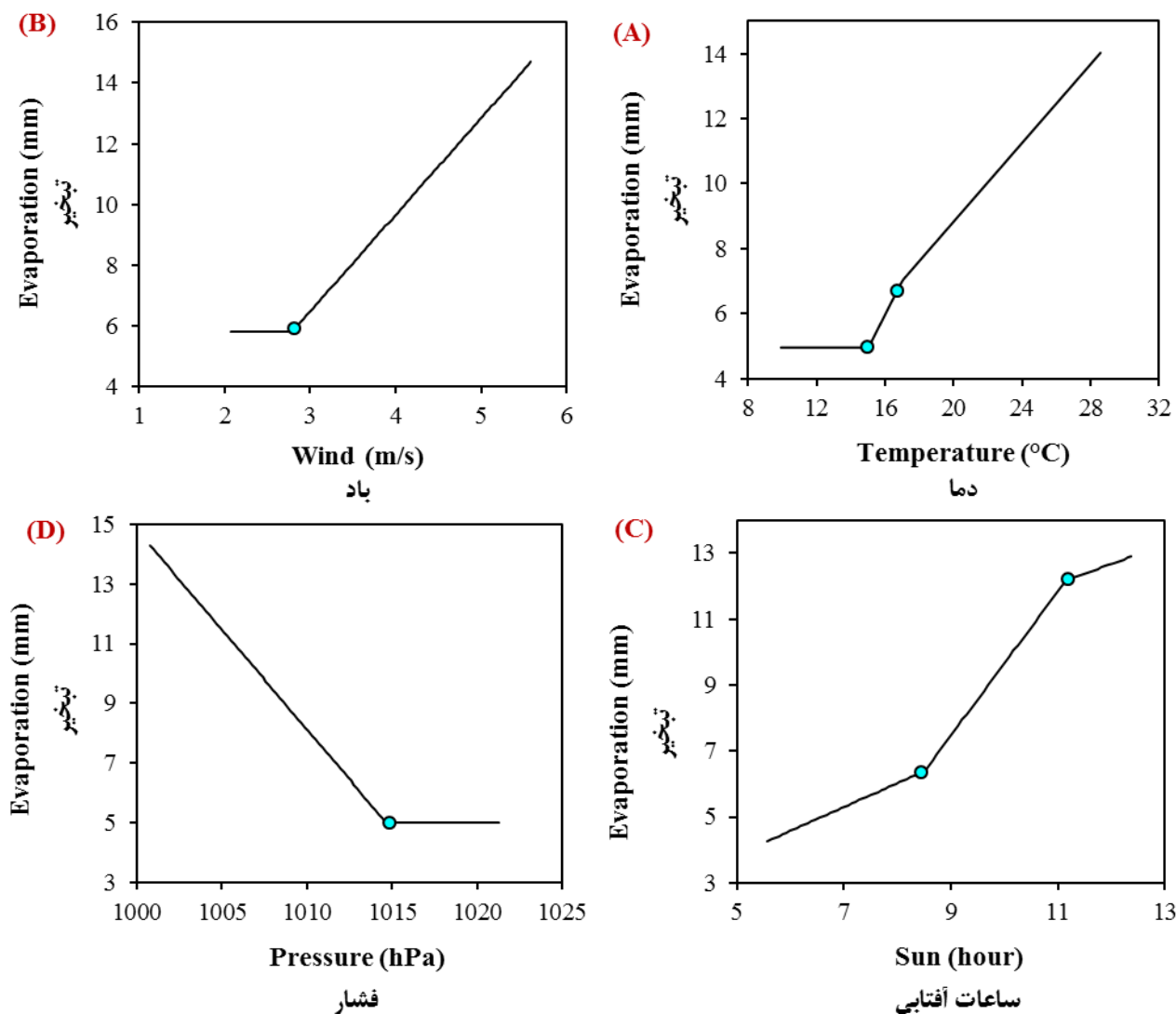
به طور کلی نتایج حاصل از این دو مدل، دلالت بر پاسخ خطی و غیرخطی تبخیر به متغیرهای هواشناختی مانند دمای هوا نم‌نسبی، فشار هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی دارد. چنانکه با افزایش دما، تبخیر نیز متعاقباً افزایش پیدا می‌کند اما شدت این افزایش روند یکسانی را نشان نمی‌دهد. زیرا دامنه تغییر عواملی مانند فشار بخار



شکل ۲- واکنش انفرادی تبخیر به متغیرهای هواشناسی دمای هوا (A)، فشار تراز دریا (B)، سرعت باد (C)، ساعات آفتابی (D)
Figure 2- Single response evaporation vs meteorology variable. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

جدول ۴- مقادیر همبستگی درجه صفر و تفکیکی متغیرهای هواشناسی با تبخیر

Table 4- Zero correlation and partial correlation of meteorological variables with evaporation			
متغیر Variable	همبستگی درجه صفر Zero Correlation	همبستگی تفکیکی درجه ۴ Partial Correlation-4	همبستگی تفکیکی درجه ۱ با کنترل دمای هوا Partial Correlation Controlling for Temperature
دمای هوا - تبخیر Temperature-Evaporation	0.95	0.484	-
نم‌نسی - تبخیر Humid-Evaporation	-0.83	-0.097	0.197
فشار هوا - تبخیر Pressure-Evaporation	-0.92	-0.318	-0.55
سرعت باد - تبخیر Wind-Evaporation	0.7	0.347	0.54
ساعات آفتابی - تبخیر Sun-Evaporation	0.88	0.32	0.24

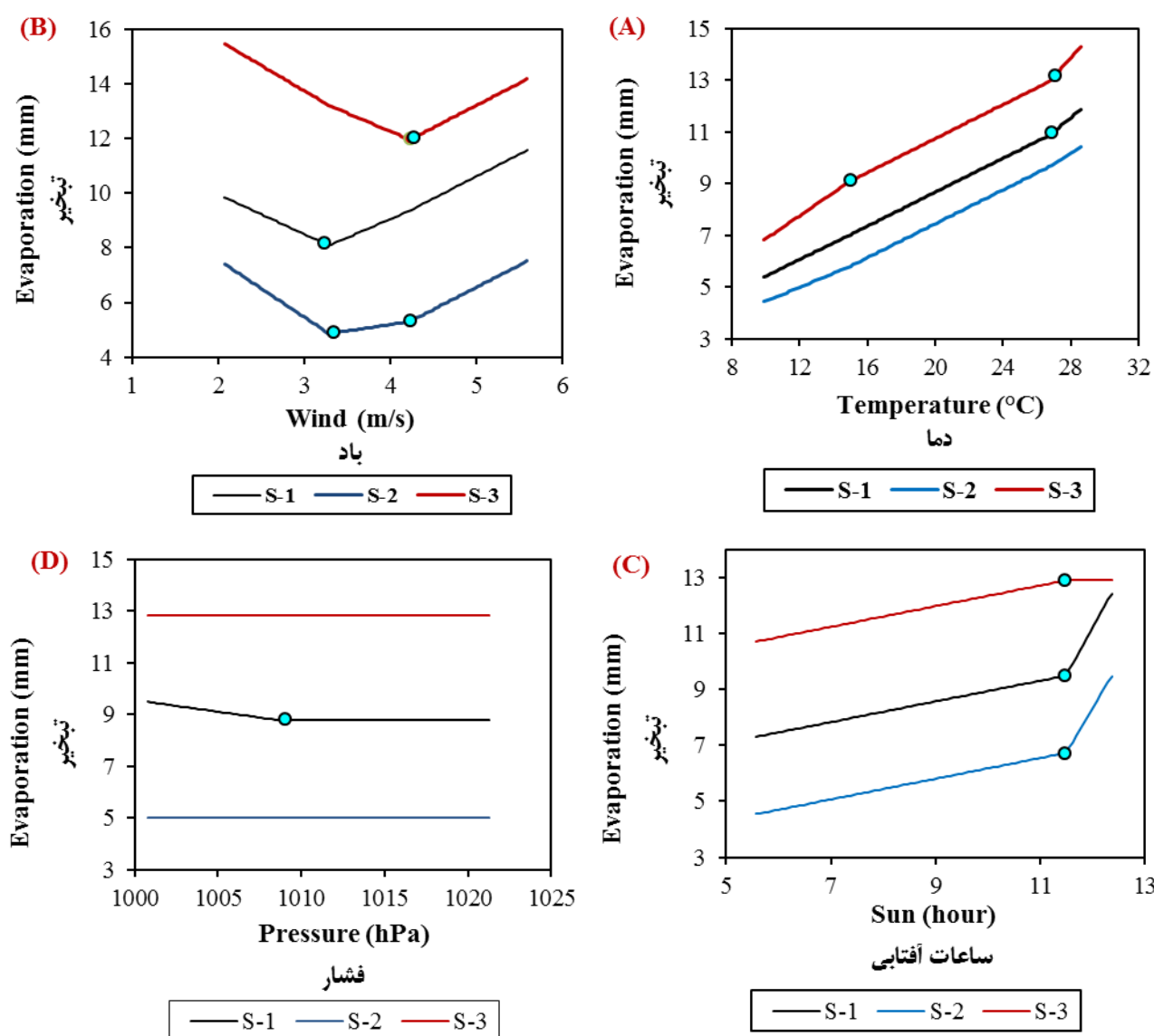


شکل ۳- نمودار گرادیان و واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی، دما (A)، باد (B)، ساعات آفتابی (C) و فشار (D)
Figure 3- Gradian and response Knots plot evaporation response vs meteorology variable, Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

نم‌نسی در قیاس با سایر متغیرهای هواشناختی نظیر دمای هوا دارای چنین نقشی بااهمیتی در کنترل تبخیر نبود. چراکه در صورت حذف و کنترل تأثیر دمای هوا و سرعت باد، نم‌نسی از نقش چندانی برای کنترل تبخیر پتانسیل برخوردار نیست.

همان‌طور که مشخص شد واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناختی تنها منوط به یک سطح نیست بلکه واکنش تبخیر از گرادیان‌های متفاوتی در مقابل تغییرات این متغیرها برخوردار است. بنابراین در ادامه به منظور شناسایی گره‌های گرادیان واکنش تبخیر، ابتدا با کاربرد مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلین، مدل تبخیر ایجاد و آنگاه با تعریف سه سناریوی آب و هوایی مبتنی بر داده‌های ایستگاه و استفاده از الگوریتم سیمپلکس به شناسایی گره‌های واکنش تبخیر در خلال این سناریوها پرداخته شد.

لیکن، تبخیر تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که فشار بخار هوا برابر با فشار بخار اشباع متناظر با دمای مایع شود (۱۵)، بنابراین در صورتی که دمای هوا بیشتر از دمای مایع باشد، زمانی فرا خواهد رسید که به‌رغم اشباع نبودن هوا یا کمبود بخار آب برای اشباع هوا، عملاً تبخیر متوقف می‌شود. از سویی اگرچه کمبود فشار بخار اشباع به عنوان پارامتر مهمی در تشدید تبخیر به شمار می‌رود (۱۹) اما شدت و میزان تأثیر این متغیر وابسته به دمای هوا است. چنانکه در این مطالعه با کنترل دمای هوا، نقش نم‌نسی در گرادیان تبخیر پتانسیل عملاً ناچیز شد (جدول ۴). بنابراین برخلاف مطالعه شی و همکاران (۱۹) که بیشترین نقش را در کنترل تبخیر در تبت به نم‌نسی اختصاص داده‌اند، نتایج این مطالعه با رویکرد خطی و غیرخطی، تفکیک و کنترل متغیرهای هواشناختی نشان می‌دهد که در شهرستان تبریز،



شکل ۴- نمودار گرادیان و واکنش تبخیر به متغیرهای هواشناسی با فرایند کنترل متغیرها، تحت سناریوهای متفاوت آب و هوایی، دما (A)، باد (B)، ساعات آفتابی (C) و فشار (D)

Figure 4- Gradient and response Knots plot evaporation response vs meteorology variable by controlling for meteorology variable based on different climatic scenarios. Temperature (A), Pressure (B), Wind (C), Sun (D)

نسبت به دما، سرعت باد و فشار هوا، در گره اول بدون شیب و فاقد همبستگی معنادار است؛ بنابراین، سه متغیر یادشده در این بخش، عملکردی متفاوت نسبت به حالت کلی نشان می‌دهند. یعنی افزایش دما در گره اول، با کاهش سرعت باد و افزایش فشار همراه بوده و این سه متغیر در راستای خنثی‌سازی اثر همدیگر عمل می‌کنند. به عبارتی در این گره، رابطه دما با سرعت باد و فشار هوا به ترتیب معکوس و مستقیم است، در صورتی که در گره‌های بعدی، عملکرد این متغیرها به صورت هم‌افزا تغییر می‌کند. در نتیجه در خلال ماه‌های مختلف،

در این سناریوها با ثابت نگه‌داشتن مقادیر متغیرها در سطح میانگین بلندمدت دوره تحت بررسی، واکنش تبخیر به تغییرات هریک از متغیرها سنجیده شد. گردایان واکنش‌های انفرادی و بدون کنترل متغیرها، در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در این خصوص دمای هوا و ساعات آفتابی در سه سطح و فشار هوا و سرعت باد در دو سطح، تبخیر را متحمل تغییر می‌کنند. این یافته نیز نشان از وجود مولفه‌ای غیر خطی در گردایان واکنش تبخیر نسبت به تغییرات متغیرهای هواشناسی دارد. از سویی آرایش این نمودارها نشان می‌دهد که گردایان تبخیر

شدت و جهت اندرکنش متغیرهای هواشناختی متفاوت است.

واکنش تبخیر به تغییرات متغیرهای هواشناختی تحت سناریوهای S-1، S-2 و S-3، ضمن اینکه به درستی، اندرکنش این متغیرها را در ترسیم مقدار مطلق تبخیر، معین می کند به طور تلویحی به نقش هم افزایی این متغیرها در تعیین مقدار مطلق تبخیر نیز اشاره می کند (شکل ۴). به طوری که در دماهای یکسان، مقادیر تبخیر متفاوتی مشاهده می شود. همچنین کمترین فاصله بین

مقادیر مطلق تبخیر تحت این سه سناریو به دمای هوا اختصاص دارد که این نیز دلالت بر تأثیرپذیری کمتر دمای هوا نسبت به سایر متغیرها دارد. یعنی اثر هریک از متغیرهای هواشناختی بر مقدار تبخیر تا حد زیادی منوط به رابطه این متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی بوده در صورتی که چنین موضوعی برای دما از وزن کمتری برخوردار است. واکنش تبخیر به تغییرات فشار با ثابت نگه داشتن اثر سایر متغیرها نشان از عدم تأثیر خالص نوسانات این متغیر بر گرادیان تبخیر دارد. گرادیان واکنش تبخیر به سرعت باد تحت هر سه سناریو نشان می دهد که متغیر واسطی در فرایند تأثیر سرعت باد بر تبخیر وجود دارد که در این مطالعه در نظر گرفته نشده است.

نتیجه گیری

تبخیر پتانسیل یکی از مهمترین پدیده های چرخه آب در طبیعت است که به عنوان شناسه نیاز آبی گیاه نیز محسوب می شود. این پدیده، پیامد اثر ترکیبی چندین متغیر هواشناختی بوده که این متغیرها دارای روابط مستقیم، غیرمستقیم و غیرخطی با هم هستند. چگونگی گرایش تبخیر بستگی به اندرکنش این متغیرها با هم و اثر ترکیبی آنها دارد. در نتیجه، تبخیر پتانسیل ماهیتی پیچیده دارد که عملکرد آن در هر ناحیه آب و هوای متفاوت از سایر نواحی است.

در این مطالعه با کاربرد مدل های غیرخطی GAM، مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلین، مدل خطی GLM، همبستگی درجه صفر و همبستگی تفکیکی، واکنش و گرادیان تبخیر پتانسیل ماهانه شهر تبریز در مقابل متغیرهای هواشناختی شامل دما، فشار، نم نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی سنجیده شد. نتایج نشان دادند که ترکیب متغیرهای مؤثر در گرادیان تبخیر پتانسیل در هر دو مدل یکسان است. به این ترتیب که در دو مدل GLM و GAM، تنها نم نسبی در ترکیب با سایر متغیرها فاقد رابطه معناداری بود. به طوری که

منابع

- 1- Aguado E., and Burt J.E. 2013. Understanding weather and climate. Pearson. 608.
- 2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Fao.

اضافه شدن متغیر یادشده به این دو مدل، هیچگونه تأثیری در افزایش ضریب تبیین مدل نهایی موجب نمی شود. همچنین نتایج حاصل از مؤلفه های هموارساز اسپلین ترکیبی و انفرادی و ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل تطبیقی مارس اسپلین ضمن معین کردن وجود مولفه ای غیرخطی در واکنش تبخیر نسبت به تغییرات متغیرهای مورد استفاده نشان داد که شدت حساسیت و واکنش تبخیر پتانسیل در مقابل هر واحد تغییر در هریک از این متغیرها علاوه بر اینکه به مقدار مطلق آن متغیر بستگی دارد به چگونگی اندرکنش آن متغیر با سایر متغیرهای هواشناختی نیز وابسته است. به طوری که در نظر گرفتن ترکیب متغیرهای هواشناختی موجب کسب اطلاعات دقیق تری از چگونگی واکنش تبخیر پتانسیل نسبت به محیط، شد.

همچنین ترکیب الگوریتم سیمپلکس با مدل کمانک تطبیقی مارس اسپلین تحت سه سناریو آب و هوایی S-1، S-2 و S-3، وجود گره و گرادیان های متفاوت در پاسخ تبخیر به هر یک از متغیرهای هواشناختی را مشخص کرد. به عبارتی گرادیان واکنش تبخیر به یک متغیر خاص در چندین سطح طبقه بندی می شوند. در این خصوص، دمای هوا با کمترین تأثیرپذیری از سایر متغیرهای هواشناختی به عنوان متغیری شناسایی شد که از بیشترین تأثیر غیرخطی و بدون واسط بر تبخیر برخوردار است. درحالی که فشار هوا با کمترین نفوذ خالص بر گرادیان تبخیر به منزله متغیری شناسایی شد که در صورت ثابت نگه داشتن سایر متغیرها، نقشی در گرادیان غیرخطی تبخیر برعهده نخواهد داشت.

به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعه نشان می دهد که با توجه به ماهیت پیچیده روابط بین متغیرهای هواشناختی، ضرورت دارد که برای کاهش عدم قطعیت در فرایند مدل سازی این پدیده ها از ترکیب چندین مدل خطی و غیرخطی بهره گرفته شود. زیرا به طور قطع نمی توان رابطه بین چندین متغیر را در دستگاہی مانند آب و هوا که ماهیتی پیچیده، آشوب مند و خودتنظیم دارد را در یک مدل خطی و یا غیر خطی که خطای محاسباتی آن تنها برروی یک نمونه تصادفی یا گزینشی از داده های دردسترس آزمون شده خلاصه کرد. بلکه لازم است چندین مدل با قابلیت مختلف با هم ترکیب شوند تا براین اساس ضمن ارائه مدلی با قابلیت اعتماد بیشتر، شناخت بهتری نیز از روابط بین متغیرها حاصل شود.

- 3- Dehghani A.A., Piri M., Hesam M., and Dehghani N. 2012. Estimation of Daily Pan Evaporation By Using MLP,RBF and Recuurent Neural Networks. *Journal of Water and Soil Conservation* 17(2): 49-67. (In Persian with English abstract).
- 4- Guisan A., Edwards Jr T.C., and Hastie T. 2002. Generalized linear and generalized additive models in studies of species distributions: setting the scene. *Ecological Modelling* 157(2-3): 89-100.
- 5- Gundalia Manoj J., and Dholakia Mrugen B. 2013. Dependence of evaporation on meteorological variables at daily time-scale and estimation of pan evaporation in Junagadh region. *American Journal Eng Research* 10(2): 354-362.
- 6- Hastie T., and Tibshirani R. 1986. Generalized Additive Models. *Statistical Science* 1(3): 297-310.
- 7- Hastie T., and Tibshirani R. 1987. Non-parametric logistic and proportional odds regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)* 36(3): 260-276.
- 8- Isazadeh M., ahmadzadeh h., and Ghorbani M.A. 2016. Assessment of Kernel Functions Performance in River Flow Estimation using Support Vector Machine. *Journal of Water and Soil Conservation* 23(3): 69-89. (In Persian with English abstract)
- 9- Jahanbakhsh S., Khorshiddoust A.M., Mirhashemi H., Khorrami H., and Tadayoni M. 2014. Trending Changes of the Reference Crop Water Requirement and its Associated Meteorological Variables in East Azerbaijan. *Water and Soil* 28(2): 296-306. (In Persian with English abstract)
- 10- Kay A., and Davies H. 2008. Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology* 358(3-4): 221-239.
- 11- Khorshiddoust A.M., Jahanbakhsh Asl S., Mirhashemi H., and Farzin S. 2016. Modeling and Analysis of the Combined Effects of Meteorological Variables on Atmospheric Evaporative Potential Using Structural Equation (Case Study: Tabriz City). *Water and Soil Science* 25(4/2): 257-270. (In Persian with English abstract)
- 12- Lutgens F.K., and Tarbuck E.J. 2016. *Atmosphere, The: An Introduction to Meteorology*. 13 ed.: Pearson.
- 13- O'Neill R.t. 1971. Algorithm AS 47: function minimization using a simplex procedure. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 20(3): 338-345.
- 14- Rahimikhoob A., and Mahmoodi A. 2012. Estimating Actual Evapotranspiration in a Catchment Using Artificial Neural Networks with Minimum Climatic Data Case Study: Ename Representative Catchment. *Iran-Water Resources Research* 7(4): 51-61. (In Persian with English abstract)
- 15- Rakhecha P., and Singh V.P. 2009. *Applied hydrometeorology*. Springer Science & Business Media.
- 16- Remenieras G. 1984. *Principles of Engineering Hydrology*. Vol. 1r, Iran: Ministry of Power. 400.
- 17- Ren J., Li Q., Yu M., and Li H. 2012. Variation trends of meteorological variables and their impacts on potential evaporation in Hailar region. *Water Science and Engineering* 5(2): 137-144.
- 18- Shadmani M., and Marofi S. 2011. Comparison of Some Methods for Estimation of Daily Pan Evaporation: Case Study in Kerman Region. *Journal of Water and Soil Science* 15(55): 69-84. (In Persian with English abstract)
- 19- Shi H., Li T., and Wang G. 2017. Temporal and spatial variations of potential evaporation and the driving mechanism over Tibet during 1961–2001. *Hydrological Sciences Journal* 62(9): 1469-1482.
- 20- Valizadeh Kamran H. 2014. Estimation of Potential Evapotranspiration with Estefnz Method and GIS Techniques in Eastern Azerbaijan. *Geography and Planning* 18(49): 317-334. (In Persian with English abstract)
- 21- Van Bavel C. 1966. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. *Water Resources Research* 2(3): 455-467.
- 22- Xu C.Y., and Singh V. 1998. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological Processes* 12(3): 429-442.
- 23- Yan Z., Wang S., Ma D., Liu B., Lin H., and Li S. 2019. Meteorological Factors Affecting Pan Evaporation in the Haihe River Basin, China. *Water* 11(2): 317.



Linear, Nonlinear and Hybrid Response of Potential Evaporation to Meteorological Variables (Case Study: Tabriz Synoptic Station)

H. Mirhashemi^{1*}

Received: 30-09-2019

Accepted: 10-10-2020

Introduction: Potential evaporation is the result of the combined effects of several meteorological elements, including air temperature, relative humidity (or vapor pressure for saturation), wind speed, sunshine hours and air pressure. The amount of potential evaporation depends on how these variables interact in each climate region. Potential evaporation response of each of these variables depends on the importance that variable plays in the environment. For example, in windy places, the importance of wind speeds in the potential evaporation rate increases relative to places with calm air. By changing each of these meteorological elements, while the rest of the elements react to the given change, the overall effect of these changes and reactions is reflected in the amount of potential evaporation. It is therefore obvious that the potential evaporation response to meteorological variables due to spatial and time variations of these variables is of a complex nature.

Materials and Methods: For this study, monthly data of air temperature, air pressure at sea level, wind speed, relative humidity and sunshine hours were used as independent variables and monthly data of evaporation pan at Tabriz Synoptic Station as response or dependent variable. In this study, firstly, the nonlinear and linear relationship between meteorological elements and potential evaporation were identified through Generalized Additive Model (GAM), MARSplines Model, and Generalized Linear Model (GLM), respectively. In the next step, by applying the simplex algorithm on the MARSplines model, the evaporation response gradient levels were determined individually for the meteorological variables. Also, to understand the process of pure evaporation response to each of these variables under different climatic conditions, first three weather conditions based on Tabriz Synoptic Station data were defined in three scenarios as S-1, S-2 and S-3. Then, by controlling and maintaining the meteorological variables under these three scenarios and combining the simplex algorithm with the MARSplines Model, the net evaporation reaction curves for the meteorological variables changes were evaluated.

Results and Discussion: The computational results show that in all combinations, the computational error of the GAM model is less than the GLM model. Also considering the significant variables in each model, the combination of temperature, pressure, wind speed and sunshine are considered as the best subset of the effective variables in the distribution of potential evaporation in both models. On the one hand, relative humidity in these two linear and nonlinear models, in combination with other variables, does not show a significant relationship with potential evaporation. The results of the graphs of Spline smoothing components of the GAM model show that the overall effect of temperature on the evaporation is incremental. But the unit amount of this effect increases with increasing temperature. The individual evaporation reaction against air temperature is similar to its combined reaction. It is thus clear that other meteorological variables do not play a significant role in the influence of air temperature on the evaporation gradient. The overall and hybrid effect of air pressure variations on the amount of evaporation is singular and decreasing. Instead, the individual effect of this variable on evaporation is very intense, decreasing, and partly linear. Therefore, the major influence of air pressure on evaporation in the environment is due to the performance of other variables that interfere with the relationship between these two variables. The evaporation hybrid response to wind velocity was also incremental, although the single and nonlinear evaporation response to wind velocity was not significant, but its tendency was to increase its slope with respect to wind velocity changes. Sunny hours also have a net effect on the amount of evaporation. However, the slope of the solitary effect of this variable, like wind speed, is more than its combined effect. Based on the GLM model results, except for relative humidity, the other variables have a significant linear effect on the potential evaporation. Evaporation response to changes in meteorological variables under S-1, S-2 and S-3 scenarios, while accurately determining the interaction of these variables in plotting absolute evaporation, implicitly implying the synergistic role of these variables in determining absolute evaporation. The lowest distance between the absolute values of evaporation under these three scenarios is related to air

1- Assistant Professor in Climatology, Geography Sciences Department, Lorestan University, Khorramabad, Iran
(*- Corresponding Author Email: mirhashemi.h@lu.ac.ir)

temperature, which implies less influence of air temperature than the other variables. That is, the effect of each of the meteorological variables on the amount of evaporation depends to a large extent on the relationship of this variable to other meteorological variables, if such a matter is less weighted for temperature.

Conclusion: The results of this study show that, except for air pressure, which has an increment-reducing effect on evaporation, other variables have only an incremental influence on evaporation and the intensity of this relationship has changed. This process has resulted in a nonlinear component in the relation of independent variables to evaporation. Since hybrid spline smoothing graphs determine evapotranspiration response to each of the predictor variables by eliminating the effect of other variables, therefore, consideration of the composition of these meteorological variables provides more accurate information on evaporation behavior against environmental changes. Through individually fitting evaporation against these meteorological elements, one cannot find how evaporation works against environmental changes. Comparing individual and combined evaporation responses to meteorological variables, while identifying the net effect of each of these variables, explains why evaporation responses within a given unit differ from changing meteorological variables over different times and locations.

Keywords: Evaporation, Hybrid model, Nonlinear, Scenario simplex algorithm, Smoothing component

مقاله علمی-پژوهشی

واکاوی روند تغییرات بلند مدت تراز فشار وردایست بر روی جو ایران در فصول گرم و سرد

حسین عساکره^۱ - سید ابوالفضل مسعودیان^۲ - محمد دارند^۳ - سوما زندکریمی^۴*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۰

چکیده

اندازه‌گیری فراسنج‌های مرتبط با ویژگی‌های وردایست (نظیر دما و ارتفاع) می‌تواند در شناسایی تغییرات جوی حاصل از افزایش دمای جهانی مفید باشد. تراز فشار وردایست بعضاً تحت تأثیر تغییر ویژگی‌های فیزیکی - شیمیایی دولایه‌ی وردسپهر و پوشش‌سپهر است. در پژوهش حاضر تلاش شد روند تراز فشار وردایست در ماه‌های فصل زمستان و تابستان تحت تأثیر تغییرات دمایی جو (دمای تراز پایین و بالای وردایست و نیز دمای سطحی) ایران در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ (۹۵٪ اطمینان) بررسی گردد. نتایج بررسی روند تراز فشار وردایست نشان داد که در اغلب ماه‌های مورد مطالعه و در اکثر مناطق کشور روند تغییرات تراز فشار وردایست در سطح اطمینان مورد نظر معنی‌دار نبوده است و در بین دو فصل مطالعه شده بالاترین میزان معنی‌داری روند از نظر مساحت تحت پوشش، مربوط به فصل تابستان است. نتایج بررسی روند دمای تراز پایین و بالای وردایست نیز در ماه‌های فصول تابستان و زمستان نشان داد که در بخش‌های وسیعی از جو کشور روند مشاهده شده به لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. بررسی روند تفاضل دمای دو تراز یاد شده بر روی جو ایران نیز نشان داد که روند تفاضل دمای این دو تراز بر روی جو ایران در اکثر مناطق و ماه‌ها به لحاظ آماری معنی‌دار نبوده است. در این میان روند تفاضل دمای دو تراز مورد بحث در ماه‌های فصل تابستان منفی، معنی‌دار و قابل توجه بود. بررسی روند پراش، چولگی و کشیدگی نیز نشان داد که در دو فصل مورد بررسی در اغلب مناطق روند مشاهده شده فاقد معنی آماری است.

واژه‌های کلیدی: تراز فشاری وردایست، فصل سرد، فصل گرم، ایران

مقدمه

وردایست افزایش پیدا می‌کند (۹ و ۳۰). سفرد^۵ (۳۶) الگوی را برای تبیین تغییرات وردایست معرفی کرد. بر اساس این الگو، هم‌زمان با گرمایش وردسپهر، ارتفاع وردایست نیز افزایش می‌یابد و هم‌زمان با سرمایش پوشش‌سپهر ارتفاع وردایست افزایش می‌یابد. این هم‌نوازی به‌وسیله یافته‌های تجربی برخی پژوهشگران تأیید شده است (۳۲ و ۲۹). نتایج بررسی‌های انجام شده به‌وسیله پژوهشگران مختلف نشان داده است که عوامل مختلفی بر ارتفاع وردایست و تغییرات آن اثر می‌گذارد؛ می‌توان این عوامل را به‌صورت کلی به دو گروه: نخست عوامل طبیعی (نظیر تغییرات تابش خورشیدی و هواویزهای تولید شده به‌وسیله آتش‌فشان‌ها و ...) و دوم عوامل انسانی (شامل تغییر در گازه‌های گلخانه‌ای، تغییر انسانی مؤثر بر اُزن پوشش‌سپهر و تولید هواویزها از منابع انسانی و...) تقسیم کرد. از این‌رو ارتفاع وردایست به‌طور طبیعی تحت تأثیر ویژگی‌های مکانی (مثلاً عرض جغرافیایی و ارتفاع)، زمان (نظیر فصل سال و ساعات روز) و نیز تواتر کنش‌های جوی است که شرایط آب و هوایی را تعیین می‌کند. از طرف دیگر عوامل انسانی این نظم طبیعی را می‌تواند متأثر سازد. برای مثال

مطالعات انجام شده بر روی جو طی صد سال اخیر نشان داده است که فعالیت‌های انسانی باعث ایجاد تغییراتی در جو شده است. وردایست یکی از لایه‌های جو است که اخیراً تغییرات آن به‌عنوان نشانه‌ای از تأثیر انسان بر تغییر آب و هوا معرفی شده است (۲۹، ۳۰ و ۳۲). ارتفاع وردایست تحت تأثیر دولایه‌ی بالایی و زیرین خود (وردسپهر و پوشش‌سپهر) است؛ تغییرات این دو لایه می‌تواند بر روی وردایست تأثیرگذار باشد. در صورتی که وردسپهر در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای گرم شود و پوشش‌سپهر نیز تحت تأثیر کاهش ضخامت لایه ازن سرد شود، در واکنش به این تغییرات، ارتفاع

۱- استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲- استاد اقلیم‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار گروه آب و هواشناسی، دانشگاه کردستان، ایران. عضو گروه پژوهشی مطالعات محیطی دریاچه زریبار، پژوهشکده کردستان شناسی، دانشگاه کردستان

۴- دانشجوی دکتر آب و هواشناسی (تغییر اقلیم)، دانشگاه زنجان، ایران

(Email: somazand69@gmail.com)

(*)- نویسنده مسئول

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86196

گواهی بر وجود روند کاهشی در ارتفاع وردایست است. در این پژوهش نیز همانند پژوهش قبلی بازه زمانی مورد مطالعه جهت شناسایی روند بسیار محدود است. کریمی و همکاران (۱۵) نیز به بررسی و مطالعه نوسانات ازن کلی جو در ارتباط با تغییرات وردایست بر فراز شهر اصفهان پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان دهنده‌ی افزایش ارتفاع وردایست در منطقه‌ی مورد مطالعه است. از جمله ویژگی‌های پژوهش‌های بیان شده برای ایران می‌توان به بازه‌ی زمانی کوتاه و محدوده‌ی مطالعاتی کوچک آن‌ها اشاره کرد. با توجه به این موارد می‌توان گفت که تعمیم نتایج این پژوهش‌ها به کل کشور از صحت کامل و قطعیت قابل قبولی برخوردار نیست.

با توجه به موارد بیان شده می‌توان گفت که تاکنون در سطح کشور پژوهشی در ارتباط با تغییرات بلند مدت وردایست در ارتباط با تغییرات دمای ترازهای بالا و زیرین آن به انجام نرسیده است. با توجه به اهمیت شناخت تغییرات لایه‌ی وردایست لازم است این موضوع به‌صورت دقیق مورد بررسی قرار گیرد. هدف پژوهش حاضر واکاوی تغییرات وردایست در ارتباط با تغییرات دمای ترازهای بالا و زیرین و دماهای سطحی در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ است.

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش جهت شناسایی وردایست از داده‌های دمای پایگاه مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مقیاس هوا (ECMWF) نسخه‌ی ERA-Interim برای ترازهای ۷۰۰ تا ۵۰ هکتوپاسکال با تفکیک مکانی 2.5×2.5 درجه‌ی قوسی با تفکیک زمانی روزانه در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ بهره گرفته شد. بدین ترتیب ۲۴۹۱ یاخته سرتاسر ایران‌زمین را در برگرفت. به منظور شناسایی وردایست از نمایه‌ی نرخ کاهش دما، موسوم به «وردایست دمای»، از الگوریتمی که به‌وسیله‌ی ریچلر (۲۷) بکار گرفته شده است، استفاده شد. پس از تعیین تراز فشار روزانه وردایست، میانگین‌های ماهانه تراز فشار وردایست از میانگین‌گیری روزانه تراز فشار وردایست در هر ماه برای تمامی سال‌های مورد بررسی برآورد شد.

گاهی میانگین سری‌های اقلیمی رفتار نامانا (ناایستا) را به نمایش می‌گذارند و مقادیر، پیرامون یک میانگین ثابت تغییر نمی‌کنند. در این صورت سری ناایستا در میانگین گفته می‌شود. برای مثال، وجود روند خطی (کاهشی-افزایشی) و غیر خطی (برای مثال سهمی) در مشاهدات از این نوع ناایستایی به شمار می‌آید (۲). در این شرایط می‌توان با بررسی روند میانگین به شناخت تغییرات عناصر اقلیمی در طول زمان دست یافت. برای بررسی روند تغییرات عناصر آب و هوایی معمولاً تغییرات موقعیت «توزیع فراوانی» عناصر (میانگین) در معرض توجه است. مطالعات زیادی در سطح جهان و ایران تغییرات روند عناصر اقلیمی را از طریق تغییرات میانگین مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

بررسی‌های سانتر و همکاران (۲۹) نشان داده‌اند که در بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۹ حدود ۸۰ درصد از تغییرات ارتفاع وردایست ناشی از تغییرات ازن و افزایش گازهای گلخانه‌ای به‌وسیله‌ی انسان است. علاوه بر این بررسی‌های سیدل و رندل^۱ (۳۲) بر روی داده‌های ۵۰ سال گذشته نشان داد که ارتباط بسیار قوی بین تغییرات اقلیمی و ارتفاع وردایست وجود دارد. بدین دلیل و طبق یافته‌های سوسن و سانتر (۳۰) و نیز اشمیت و همکاران^۲ (۳۱) ارتفاع وردایست در مقیاس جهانی و طی دهه‌های اخیر روندی افزایشی و دمای آن روندی کاهشی را نمایش می‌دهد.

روند بلندمدت تغییرات وردایست می‌تواند ویژگی‌های گرمایی، پوششی و نیز شیمیایی این بخش از جو را تغییر دهد. این تغییرات می‌تواند مبادلات بین وردسپهر و پوشش‌سپهر (۱۳، ۳۴، ۳۷ و ۲۵)، چرخه‌ی دایسون (۲۵، ۶، ۲۴، ۳۸ و ۱۱)، محتوای رطوبتی پوشش‌سپهر (۲۳، ۲۵ و ۱۴) و... را متأثر سازد. از این‌رو اخیراً تغییر در ویژگی‌های وردایست مورد توجه دانشمندان علوم جوی و علوم مرتبط قرار گرفته است، به‌ویژه اینکه این نوع تغییرات نشانه‌هایی از اثرات انسانی تغییر اقلیم است. نتایج بررسی رادیوسوندها (۳۳ و ۱۲) الگوهای پیش‌بینی و نتایج الگوهای واکاوی (۱۲، ۲۵ و ۲۹) به افزایش ارتفاع وردایست در سطح جهانی اشاره دارند.

آگاهی دقیق از تغییرات زمانی و تنوع مکانی وردایست برای ارزیابی مبادله جرم (نظیر آب و مواد شیمیایی) بین وردسپهر و پوشش‌سپهر ضرورتی بنیادی است و یکی از مشکلات بررسی مبادله جهانی ماده - انرژی بین وردسپهر و پوشش‌سپهر نیز از عدم شناسایی دقیق وردایست ناشی می‌شود؛ بنابراین بررسی ساختار پیچیده وردایست در مقیاس محلی جهت شناخت و ارزیابی دقیق آن ضرورتی بدیهی است (۳۳). با این حال، این مسئله فقط در مناطق کوچک و برای بازه‌های زمانی یک روزه به انجام رسیده است.

تعداد مطالعات انجام شده در ارتباط با روند و وردایی وردایست بر روی جو ایران بسیار محدود بوده است. از جمله مطالعات انجام شده می‌توان به پژوهش کیخسروی (۱۶) اشاره کرد که به تغییرات آماری-همدیدی لایه‌ی وردایست در خراسان رضوی در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ پرداخت و ارتباط وردایست با بارش را در این منطقه مورد ارزیابی قرار داد. شریفی و سام خانیاتی (۳۵) نیز در پژوهشی دیگر با استفاده از شگردها^۳ (RO) که مبتنی بر دریافت نشانک از سامانه تعیین موقعیت جهانی (GPS)^۴ بود، به بررسی ناهنجاری ارتفاع و دمای وردایست ایران در طول ۹ سال پرداخته‌اند. نتایج یافته‌های ایشان

1- Randel and Sedel

2- Schmidt et al.

3- Radio occultation

4- Global Positioning System

دهنده‌ی افزایش ارتفاع ترازهای فشار وردایست در این مکان‌ها است؛ بر عکس وجود روند منفی در چولگی نشان دهنده‌ی این است که ترازهای فشار وردایست اعداد بزرگتری را نسبت به میانگین نشان داده‌اند که به معنای کاهش ارتفاع وردایست در این مناطق است. کشیدگی نیز از جمله‌ی نمایه‌هایی می‌باشد که با استفاده از آن شکل توزیع فراوانی را مورد بررسی قرار داد. کشیدگی با ارزش مثبت گویای تمرکز داده‌ها و توزیع فراوانی نوک تیز و با ارزش منفی گویای کشیدگی بیشتر و توزیع فراوانی هموار داده‌هاست. یعنی اگر داده‌ها نسبت به توزیع متقارن پراکنده‌تر باشند، توزیع کشیده‌تر (کشیدگی زیاد) و اگر کمتر باشند، توزیع متمرکزتر (افراستگی زیاد) است (۲). وجود روند مثبت در کشیدگی به معنی بزرگ‌تر شدن اعداد و افراشته شدن توزیع فراوانی و روند منفی به معنای کشیدگی توزیع فراوانی در محدوده مورد نظر است. در پژوهشی کای و همکاران (۷) روند چولگی نمایه‌ی «pIOD» و تاثیر آن بر روی بارش استرالیا را مورد بررسی قرار داده‌اند. ساو و همکاران (۸) به بررسی روند بارش روزانه در چین پرداخته‌اند که در این پژوهش روند چولگی و کشیدگی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. چاپمن و همکاران (۱۰) به بررسی روند اقلیم محلی پرداخته‌اند در این پژوهش نیز روند چولگی، کشیدگی و پراش بررسی شده است.

به منظور ردیابی همزمانی و هم‌نمایی تغییرات ارتفاع و روند تراز فشار وردایست با روند تغییرات میانگین دمای ماهانه در تراز زیرین و بالای وردایست و روند تفاضل دمای دو لایه‌ی اطراف وردایست، عناصر مذکور نیز در بازه‌ی زمانی ۴۰ ساله مورد ارزیابی قرار گرفتند.

به‌منظور ارزیابی روند بلند مدت هریک از نمایه‌های مورد بررسی (میانگین، پراش، چولگی و کشیدگی) در ارتباط با تراز فشار وردایست، روش رگرسیون خطی با روش کمینه مربعات خطا بکار گرفته شد. در روش رگرسیون خطی جهت برآورد روند، فرض بر این است که سری‌های زمانی حاوی روند خطی هستند. اگرچه این فرض همیشه صادق نیست اما قادر است تصویر هرچند کلی از رفتار سری‌های زمانی ارائه نماید. تاکنون پژوهش‌های زیادی در سطح ایران و جهان روند عناصر اقلیمی را با استفاده از روش رگرسیون خطی به انجام رسیده است از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به پژوهش عساکره (۱) اشاره کرد که به بررسی کاربرد رگرسیون خطی در تحلیل روند دمای سالانه تبریز پرداخته است. در پژوهشی مشابه عساکره (۳) روند بارش‌های سنگین در شهر زنجان را با استفاده از رگرسیون خطی مورد ارزیابی قرار داده است.

علاوه بر این سطح معنی‌داری روند با استفاده از آماره‌ی پی (P-Value) برآورد شد. در این زمینه آماره‌ی پی (p-value) به عنوان میزان خطای رد کردن فرض صفر (فقدان روند در مشاهدات) ملاک عمل قرار گرفت. اگر این آماره کمتر از ۰/۰۵ می‌بود، روند برآورد شده از لحاظ آماری معنی‌دار است. تمامی یافته‌ها به شکل ترسیمی و در قالب نقشه‌هایی ارائه شد که در آن توزیع مکانی روند و در نتیجه

برای مثال سیدل و رندل (۳۲)، ربتز^۱ و همکاران (۲۶)، و میکونن^۲ و همکاران (۱۸) با استفاده از میانگین داده‌های عناصر اقلیمی روند تغییرات آن‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. مسعودیان و همکاران (۲۰) با استفاده از داده‌های میانگین ماهانه به واکاوی مکانی- زمانی میزان روند ماهانه‌ی درجه‌ی روز گرمایش در قلمرو ایران زمین پرداخته‌اند. خسروی و همکاران (۱۷) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی کم‌فشار پاکستان با استفاده از داده‌های میانگین ماهانه پرداخته‌اند.

در پژوهش حاضر علاوه بر تغییر موقعیت، تغییر مقیاس (پراش) و نیز شکل توزیع فراوانی (چولگی و کشیدگی) تراز فشار وردایست در هریک از پیکسل‌ها بر روی ایران بررسی می‌شود. برای محاسبه‌ی پراش، چولگی و کشیدگی از داده‌های روزانه ارتفاع وردایست استفاده شد؛ به این صورت که برای هریک از ماه‌های مورد واکاوی پراش، چولگی و کشیدگی در طول ۴۰ سال مورد مطالعه با استفاده از داده‌های روزانه استخراج گردید و در نهایت با استفاده از داده‌های استخراج شده روند پراش، چولگی و کشیدگی برای هر ماه بررسی شد. پراش به عنوان دقیق‌ترین، معتبرترین و علمی‌ترین اندازه تغییرپذیری بشمار می‌آید و اندازه کمی درباره تغییرپذیری و ناهمگونی مجموعه داده‌ها فراهم می‌کند (۲). در صورت ثبات میانگین، افزایش در تغییرپذیری موجب افزایش احتمال رخداد و قدر مطلق مقادیر انتهایی می‌شود. در این حالت، دامنه‌ی مقادیر و به تبع آن پراش بزرگ تر می‌شود. در این صورت، اگر میانگین بررسی گردد، هیچ‌گونه تغییرپذیری مشاهده نخواهد شد؛ اما واقعیت امر را می‌توان در بررسی پراش (تغییرپذیری) یافت (۳) پس با توجه به این موضوع در این پژوهش سعی شد جهت شناسایی تغییرپذیری واقعی‌تر ارتفاع وردایست، روند پراش وردایست در طول ۴۰ سال گذشته بررسی شود. در واقع افزایش پراش نشانه‌ی زیاد شدن تغییرات تراز فشار است و کاهش آن نشانه‌ی ثبات بیش تر تراز فشار وردایست هر ماه در سال‌های مختلف است. یکی از مواردی که جهت شناسایی تغییر شکل فراوانی می‌توان از آن استفاده کرد بررسی روند چولگی است. هرگاه تعداد داده‌های بالاتر از میانگین بیش از تعداد داده‌های پایین‌تر از میانگین باشد و یا برعکس تعداد داده‌های پایین‌تر از میانگین بیش از تعداد داده‌های بالاتر از میانگین باشد، داده‌ها را چوله و اگر برابر باشد داده‌ها را متقارن گویند. حالت اول چوله به چپ، حالت دوم را چوله به راست و حالت سوم را توضیع متقارن می‌گویند. در واقع چولگی، میزان انحراف شمار داده‌ها را به یک حاشیه نشان می‌دهد (۲). بنابراین وجود روند در مقدار چولگی می‌تواند به معنای تغییر توزیع متغیر مورد نظر باشد. وجود روند مثبت در چولگی ترازهای فشار وردایست می‌تواند به این معنی باشد که با گذشت زمان اعداد ترازهای فشار وردایست در موقعیت مورد نظر نسبت به میانگین کوچک‌تر شده و این نشان

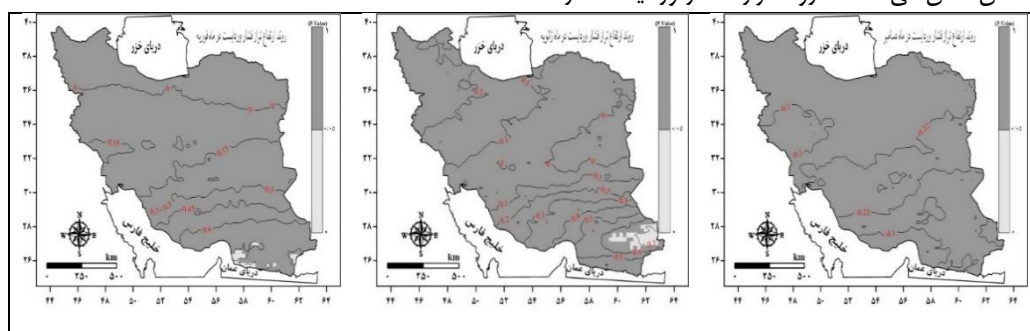
1- Rebetez
2- Mikkonen

تغییرات زمانی - مکانی، ارایه شد.

بحث

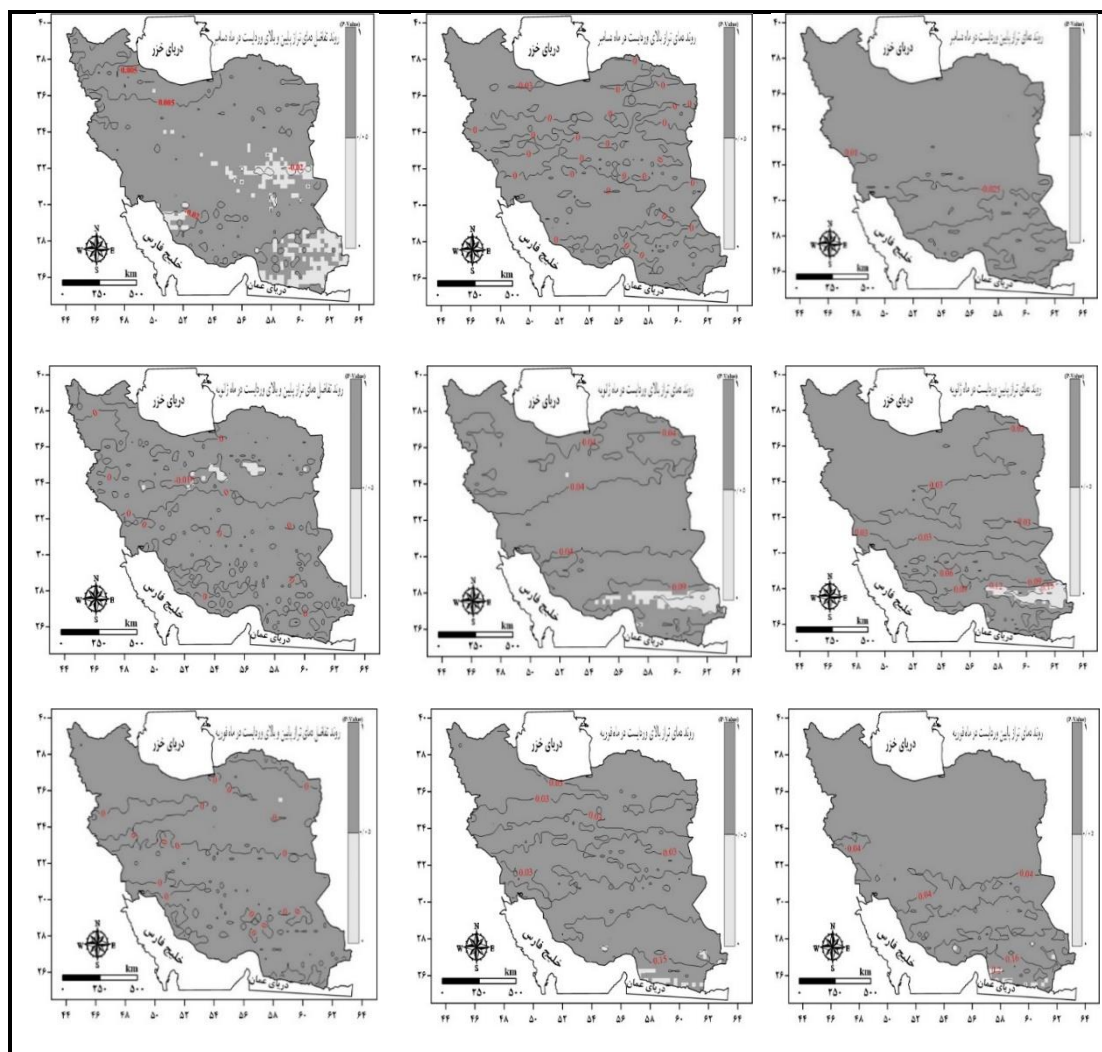
در شکل ۱ روند میانگین ترازهای فشار وردایست بر روی جو ایران برای ماه‌های فصل زمستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ ارائه شده است. در این شکل روند بلندمدت به‌وسیله‌ی خطوط هم‌چند نشان داده شده است. پس زمینه‌ی طیف سفید تا خاکستری، معناداری روند، در سطح ۹۵٪ اطمینان را به نمایش می‌گذارند. براساس نقشه‌های ترسیم شده می‌توان دریافت که شیب روند تغییرات ترازهای فشار وردایست در ماه‌های فصل زمستان در عرض‌های جغرافیایی پایین شدیدتر از عرض‌های جغرافیایی بالا است. در ماه ژانویه در تمام بخش‌های ایران به‌جز بخش‌هایی از شرق کشور که دارای روند منفی و قسمت‌هایی که فاقد روند هستند، عموماً روند بلند مدت تغییرات ترازهای فشار وردایست مثبت بوده است. الگوی توزیع مکانی روند تغییرات تراز فشاری وردایست در ماه فوریه مشابه ماه ژانویه است، با این تفاوت که در ماه فوریه بخش‌هایی از شمال‌شرق و شمال‌غرب کشور روند منفی را تجربه کرده‌اند. در این ماه از عرض جغرافیایی ۳۵ درجه به سمت عرض‌های پایین‌تر تراز فشاری وردایست با روند مثبت مواجه بوده است و از عرض جغرافیایی ۳۵ درجه به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر بخش‌هایی از کشور فاقد روند و بخش‌هایی از آن نیز روند منفی را در تراز فشاری وردایست نشان می‌دهند. در ماه دسامبر شرایط با دو ماه ژانویه و فوریه کاملاً متفاوت است؛ در این ماه تراز فشاری وردایست در کل کشور روند منفی را تجربه کرده است. این وضعیت نشان دهنده‌ی افزایش ارتفاع وردایست در قیاس با ماه‌های ژانویه و فوریه است؛ با توجه به این موضوع نتایج به‌دست آمده برای ماه‌های فصل زمستان نشان می‌دهد که روند تراز فشار وردایست در

ماه دسامبر در کل ایران در سطح اطمینان ۹۵٪ فاقد معنی آماری است. در ماه‌های ژانویه و فوریه نیز به‌جز بخش‌هایی از جنوب‌شرق کشور در دیگر مناطق ایران روند به‌دست آمده فاقد معنی آماری است. بررسی روند دمای تراز پایین و بالای وردایست برای ماه‌های فصل زمستان که در شکل ۲ نمایش داده شده است، بر اساس نقشه‌های ترسیم شده می‌توان مشاهده کرد که در ماه دسامبر دمای تراز پایین وردایست در تمام مناطق به‌جز بخش‌هایی از غرب کشور در طول این ۴۰ سال دارای روند مثبت بوده است. واکاوی آماره P نشان داد که روند در تراز زیرین و بالای وردایست به لحاظ آماری معنی‌دار نیست. این وضعیت برای ماه‌های ژانویه و فوریه نتایج مشابهی به‌دست داد. در ماه ژانویه و فوریه در بخش‌های محدودی از جنوب-شرق کشور معنی‌داری روند دمای ترازهای زیرین و بالایی تأیید شده است. بررسی روند تفاضل دمای تراز پایین و بالای وردایست در ماه‌های فصل زمستان نشان داد که در ماه دسامبر از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه شمالی به طرف عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر، روند افزایشی و از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه به سمت عرض‌های جغرافیایی جنوبی‌تر روند تفاضل این دو لایه کاهش می‌یابد، اما در بخش‌های محدودی از محدوده مورد مطالعه (شامل بخش‌های محدودی از جنوب‌غرب، جنوب‌شرق، شرق و بخش‌هایی از مناطق مرکزی کشور) این روند به لحاظ آماری معنی‌دار بوده است. با توجه به موارد بیان شده و همان‌گونه که در نقشه‌های ترسیم شده برای روند ارتفاع ترازهای فشار وردایست نیز مشاهده شد هم دمای دو تراز اطراف وردایست و هم خود ترازهای فشار وردایست در اکثر مناطق هیچ‌گونه روندی را تجربه نکرده‌اند.



شکل ۱- روند تراز فشار وردایست بر روی جو ایران برای ماه‌های فصل زمستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

Figure 1- Trends of Tropopause pressure level over the atmosphere of Iran in the winter months during the period 1979 to 2018



شکل ۲- روند دمای تراز پایین، دمای تراز بالای وردایست و تفاضل دمایی دو تراز بر روی جو ایران برای ماه‌های فصل زمستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

Figure 2- Temperature trends of upper and lower levels of the tropopause and temperature difference of the two levels over the atmosphere of Iran on the winter months during the period 1979 to 2018

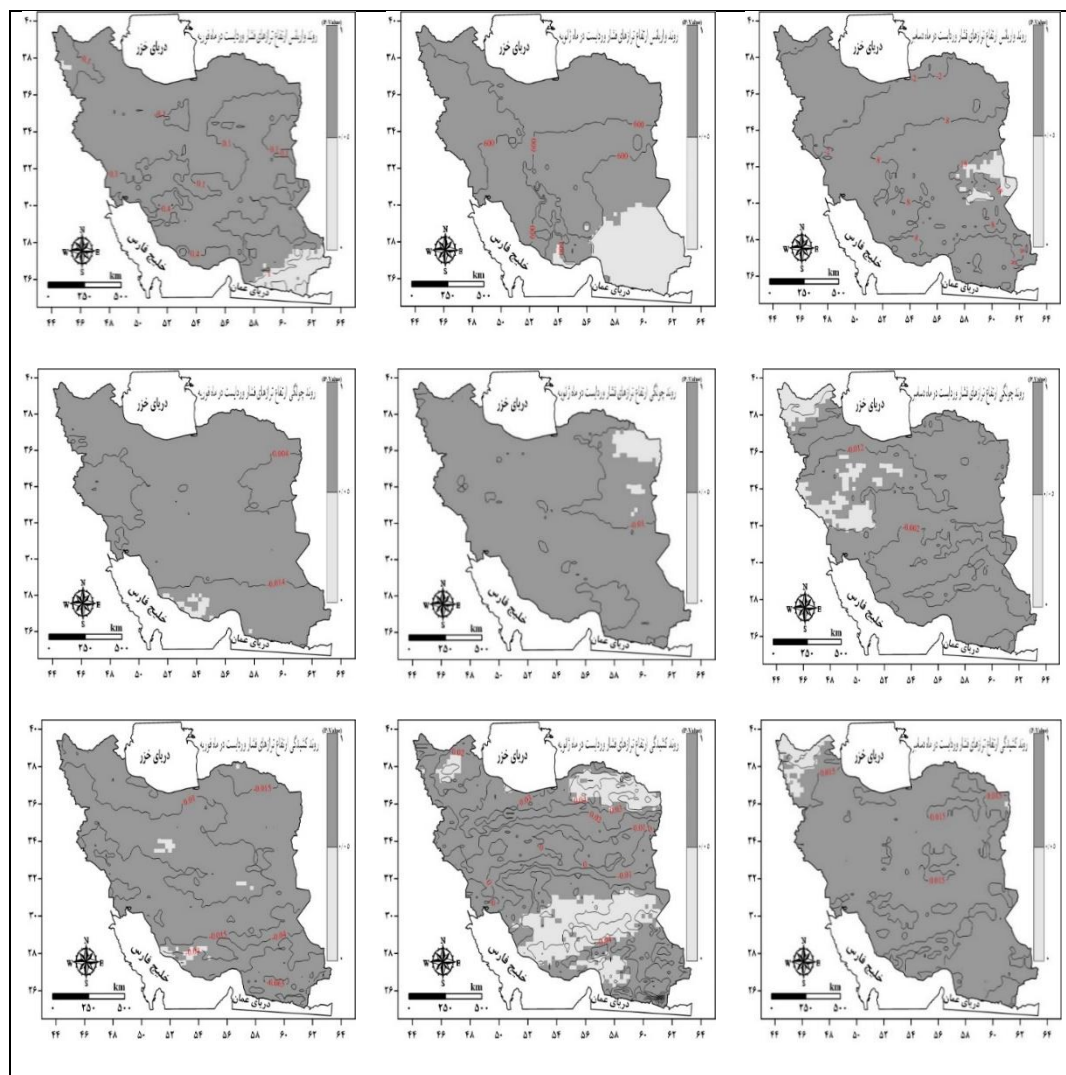
وردایست، روند بلند مدت پراش تراز ماهانه فشار (به عنوان تغییرات درون ماه) برآورد و مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که در ماه‌های فصل زمستان در اکثر مناطق روند مشاهده شده فاقد معنی‌داری است. در ماه ژانویه نیز روند پراش ترازهای فشار وردایست در بخش‌هایی از شرق محدوده مورد مطالعه معنی‌دار است. در این مناطق روند مشاهده شده مثبت است؛ این ویژگی به معنای افزایش تباین زمانی ترازهای فشار وردایست نسبت به میانگین است و گویای تغییرات میان ماهانه پراش است؛ کاهش روند (مقادیر منفی بر روی نقشه) نشانه تمایل مقادیر تراز فشار ماهانه (ماه‌های متناظر در سال‌های مختلف) به ثبات است. در ماه ژانویه در مناطق کاملاً متفاوت با ماه دسامبر روند پراش ترازهای فشار

با توجه به موارد بیان شده می‌توان گفت که احتمالاً تاثیر تغییرات اقلیمی که در مطالعات پرشمار بررسی و تایید شده‌است، مربوط به ترازهایی زیرین و رده‌سپهر باشد. همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود روندهای دمای معنی‌دار تراز پایین و بالای وردایست از نظر مکانی با روند معنی‌دار ترازهای فشار وردایست همخوانی ندارد و با توجه به این موضوع نمی‌توان روندهای معنی‌دار ترازهای فشار وردایست را تحت تاثیر روند تغییرات دمای دو تراز اطراف آن دانست. همان‌گونه که در بخش‌های قبلی مشاهده شد تراز فشار و دمای دو تراز اطراف وردایست در فصل زمستان در اغلب مناطق و ماه‌ها روند معنی‌داری را نشان ندادند. به همین دلیل در این بخش از پژوهش به منظور بررسی تغییرات بلند مدت افت و خیز تراز فشار

غرب روند مشاهده شده منفی و در نواحی مرکز مثبت است. این ویژگی به معنی بزرگتر شدن اعداد فشار در مناطق مرکزی و کوچک تر شدن آنها در جنوب غرب کشور است.

وارسی و بررسی روند بلند مدت تغییرات تراز فشار وردایست در ماه های فصل تابستان نیز نشان داد که در ماه جون بر روی کل ایران به جز بخش های کوچکی از شمال غرب کشور روند مثبت رخ داده است. این روند بر روی ارتفاعات کرمان شدیدتر از مناطق دیگر است. در ماه جولای نیز به جز بخش هایی از جنوب و جنوب غرب کشور و نیز بخش هایی از شمال شرق و شمال غرب کشور که روند منفی را در ترازهای فشار وردایست نشان می دهند، دیگر مناطق کشور روند مثبت ترازهای فشاری وردایست را تجربه کرده اند. در ماه آگوست نیز در بخش های قابل توجهی از شمال، شمال شرق و شمال غرب کشور روند منفی در ارتفاع ترازهای فشار وردایست قابل مشاهده است. در این ماه به جز این مناطق در دیگر بخش های کشور روند مثبت در ترازهای فشار وردایست مشاهده می شود. همان گونه که در شکل ۴ می توان مشاهده کرد، بالاترین روند مثبت بر روی ارتفاعات زاگرس و کرمان قرار گرفته است.

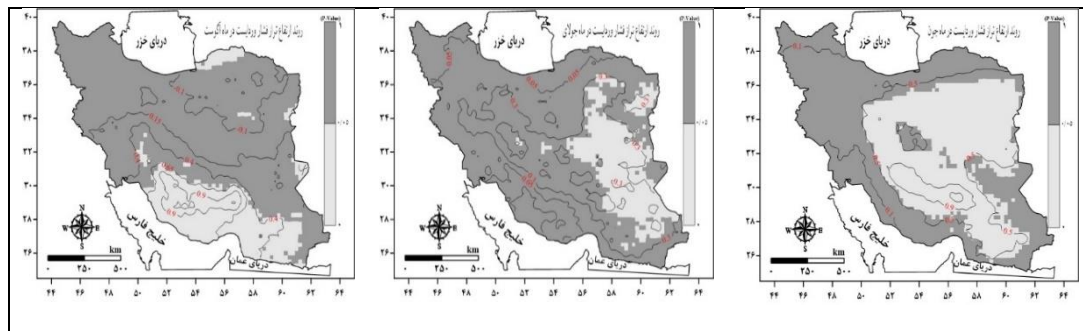
وردایست معنی دار است. روند پراش ترازهای فشار وردایست در ماه فوریه نیز در بخش هایی از جنوب شرق کشور معنی دار است. در این مناطق روند مشاهده شده مثبت است. این امر به معنی زیاد شدن تغییرات ترازهای فشار وردایست در محدوده مورد مطالعه طی بازه ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ است. در ماه فوریه در همان محدوده ی جغرافیایی که روند ترازهای فشار وردایست معنی دار بود، روند پراش نیز مثبت و معنی دار است. بر اساس نتایج به دست آمده برای روند چولگی ترازهای فشار وردایست در بازه ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ که در شکل ۳ نمایش داده شده است، مشخص شد که روند چولگی ترازهای فشار وردایست در ماه دسامبر در بخش هایی از غرب و شمال غرب کشور معنی دار است. در بخش هایی از این مناطق روند مشاهده شده مثبت و در بخش هایی از آن منفی است. در مناطقی که روند چولگی مثبت است به معنی تکرار افزون تر ترازهای فشار بزرگ مقدار وردایست در این مناطق نسبت به میانگین (افزایش ارتفاع ترازهای فشار وردایست) است. اعداد منفی روند چولگی به معنی بسامد بیشتر مقادیر کم برای ارتفاع و ترازهای فشار وردایست است. همان گونه که قبلاً گفته شد وجود روند مثبت در کشیدگی به معنی بزرگتر شدن دامنه اعداد مربوط به تراز فشار وردایست است. این امر گویای این واقعیت است که در کشیدگی تراز فشار وردایست اگرچه مشاهدات متقارن اند، اما در قیاس با توزیع بهنجار در دامنه بزرگتری قرار می گیرند. افراشته شدن توزیع فراوانی مشاهدات و روند منفی آنها به معنای محدودتر شدن دامنه اعداد در قیاس با توزیع بهنجار است. در ماه دسامبر کشیدگی در بخش هایی از شمال غرب کشور مثبت و معنی دار است؛ این موضوع می تواند به معنی کاهش ارتفاع ترازهای فشار وردایست در این مناطق باشد. در ماه ژانویه نیز روند کشیدگی ترازهای فشار وردایست در بخش هایی از شمال غرب و شمال شرق مثبت و معنی دار است؛ در همین ماه در بخش هایی از جنوب، جنوب شرق و شرق محدوده مورد مطالعه نیز روند کشیدگی ترازهای فشار وردایست منفی و معنی دار است؛ این در حالی است که در ماه فوریه کشیدگی ترازهای فشار وردایست کمترین میزان معنی داری را به نمایش گذاشته و این معنی داری در بخش های از جنوب غرب و مناطق مرکزی کشور قابل مشاهده است. در جنوب



شکل ۳- روند پراش، چولگی و کشیدگی ترازهای فشار وردایست بر روی جو ایران برای فصل زمستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸
 Figure 3- Trends of variance, skewness, and kurtosis of Tropopause pressure levels on the atmosphere of Iran on the winter months during the period 1979 to 2018

وردایست در اکثر مناطق دارای روند مثبت است، اما این روند در کل ایران در سطح ۹۵٪ اطمینان معنی‌دار نیست. معنی‌داری آماری روند دما در ماه جون در دو تراز در بخش‌هایی از مناطق مرکزی، ارتفاعات زاگرس، شرق و شمال‌شرق کشور مشاهده شد. در ماه جولای نیز در بخش‌هایی از تراز پایین وردایست هیچ‌گونه روندی مشاهده نشد و در بخش‌هایی از شرق کشور روند مشاهده شده منفی است و در دیگر مناطق روند دمای تراز پایین وردایست مثبت است. در همین ماه در تراز بالای وردایست نیز به‌جز بخش‌هایی پراکنده‌ای از کشور که فاقد روند بودند در دیگر مناطق می‌توان روند مثبت ولی فاقد معنی آماری را مشاهده کرد؛ فقط در بخش‌هایی از شمال‌شرق، شرق، جنوب‌شرق و بخش‌هایی از مناطق مرکزی کشور می‌توان معنی‌داری آماری روند را مشاهده کرد.

تفاوتی که در روند ارتفاع وردایست در ماه‌های فصل تابستان نسبت به فصل زمستان وجود دارد این است که در این فصل بخش‌های قابل توجهی از کشور تراز فشار وردایست دارای روند معنی‌داری است. در ماه جون بخش‌های قابل توجهی از ایران (در بخش‌هایی از مناطق مرکزی، شرق، شمال‌شرق و جنوب‌شرق کشور) روند تغییرات مثبت و معنی‌دار بوده است. در ماه جولای نیز در همان مناطقی که برای ماه جون بیان شد، اما در وسعت محدودتری روند مثبت و معنی‌دار بوده است. در ماه اوت نیز بخش‌هایی از جنوب‌شرق، جنوب، جنوب‌غرب کشور نیز روند مثبت و معنی‌دار مشاهده شد. روند دمای تراز پایین، بالای وردایست و روند تفاضل دمایی دو تراز در فصل تابستان در شکل ۵ قابل مشاهده است با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که در ماه جون دمای تراز پایین و بالای



شکل ۴- روند تراز فشاری وردایست بر روی جو ایران برای فصل تابستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

Figure 4- Trends of Tropopause pressure level trend over the atmosphere of Iran in the summer months during the period 1979 to 2018

محدوده مورد مطالعه غالباً مثبت و معنی‌دار است. در ماه جولای نیز همانند ماه جون در بخش‌هایی روند پراش مثبت و در سطح معنی‌داری تعریف شده، معنی‌دار است. در ماه آگوست همه مناطق توأم با روند معنی‌دار پراش، روند مشاهده شده مثبت نیست؛ در بخش‌هایی از شمال شرق محدوده مورد مطالعه روند پراش منفی و در دیگر بخش‌ها مثبت است. در ماه جولای نیز همانند دیگر ماه‌هایی که تاکنون بررسی شده‌اند روند چولگی ترازهای فشار وردایست در بخش‌های محدودی از کشور منفی و معنی‌دار است. در ماه آگوست روندهای معنی‌دار مشاهده شده برای چولگی ترازهای فشار وردایست کاملاً متفاوت با دو ماه قبل از خود است؛ در این ماه در مناطقی که روند چولگی معنی‌دار است، روند مشاهده شده مثبت است. در ماه‌های مارس و می در مناطق بسیار محدودی از کشور روند کشیدگی ترازهای فشار وردایست منفی و معنی‌دار است. در ماه جولای نیز همانند ماه جون روند کشیدگی در بخش‌های محدودی از کشور منفی و معنی‌دار است. در ماه آگوست روندهای معنی‌دار مشاهده شده برای کشیدگی ترازهای فشار وردایست کاملاً متفاوت با دو ماه دیگر است و در مناطق توأم با روند معنی‌دار، مقادیر روند افزایشی است.

نتیجه‌گیری

ارتفاع وردایست تحت تأثیر دولایه‌ی وردسپهر و پوشش سپهر است و تغییرات این دو لایه می‌تواند بر روی وردایست تأثیرگذار باشد. در صورتی که وردسپهر در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای گرم شود و پوشش سپهر نیز تحت تأثیر کاهش ازن سرد شود در واکنش به این تغییرات ارتفاع وردایست افزایش پیدا می‌کند (۳۰). در این پژوهش سعی شد تا روند تراز فشار وردایست در ارتباط با مساله‌ی تغییر اقلیم بر روی جو ایران در فصول تابستان و زمستان بررسی شود. با توجه به این‌که ارتفاع وردایست در ارتباط با دمای ترازهای نزدیک آن است در

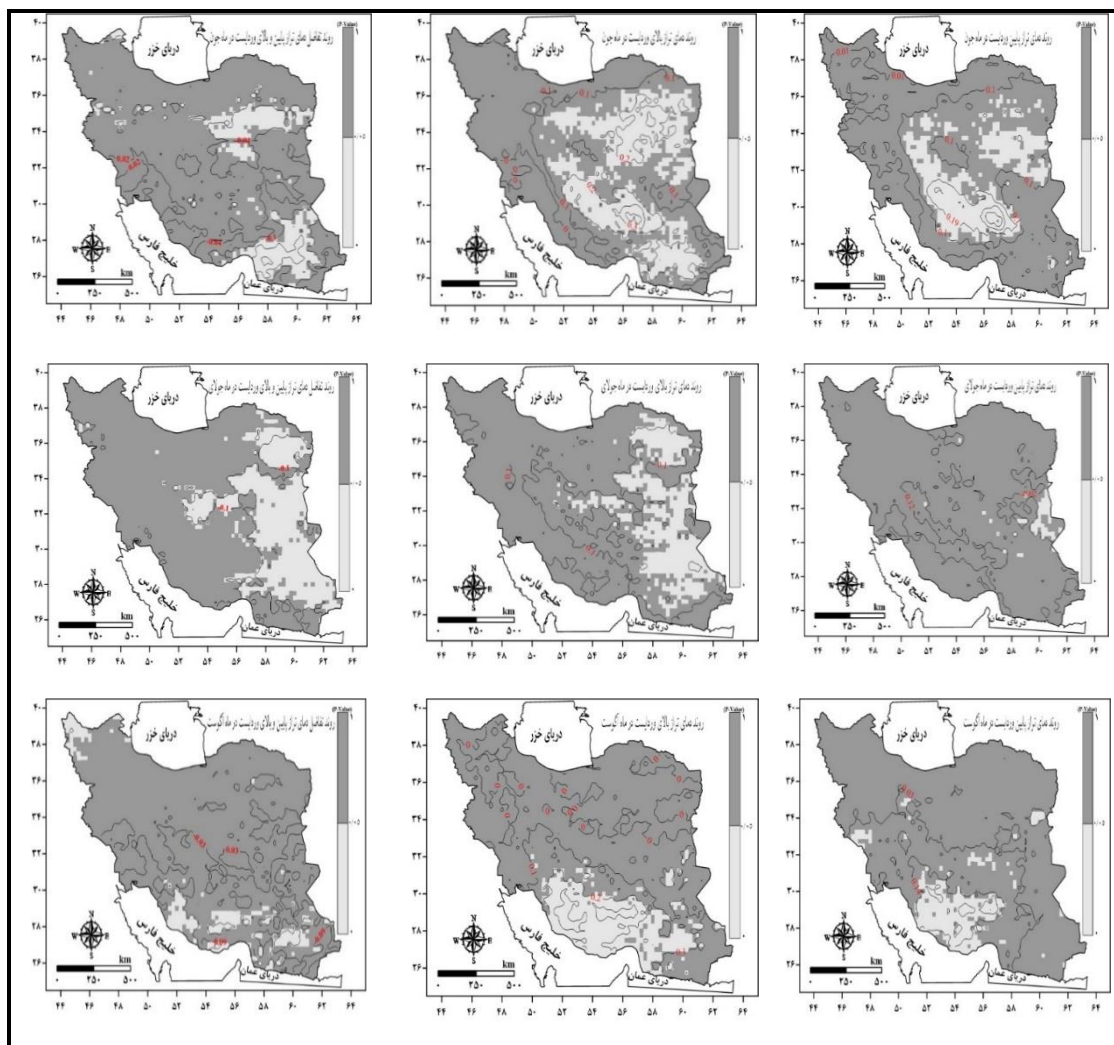
در تراز پایین وردایست روند دما در ماه جولای در بخش‌هایی از شرق کشور معنی‌دار است؛ در حالی که در تراز بالای وردایست مناطق توأم با روند معنی‌دار قابل توجه‌تر هستند. در ماه آگوست در تراز پایین وردایست دما در کل محدوده مورد مطالعه دارای روند مثبت است. این روند در بخش‌هایی از ارتفاعات زاگرس، بخش‌هایی از جنوب غرب کشور، بخش‌هایی از مناطق مرکزی و بخش‌هایی از جنوب کشور در سطح ۹۵٪ اطمینان معنی‌دار است. در تراز بالای وردایست نیز در همین ماه از عرض جغرافیایی ۳۲ درجه به سمت عرض‌های بالا، روند صفر است و پایین‌تر از این عرض جغرافیایی روند مشاهده شده مثبت است. طی ماه آگوست در تراز بالای وردایست، مناطق دارای روند معنی‌دار در قیاس با تراز پایین آن پهنه‌های گسترده‌تری را پوشش می‌دهد. در ماه جون بررسی روند تفاضل دمای تراز پایین و بالای وردایست بر روی جو ایران نشان داد که در اکثر مناطق کشور روند تفاضل مثبت بود و در بخش‌هایی از جنوب شرق کشور نیز روند مشاهده شده منفی است. در این ماه به جز بخش‌هایی از شمال شرق، جنوب شرق و شمال غرب کشور که معنی‌داری روند را در سطح ۹۵٪ اطمینان نشان می‌دهد، در دیگر مناطق روند تفاضل فاقد معنی آماری است. در ماه جولای در بخش‌های قابل توجهی از کشور روند تغییرات تفاضل دو لایه صفر است. در دیگر مناطق کشور روند منفی و در سطح ۹۵٪ اطمینان معنی‌دار نیست. تفاضل دمایی نسبت به ماه‌های قبل، از نصف‌النهار ۵۴ درجه به سمت شرق روندی معنی‌دار را نشان می‌دهد. در ماه آگوست نیز در بخش‌های قابل توجهی از محدوده مورد مطالعه روند تفاضل دمایی فاقد معنی‌داری است و در پایین‌تر از عرض جغرافیایی ۳۳ درجه روند در کل محدوده منفی و در بخش‌هایی از محدوده یاد شده روند مشاهده شده معنی‌دار است.

در شکل ۶ روند پراش، چولگی و کشیدگی ترازهای فشار وردایست در ماه‌های فصل تابستان نیز بر روی جو ایران نمایش داده شده است. روند پراش ترازهای فشار وردایست در ماه جون در مقایسه با تمام ماه‌هایی که تاکنون بررسی شد در بخش‌های قابل توجهی از

حالی است که در ماه‌های فصل تابستان در بخش‌های قابل توجهی از کشور روند تغییرات ترازهای فشار وردایست مثبت و معنی‌دار است. نتایج بررسی روند دمای تراز پایین وردایست نیز در ماه‌های مورد واکاوی نشان داد که در ماه دسامبر در هیچ بخشی از کشور روند مشاهده شده، معنی‌دار نیست، اما در دیگر ماه‌های مورد واکاوی در بخش‌های محدودی از کشور می‌توان معنی‌داری روند را مشاهده نمود.

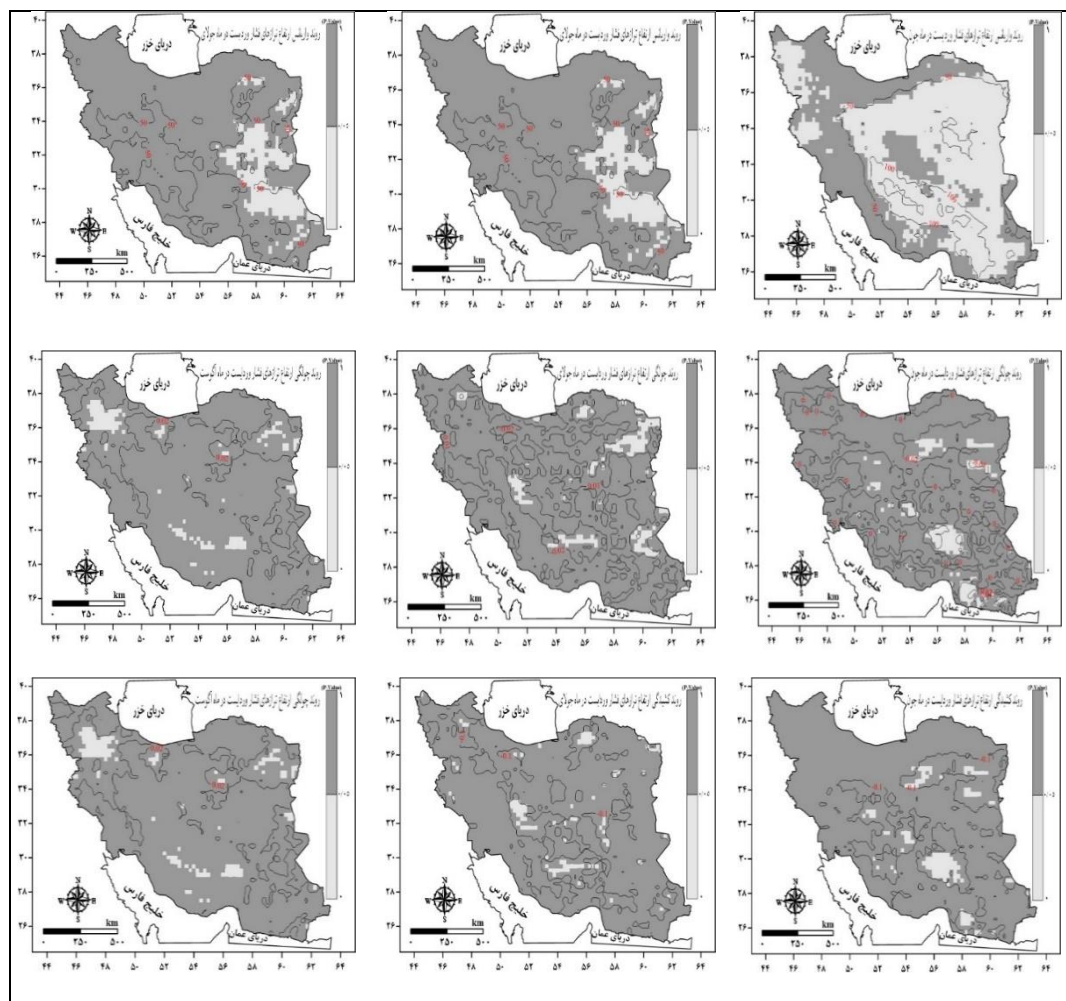
این پژوهش تغییرات دمای تراز پایین و بالای وردایست نیز بررسی شد.

نتایج بررسی روند ترازهای فشار وردایست در فصول مختلف سال نشان داد که در اغلب ماه‌های مورد واکاوی و اکثر مناطق کشور روند تغییرات تراز فشار وردایست معنی‌دار نیست؛ به این صورت که در فصل زمستان در ماه دسامبر وردایست در هیچ بخشی از کشور معنی‌داری را تجربه نکرده و روند معنی‌دار مشاهده شده در دو ماه ژانویه و فوریه نیز محدود به بخش‌هایی از جنوب شرق کشور است. این در



شکل ۵- روند دمای تراز پایین وردایست، دمای تراز بالای وردایست و روند تفاضل دمایی دو تراز بر روی جو ایران برای ماه‌های فصل تابستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

Figure 5- Temperature trends of upper and lower levels of the tropopause and temperature difference of the two levels over the atmosphere of Iran in the summer months during the period 1979 to 2018



شکل ۶- روند پراش، چولگی و کشیدگی ترازهای فشار وردایست بر روی جو ایران برای کل ماه‌های فصل تابستان طی بازه‌ی زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸

Figure 6- Trend of variance, skewness, and kurtosis Tropopause pressure levels over the atmosphere of Iran in the summer months during the period 1979 to 2018

بخش‌های بیشتری از کشور مشاهده شده‌است. در تراز بالای وردایست در دو فصل مورد مطالعه در تمام مناطقی که روند معنی‌دار است روند دما مثبت بود.

با توجه به موارد بیان شده انتظار می‌رفت که در مکان‌ها و ماه‌هایی که روند دمای وردسپهر افزایشی است و روند افزایشی دمای پوشن سپهر نیز می‌بایست منجر به کاهش تراز فشار وردایست شود، اما با توجه به این موضوع که روندهای معنی‌دار اتفاق افتاده برای دما در دو تراز اطراف وردایست و روندهای معنی‌دار مشاهده شده برای تراز فشار وردایست از نظر مکانی با هم همخوانی ندارند، در مورد ارتباط روند تغییرات دمای دو لایه اطراف وردایست با روند تغییرات تراز فشار وردایست در مقیاس ماهانه به صورت قطعی نمی‌توان نظر داد. بررسی روند تفاضل دمایی دو تراز اطراف وردایست بر روی جو ایران نیز نشان داد که روند تفاضل بر روی جو ایران در اکثر مناطق و

در فصل زمستان فقط در ماه ژانویه در بخش‌هایی از جنوب شرق کشور دمای تراز پایین وردایست معنی‌داری را تجربه کرده است. این در حالی است که در فصل تابستان در بخش‌های قابل توجهی از کشور روند دمای تراز پایین وردایست معنی‌دار بود و در تمام ماه‌های مورد واکاوی به جز ماه جولای در مناطقی که روند دمای تراز پایین وردایست (به عنوان بخشی از وردسپهر) مثبت و معنی‌دار بود. در ماه‌هایی که روند دمای این تراز معنادار بوده است، دمای بخش‌های بالایی وردسپهر در طول دوره مورد مطالعه روند افزایشی داشته است. بررسی تغییرات دما در تراز بالای وردایست (به عنوان بخشی از پوشن سپهر) در محدوده مورد مطالعه نشان داد که روند دما در این بخش از جو همانند تراز پایین وردایست در بخش‌های وسیعی از کشور و اغلب ماه‌های مورد بررسی فاقد معنی آماری است. میزان معنی‌داری روند همچنان در فصل تابستان نسبت به فصل زمستان در

ماه‌ها از معنی‌داری آماری برخوردار نیست.

بالاترین معنی‌داری روند تفاضل دمایی را می‌توان در ماه‌های فصل تابستان مشاهده کرد. در ماه‌هایی که روند تفاضل دمایی معنی دار بود روند مشاهده شده منفی بود. این موضوع به معنی کاهش اختلاف دمای تراز پایین و بالای وردايست در مناطق یاد شده است.

همان‌گونه که بیان شد در برخی از پارامترهای بررسی شده «تغییرات بلند مدت (روند)» در میانگین‌های ماهانه مشاهده می‌شود و در برخی از آن‌ها روند در میانگین سالانه قابل مشاهده است اما باید به این موضوع توجه کرد که میانگین‌گیری باعث حذف و ظهور برخی مشخصه‌های آماری می‌شود و لازم است جهت به دست آوردن اطلاعات دقیق از روند پدیده‌های مورد نظر بررسی‌های به‌صورت توأم جزئی و کلی (روزانه و حتی ساعتی تا سالانه و دهه‌ای) صورت گیرد تا به‌صورت قطعی در مورد روند این پدیده‌ها نظر داد.

بررسی روند پراش در ماه‌های زمستان نشان داد که درصد قابل توجهی از کشور در این فصل هیچ‌گونه روند معناداری را تجربه نکرده است و فقط در بخش‌هایی از جنوب‌شرق و شرق کشور روند پراش

مثبت و معنی‌دار است. این در حالی است که در ماه‌های فصل تابستان برخلاف فصل زمستان در بخش‌های قابل توجهی از کشور روند پراش معنی‌دار است. این وضعیت همانند فصل زمستان با روند مثبت مثبت مشخص می‌شود. نتایج به دست آمده برای روند چولگی نیز مشابه پراش است و در اغلب مناطق روند مشاهده شده فاقد معنی آماری و در مناطقی که روند معنی‌دار بود روند مشاهده شد منفی است. این در حالی است که برخلاف روند پراش در فصل تابستان روند چولگی در بخش‌هایی ناچیزی از کشور معنی‌داری را تجربه کرده است. نتایج بررسی روند کشیدگی نیز نشان داد که بالاترین پهنه‌ی دارای معنی‌داری روند در فصل زمستان مربوط به ماه ژانویه است. در این ماه روند مشاهده شده در بخش‌هایی از جنوب کشور منفی و در شمال‌شرق مثبت بود. در دو ماه دیگر فصل زمستان اغلب مناطقی که دارای روند معنی‌داری بوده‌اند، روند مشاهده شده مثبت بود. در فصل تابستان نتایج به دست آمده برای کشیدگی مشابه چولگی است و در بخش‌های پراکنده و محدود از جو کشور روند مشاهده شده معنی‌دار است.

منابع

- Asakereh H. 2008. Application of linear regression in analysis of Tabriz annual temperature trend. *Geographical Research Journal* 22(4): 3-26. (In Persian with English abstract)
- Asakereh H. 2011. Fundamentals of statistical climatology. Zanjan University. (In Persian)
- Asakereh H. 2012. Analysis of Heavy Precipitation Trends in Zanjan City. *Journal of Geograohy and Planning* 16(4): 73-88. (In Persian with English abstract)
- Asakereh H. 2017. Fundamentals of Research in Climatology. Zanjan University. (In Persian)
- Azarakshi M., Farzad M. J., Eslah M., and Sahabih H. 2013. An investigation on trends of annual and seasonal rainfall and temperature in different. *Climatologically Regions of Iran* 1-16. (In Persian with English abstract)
- Butchart N., Scaife A.A., Bourqui M., De Grandpré J., Hare S.H.E., Kettleborough J., and Shindell D. 2006. Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer–Dobson circulation: *Climate Dynamics* 27(7-8): 727-741.
- Cai W., Cowan T., and Sullivan A. 2009. Recent unprecedented skewness towards positive Indian Ocean Dipole occurrences and its impact on Australian rainfall. *Geophysical Research Letters* 36(11).
- Cao X., Liang Y., Zhao L., and Le H. 2013. Mobility of Pb, Cu, and Zn in the phosphorus-amended contaminated soils under simulated landfill and rainfall conditions. *Environmental Science and Pollution Research* 20(9): 5913-5921.
- Change, IPCC Climate. "The physical science basis." 2007.
- Chapman S.C., Stainforth D.A., and Watkins N.W. 2013. On estimating local long-term climate trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371(1991): 20120287.
- Gottelman A., Hoor P., Pan L.L., Randel W., Hegglin M.I., and Birner T. 2011. The extratropical upper troposphere and lower stratosphere: *Reviews of Geophysics* 49(3).
- Highwood E.J., Hoskins B.J., and Berrisford P. 2000. Properties of the Arctic tropopause. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 126(565): 1515-1532.
- Holton J.R., Haynes P.H., McIntyre M.E., Douglass A.R., Rood R.B., and Pfister L. 1995. Stratosphere-troposphere exchange. *Reviews of Geophysics* 33(4): 403-439.
- Homeyer C.R., Pan L.L., Dorsi S.W., Avallone L.M., Weinheimer A.J., O'Brien A.S., and Campos T.L. 2014. Convective transport of water vapor into the lower stratosphere observed during double-tropopause events. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 119(18).
- Karimi M., Tabatabayan A., Shafi H., and Shokrallahi, M. 2005. Investigation of ozone fluctuations with tropopause changes (Verdeist) over Isfahan, 12th Conference Geophysics, Tehran: Geology organization. (In Persian)

- 16- Keikhosravi G. 2015. Synoptic analysis-statistical height of the tropopause layer as a profile of climate change in Khorasan Razavi. *Journal of Applied Climatology* 2(2): 33-48. (In Persian with English abstract)
- 17- Khosravi M., Hamidianpour M., and Kurdi Tamin S. 2016. A Study of Tempo Spatial Variation of Pakistan Low Pressure. *Climatological Research* 27: 25-42. (In Persian with English abstract)
- 18- Makowski K., Wild M., and Ohmura A. 2008. Diurnal temperature range over Europe between 1950 and 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics* 8(21): 6483-6498.
- 19- Masoodian S.A. 2004. temperature trends in iran during the last half century. *Geography and Development* 2(3): 89-106. (In Persian with English abstract)
- 20- Masoodian S.A., Ebrahimi R., and Yarahmadi E. 2015. Time-space Analysis of the Monthly Heating Degree Days in Iran. *Journal of Geography and Regional Development* 12(23). (In Persian with English abstract)
- 21- Mikkonen S., Laine M., Mäkelä H. M., Gregow H., Tuomenvirta H., Lahtinen M., and Laaksonen A. 2015. Trends in the average temperature in Finland, 1847–2013. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 29(6): 1521-1529.
- 22- Mohanakumar K. 2008. *Stratosphere troposphere interactions: an introduction*: Springer Science & Business Media.
- 23- Mote P.W., Rosenlof K.H., McIntyre M.E., Carr E.S., Gille J.C., Holton J.R., and Waters J.W. 1996. An atmospheric tape recorder: The imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 101(D2): 3989-4006.
- 24- Oberländer-Hayn S., Gerber E. P., Abalichin J., Akiyoshi H., Kerschbaumer A., Kubin A., and Morgenstern O. 2016. Is the Brewer-Dobson circulation increasing or moving upward?. *Geophysical Research Letters* 43(4): 1772-1779.
- 25- Randel W.J., and Jensen E.J. 2013. Physical processes in the tropical tropopause layer and their roles in a changing climate. *Nature Geoscience* 6(3): 169.
- 26- Rebetez M., and Reinhard M. 2008. "Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004." *Theoretical and Applied Climatology* 91(1-4): 27-34.
- 27- Reichler T., Dameris M., and Sausen R. 2003. Determining the tropopause height from gridded data, *Geophysical*.
- 28- Sabziparvar A.A., Mirgaloybayat R., and Shamami F.G. 2011. Evaluation of the possible changes in diurnal temperature range (DTR) trend in some arid climates of Iran since last five decades. *Iranian Journal of Physics Research* 11(1). (In Persian with English abstract)
- 29- Santer B.D., Sausen R., Wigley T.M.L., Boyle J.S., AchutaRao K., Doutriaux C., and Schmidt G. 2003. Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D1): ACL-1.
- 30- Sausen R., and Santer B.D. 2003. Use of changes in tropopause height to detect human influences on climate. *Meteorologische Zeitschrift* 12(3): 131-136.
- 31- Schmidt T., Wickert J., Beyerle G., and Heise S. 2008. Global tropopause height trends estimated from GPS radio occultation data. *Geophysical Research Letters* 35(11).
- 32- Seidel D.J., and Randel W.J. 2006. Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111(D21).
- 33- Seidel D.J., Ross R.J., Angell J.K., and Reid G.C. 2001. Climatological characteristics of the tropical tropopause as revealed by radiosondes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106(D8): 7857-7878.
- 34- Shapiro M.A. 1980. Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere: *Journal of the Atmospheric Sciences* 37(5): 994-1004.
- 35- Sharifi M.A., and Khaniani A. 2011. Using GPS Radio Occultation Technique to Study Climate Change, *Geomatics Conference* 90. Tehran. National Mapping Organization, https://www.civilica.com/Paper-GEO90-GEO90_146.html. (In Persian)
- 36- Shepherd Theodore G. 2002. "Issues in stratosphere-troposphere coupling." *Journal of the Meteorological Society of Japan* 769-792.
- 37- Škerlak B., Sprenger M., and Wernli H. 2014. A global climatology of stratosphere-troposphere exchange using the ERA-Interim data set from 1979 to 2011. *Atmospheric Chemistry & Physics* 14(2).
- 38- Thomas B. 2010. Residual Circulation and Tropopause Structure. *Journal of the Atmospheric Sciences* 67(8): 2582-2600

Evaluating the Long Term Trend Effects of Wordist Height on Barley in Warm and Cold Season Across Iran

H. Asakereh¹- S.A. Masodian²- M. Darand³- S. Zandkarimi^{4*}

Received: 27-04-2020

Accepted: 31-10-2020

Introduction: Studies of the atmosphere over the last hundred years have shown that human activities have caused changes in the atmosphere. The tropopause is one of the layers of the atmosphere whose changes have recently been introduced as a sign of a human impact on climate change. The height of the tropopause is affected by its upper and lower layers (the stratosphere and troposphere). The results of the studies conducted by various researchers have shown that different factors affect the height of tropopause and its changes, which can be divided into two groups. The first group of natural factors (such as changes in solar radiation and weather due to volcanoes, etc.) and the second one is human factors (including changes in greenhouse gases, human-induced changes affecting the ozone of the stratosphere and the production of air vents from human resources, etc.). Thus, altitude tropopause is naturally influenced by spatial characteristics (e.g. latitude and altitude), time (such as the time of year and hours of the day) as well as the frequency of atmospheric actions that determine climatic conditions.

Materials and Methods: Compared to the studies performed globally, a limited number of studies concerning the tropopause have been conducted in Iran. Moreover, the applied methods and the length of the dataset were often inadequate. Therefore, in the present study, the daily data of temperature, and geopotential height from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for 700 to 50 hpa with a spatial resolution of 0.25×0.25 longitude/latitude were applied from 1979 to 2018 for the detection of tropopause. Accordingly, 2491 cells covered across Iran. The LRT was used to detect tropopause. The tropopause is defined as “the lowest level at which the lapse-rate decreases to $2^\circ\text{C}/\text{km}$ or less, provided that the average lapse-rate between this level and all higher levels within 2 km does not exceed $2^\circ\text{C}/\text{km}$ ”. In the present study, in addition to changing the position, changing the scale (variance) as well as the shape of the frequency distribution (skewness and elongation) of the tropopause pressure level in each of the pixels on Iran was investigated. To calculate skewness, and kurtosis, daily tropopause height data were used. For each of the months studied, diffraction, skewness, and elongation were extracted using daily data and finally using data during the 40 years. The extracted trends of variance, skewness, and kurtosis were examined for each month. To track the synchronicity and conformity of changes in altitude and trend of tropopause pressure level with the trend of changes in mean monthly temperature in the lower and upper levels of the tropopause and the trend of the temperature difference between the two layers around tropopause was also evaluated over 40 years. In order to evaluate the long-term trend of each of the studied indices (mean, variance, skewness, and kurtosis) in relation to the height and pressure level of the tropopause, linear regression method with least-squares error method was used.

Results and Discussion: The results of the study of altitude trend and tropopause pressure level showed that in most of the months studied and in most parts of the country, the trend of changes in tropopause pressure level was not significant at the level of 95% confidence. According to the results obtained for the winter months, it was found that the trend of a tropopause pressure level in December had no statistical significance over Iran at a 95% confidence level. In January and February, the obtained trend was not statistically significant except for southeastern areas. In the summer months, unlike the winter months, the trend of tropopause pressure levels was significant in most regions. During the summer months, in areas where the trend was significant, the trend of tropopause pressure levels was positive. Examination of the trend of tropopause height in terms of meters

1- Professor of Climatology, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Professor of Climatology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

3- Associate Professor at Climatology, University of Kurdistan, Iran and Board Member of Department of Zrebar Lake Environmental Research, Kurdistan Studies Institute, University of Kurdistan

4- Ph.D. Candidate of Climatology (Climate Change), University of Zanjan, Zanjan, Iran

(*- Corresponding Author Email: somazand69@gmail.com)

DOI: 10.22067/jsw.v34i5.86196

showed different results with pressure level. During the winter months, the trend was positive in all regions, and in January and February, this trend was significant in many areas, while the summer months did not exhibit a significant tropopause. The results of examining the trend of the low temperature of the tropopause in summer and winter months showed that the observed trend was not statistically significant in December, but in other months, a positive and significant trend was detected. Examination of the temperature trend in the high level of tropopause also showed that the temperature trend in this part of the atmosphere, like the low level of the tropopause in large parts of the country in the studied seasons, lacked statistical significance. Examination of the trend of the temperature difference between high and low levels also showed that the trend of the temperature difference between these two levels was statistically insignificant at the majority of cases. The temperature difference trend of the two levels studied in the summer months was negative and significant at most regions. In other words, the decrease in the temperature difference between low and high tropopause in these two seasons and in some areas indicates a strong decrease in tropopause. Examination of the trend of variance, kurtosis and skewness also showed that the observed trend lacked statistical significance in the two studied chapters at most areas. There was also no relationship between the surface temperature trend and changes in tropopause height.

Conclusion: The results of this study showed that tropopause had no statistically significant trend in most areas and months. Moreover, the significant trend was not related to the two temperatures around tropopause and surface temperatures.

Keywords: Cold season, Iran, Tropopause pressure level, Tropopause, Warm season

Contents

Effect of Biochar and <i>Azospirillum lipoferum</i> bacteria on Yield and Water Use Efficiency Indices of Tarom Hashemi Rice Cultivar under Flooded and Alternation Irrigation Regimes	1018
M. Kaveh- M.A. Esmaeili- H. Pirdashti- M.R. Ardakani	
The Effect of Trickle and Sprinkler Irrigation Systems on Yield and Water Productivity of Rice in Transplanting and Direct Cultivation Methods	1032
M. Karimi Fard - M. Zakerinia - A.R. Kiani - M.T. Feyz Bakhsh	
Evaluation and Zonation of Sensitive Areas to Gully Erosion Using Fuzzy Logic (Case Study: Ghaleh Gorg Watershed- Shushtar)	1045
M.R. Ansari - F. Soleimani - A.R. Ahmadi	
Effect of Super Strains of <i>Bacillus</i> and <i>Staphylococcus</i> Isolated from Dryland Farming on Quantitative and Qualitative Indices of Wheat under Stress Condition	1059
E. Shirmohammadi - H.A. Alikhani- A.A. Pourbabae- H. Etesami	
Introducing Amino Acid and Chitosan Iron Chelates as Available Sources of Iron in Nutrient Solutions by Strategy I and II Plants	1079
A. Mirbolook - M.H. Rasouli Sadaghiani - E. Sepehr- A. Lakzian- M. Hakimi	
Comparison of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in Classification of Soils in Iranshahr and Dalghan Regions, Sistan and Baloochestan Province	1091
S. Sanjari - M.H. Farpoor- M. Mahmoodabadi- S. Barkhori	
Comparative Survey of Organic Matter, Biological and Acid-causing Treatments Effects on Availability of Nutrient Elements in a Calcareous Soil	1107
Sh. Haghighi - Z. Sharifi	
Investigating the Effect of Engineered Biochars on Lead Desorption Kinetics in Contaminated Calcareous Soils	1124
Z. Dianat Maharluei - M. Fekri- M. Mahmoodabadi- A. Saljooqi- M. Hejazi	
Investigation of the Soil Quality Indices in Irrigated Wheat Farms of Nazarabad Region in West of Alborz Province	1139
R. Mirkhani- A.R. Vaezi- H. Rezaei	
Regression Patterns of Diurnal Temperature in Different Climatic Regions of Iran	1156
B. Mirkamandr- H. Sanaeinejad- H. Rezaee-Pazhand - M. Farzandi	
Meteorological Drought Characteristics Analysis under Climate Change Effect Using Copula in Fars Province	1173
S.M. Farmanara - B. Bakhtiari- N. Sayari	
Linear, Nonlinear and Hybrid Response of Potential Evaporation to Meteorological Variables (Case Study: Tabriz Synoptic Station)	1188
H. Mirhashemi	
Evaluating the Long Term Trend Effects of Wordist Height on Barley in Warm and Cold Season Across Iran	1202
H. Asakereh - S.A. Masodian - M. Darand - S. Zandkarimi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 34

No. 5

2020

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
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Kamali, Gh.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Islamic Azad University, Tehran
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 511 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).