

- تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید و انتقال رسوبات آبی معلق با استفاده از آزمون گاما و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی ۶۱۳
ابوالفضل مساعدی- الیاس رمضانی پور- منصور مصداقی- مریم تاج‌بخشیان
- شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) تحت شرایط تنش خشکی: - شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد ۶۲۷
اسماعیل فرخی- مهدی نصیری محلاتی- علیرضا کوچکی- سید علیرضا بهشتی
- بررسی منشأ و عوامل مؤثر بر تغییرات غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپی δS و $\delta^{34}S$ آن در منابع آب م منطقه سرپل ذهاب ۶۴۵
حسین محمدزاده - مهدی بنیادی- فائزه جنگ‌جو
- تأثیر سطوح احتمالات متفاوت در برآورد نیاز آبی خالص برنج در استان‌های شمالی ایران ۶۵۹
ابراهیم اسعدی اسکویی- سعیده کوزه‌گران- محمدرضا یزدانی- اصغر رحمانی
- بررسی نقش فیلترهای ترکیبی شن-ژئوتکستایل-ژئولیت بر برخی ویژگی‌های پساب ۶۷۳
حمید شیروانی ایچی- مهدی قبادی نیا- نگار نورمهند- سید حسن طباطبائی
- اثر تغذیه زیستی و پرایمینگ بذر بر رشد و عملکرد ژئوتپ‌های نخود کابلی (*Cicer arietinum* L.) ۶۸۹
حسین ایوبی- جعفر نباتی- احمد نظامی- محمد کافی
- بکارگیری مدل اگرواکولوژیکی فانو برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت پسته در استان آذربایجان شرقی ۷۰۳
اصغر فرج نیا- کامران مروج- پریسا علمداری- مهدی اصلاحی
- مدل‌سازی تغییرات عمقی کربنات کلسیم معادل خاک با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در دشت قزوین ۷۱۹
سید روح اله موسوی- فریدون سرمدیان- محمود امید- پاتریک بوگارت
- بررسی اثر رخ داد امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهر سهند طی سال‌های ۱۳۹۸-۱۳۹۹ ۷۳۵
رقیه ملکی مرشت- بهروز سبحانی- مسعود مرادی
- ارزیابی مقایسه‌ای شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از کریجینگ و آنتروپی سمیرا نباتی- خدایار عبداللهی ۷۴۹

Contents

- Assessment the Effective Factors on Production and Transportation of Suspended Sediments using Gamma Test and PCA Techniques 625
A. Mosaedi - E. Ramezanipour - M. Mesdaq - M. Tajbakhshian
- Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: - Simulation of Water Productivity, Above Ground Biomass and Yield 643
E. Farrokhi - M. Nassiri Mahallati - A. Koocheki - S.A. Beheshti
- Investigating the Source and Factors Affecting Sulfate Concentration and Isotopic (δS and $\delta^{34}S$) Variations in Water Resources of Sarpol-e Zahab Region 658
H. Mohammadzadeh - M. Bonyabadi - F. Jangjoo
- The Effect of Different Probability Levels in Estimating the Net Water Requirement of Rice in the Northern Provinces of Iran 671
E. Asadi Oskouei - S. Kouzegaran - M.R. Yazdani - A. Rahmani
- Investigation of the Role of Sand- Geotextile-Zeolite Composite Filters on some Wastewater Properties 671
H. Shirvani Ichi - M. Ghobadnia - N. Nourmahnad - S.H. Tabatabaei
- Effect of Bio-Nutrition and Seed Priming on Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Kaboli Type 701
H. Auobi - J. Nabati - A. Nezami - M. Kafi
- Application of FAO Agro-ecological Model for Locating Areas Prone to Pistachio Cultivation in East Azerbaijan Province 717
A. Farajnia - K. Moravej - P. Alamdari - M. Eslahi
- Modeling the Vertical Soil Calcium Carbonate Equivalent Variation by Machine Learning Algorithms in Qazvin Plain 717
S.R. Mousavi - F. Sarmadian - M. Omid - P. Bogaert
- Investigating the Effect of Heat Waves on the Intensification of Thermal Islands in Sanandaj City From 989 to 08 747
R. Maleki Meresht - B. Sobhani - M. Moradi
- Evaluation of Chaharmahal va Bakhtiari Rain Gauge Stations Network Using Kriging and Entropy 761
S. Bayati - K. Abdollahi

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 35 شماره 5 آذر - دی سال 1400

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 ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)	اوستان، شاهین
استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)	تقوایان، صالح
دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)	خراسانی، رضا
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

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 613 تعیین مهم ترین عوامل مؤثر بر تولید و انتقال رسوبات آبی معلق با استفاده از آزمون گاما و تجزیه به مؤلفه های اصلی
ابوالفضل مساعدی - الیاس رضائی پور - منصور مصداقی - مریم تاج بخشیان
- 627 شبیه سازی رشد و نمو گوجه فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) تحت شرایط تنش خشکی: - شبیه سازی بهره وری آب،
زیست توده و عملکرد
اسماعیل فرخی - مهدی نصیری محلاتی - علیرضا کوچکی - سید علیرضا بهشتی
- 645 بررسی منشأ و عوامل مؤثر بر تغییرات غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپی δS و $\delta^{18}O$ آن در منابع آب منطقه سرپل ذهاب
حسین محمدزاده - مهدی بنیادی - فائزه جنگجو
- 659 تأثیر سطوح احتمالات متفاوت در برآورد نیاز آبی خالص برنج در استان های شمالی ایران
ابراهیم اسعدی اسکویی - سعیده کوزه گران - محمدرضا یزدانی - اصغر رحمانی
- 673 بررسی نقش فیلترهای ترکیبی شن-ژئوتکستایل-ژئولیت بر برخی ویژگی های پساب
حمید شیروانی ایچی - مهدی قبادی نیا - نگار نورمهند - سید حسن طباطبائی
- 689 اثر تغذیه زیستی و پرایمینگ بذر بر رشد و عملکرد ژئوتیپ های نخود کابلی (*Cicer arietinum* L.)
حسین ایوبی - جعفر نباتی - احمد نظامی - محمد کافی
- 703 بکارگیری مدل اگرواکولوژیکی فانو برای مکان یابی مناطق مستعد کشت پسته در استان آذربایجان شرقی
اصغر فرج نیا - کامران مروج - پریسا علمداری - مهدی اصلاحی
- 719 مدل سازی تغییرات عمقی کربنات کلسیم معادل خاک با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین در دشت قزوین
سید روح اله موسوی - فریدون سرمیدان - محمود امید - پاتریک بوگارت
- 735 بررسی اثر رخ داد امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهر سنجند طی سال های 98-99
رقیه ملکی مرشت - بهروز سبحانی - مسعود مرادی
- 749 ارزیابی مقایسه ای شبکه ایستگاه های باران سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از کریجینگ و آنترویی
سمیرا بیاتی - خدایار عبدالهی



مقاله پژوهشی

تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید و انتقال رسوبات آبی معلق با استفاده از آزمون گاما و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی

ابوالفضل مساعدی^{۱*} - الیاس رمضانی پور^۲ - منصور مصداقی^۳ - مریم تاج‌بخشیان^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

چکیده

امروزه فرسایش خاک و انتقال رسوبات حاصل از فرسایش علاوه بر کاهش کمیت و کیفیت منابع آب و خاک، مشکلات اقتصادی و اجتماعی زیادی را پدید آورده است. در این پژوهش از آمار رسوب معلق ۱۵ حوضه آبخیز با میانگین مساحت ۱۷۵/۵۶ کیلومتر مربع، میانگین ارتفاع ۲۰۸۹ متر از سطح دریا، میانگین بارش سالیانه ۲۶۲ میلی‌متر و میانگین دبی سالیانه ۰/۵۸ متر مکعب در ثانیه در محدوده شهرستان‌های مشهد و نیشابور به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در تولید رسوب و انتقال آن، با استفاده از روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آزمون گاما (GT) استفاده شد. نتایج حاصل از روش اول نشان داد که پنج مؤلفه اول بیش از ۹۰ درصد تغییرات ایجاد شده را توجیه می‌کنند، و مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی از مؤلفه اول، میانگین دبی سالیانه و ضریب پیچان رودی آبراهه اصلی از مؤلفه دوم و تراکم زهکشی آبراهه از مؤلفه سوم، مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید رسوب معلق می‌باشند. درصد حضور هر یک از ۱۲ متغیر مورد بررسی در میان نمود ترکیب برتر براساس آزمون گاما نشان داد که پنج پارامتر میانگین دبی سالیانه، طول آبراهه اصلی، مساحت حوضه، میانگین بارش سالیانه و درصد رخنمون سنگ‌های حساس به فرسایش با مجموع ۶۳ درصد حضور در معادلات پیشنهادی به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید و انتقال رسوب معلق هستند. در نتیجه اگر هدف تهیه مدلی با بیشترین دقت برآورد رسوب معلق باشد، مدل ۱۲ متغیره حاصل از آزمون گاما، و در صورتی که هدف تهیه مدلی با کم‌ترین متغیر ورودی باشد، مدل ۵ متغیره حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به منظور برآورد رسوبات آبی معلق پیشنهاد می‌گردد. علاوه بر این، اگر هدف تهیه مدلی با کم‌ترین متغیر ورودی و دسترسی و محاسبه راحت آن‌ها و برآورد اولیه رسوبات معلق باشد، مدل دو متغیره (بر اساس عوامل مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی) حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: آزمون گاما، بارش سالیانه، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، رسوب معلق

مقدمه

توسط رودخانه‌ها مشکلاتی از قبیل پر شدن مخازن سدها، تغییر در مسیر رودخانه‌ها یا کاهش ظرفیت حمل آن‌ها، تخریب تأسیسات مسیر رودخانه‌ها، کاهش کیفیت آب و اختلال در آبی‌رپوری را در پی دارد (۶، ۱۵ و ۲۷). به این منظور، یافتن روش‌ها و مدل‌های مناسب برای برآورد واقعی‌تر میزان رسوب‌دهی حوضه‌های آبخیز با هدف کنترل فرسایش و برنامه‌ریزی در استفاده از منابع آب و خاک امری ضروری است (۹). به دلیل محدودیت‌های مختلف نظیر کافی نبودن ایستگاه‌های هیدرومتری و مشکل جمع‌آوری داده‌های رسوب معلق، اطلاعات مشاهده‌ای در این زمینه در سطح جهان تا کنون در حد وسیع و فراگیری ارائه نشده‌اند (۲۲). از طرفی تجهیز کلیه حوضه‌ها به وسایل اندازه‌گیری و برداشت مداوم و منظم نمونه‌ها نه تنها از نظر عملی ممکن نیست بلکه این امر مستلزم صرف هزینه و زمان بسیار

امروزه فرسایش خاک و انتقال رسوبات حاصل از فرسایش، ضمن محدودسازی منابع آب و خاک، مشکلات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی را پدید آورده است. از طرفی انتقال رسوب

۱- استاد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mosaedi@um.ac.ir)

۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد آبخیزداری و استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

DOI: 10.22067/JSW.2021.14112.0

مربعات خطا^۴ برای ارزیابی مدل‌ها استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که مدل‌های گروه همگن نسبت به مدل واحد برای تمام ایستگاه‌ها دارای دقت مناسب و از اعتبار بالاتری برخوردار هستند.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل نبود پوشش گیاهی متراکم و وقوع بارش‌های رگباری کوتاه مدت که در اغلب موارد منجر به ایجاد سیلاب و حجم بالایی از رواناب می‌شود انتظار می‌رود تولید رسوبات معلق حاصل از فرسایش خاک و سنگ بالا باشد (۲). با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه نیز دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک می‌باشد، پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع بارندگی و فرسایش آبی ناشی از آن، حجم قابل توجهی از رسوبات وارد آب‌های جاری شوند که پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی مانند از دست رفتن حاصلخیزی خاک و کاهش بازده تولیدات کشاورزی، کاهش کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی به علت ورود رسوبات معلق و مواد محلول همراه آن‌ها و آسیب به حیات جانوری و گیاهی را در پی دارد. بنابراین، شناخت عواملی که در میزان رسوب معلق حاصل از فرسایش سنگ و خاک موثر می‌باشند، راهکار بسیار موثری در حفظ محیط زیست و ارائه برنامه‌های مدون جهت کاهش اثرات مخرب تولید بالای رسوبات معلق محسوب می‌شود. علاوه بر این، علیرغم اینکه در سطح جهانی و یا در مطالعات انجام شده بر روی حوضه‌های آبخیز ایران به کاربرد روش‌هایی مانند تجزیه به مولفه‌های اصلی و یا آزمون گاما در تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر تولید رسوب اشاره شده است، اما در پژوهش حاضر از آمار و اطلاعات ۱۵ ایستگاه هیدرومتری استفاده شده است که می‌تواند دقت نتایج حاصل را افزایش دهد. از طرفی، در حوضه‌های مورد مطالعه تا کنون از روش‌های آماری مانند تجزیه به مولفه‌های اصلی و یا آزمون گاما برای شناخت مهم‌ترین عواملی که می‌توانند بر روی تولید رسوب موثر باشند، استفاده نشده است. بر این اساس، هدف از انجام این پژوهش بررسی و شناخت مهم‌ترین عوامل اقلیمی، فیزیوگرافی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی در تولید و انتقال رسوبات آبی معلق بر اساس دو روش تجزیه به مولفه‌های اصلی و آزمون گاما در تعدادی از حوضه‌های آبخیز شمال شرقی کشور می‌باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه متشکل از ۱۵ حوضه آبخیز است که بر اساس تقسیمات وزارت نیرو در محدوده‌های مطالعاتی مشهد و نیشابور (شمال شرق کشور) واقع شده‌اند. موقعیت دو محدوده مطالعاتی مشهد و نیشابور، در حد فاصل مختصات جغرافیایی ۵۸ درجه و ۱۲ دقیقه و ۱۳ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۷ دقیقه و ۳۱ ثانیه طول شرقی، و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه و ۳ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۳ دقیقه و ۴

زیاد می‌باشد. از این‌رو، انتخاب روش‌هایی برای برآورد علمی و دقیق تولید رسوب در حوضه‌های کشور به منظور کنترل این فرآیند از الزامات محسوب می‌شود (۲۵).

رسوب‌دهی حوضه‌ها، ناشی از عوامل آب و هوایی، هیدرولوژیکی، زمین‌شناسی، پوشش گیاهی، خصوصیات فیزیوگرافی و کاربری اراضی حوضه بالادست است (۵، ۱۸، ۲۳، ۱ و ۲۶). در راستای تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر رسوب معلق استفاده از دو روش تجزیه به مولفه‌های اصلی^۱ (۱۷ و ۲۴) و آزمون گاما^۲ (۱۷، ۱۹ و ۲۰) در پژوهش‌های متعددی انجام شده است. بینا و همکاران (۴) با استفاده از دو روش مذکور، مساحت و شیب حوضه را به عنوان مهم‌ترین عوامل موثر در رسوب‌دهی حوضه آبریز رودخانه کرخه معرفی کردند. زارع چاهوکی و همکاران (۲۸) مدل‌سازی منطقه‌ای منحنی تداوم جریان را برای تعدادی از حوضه‌های آبخیز واقع در مناطق خشک ارائه نمودند. ایشان با استفاده از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی، به ترتیب چهار عامل مساحت حوضه، طول آبراهه اصلی، شیب آبراهه اصلی و بارندگی متوسط حوضه را به عنوان عوامل مهم در مدل خود معرفی نمودند. ژانگ و همکاران (۲۹) به بررسی چگونگی تولید رسوب در شرایط مختلف بارندگی و ویژگی‌های ژئومورفولوژیک نظیر مشخصات ارتفاعی، وضعیت شکل و شبکه آبراهه‌های حوضه آبخیز لائوس پلاتای چین پرداختند. ایشان از ترکیب روش تجزیه به مولفه‌های اصلی، رگرسیون خطی چندگانه و رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی رسوب معلق استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که به ترتیب عوامل شکل حوضه، ضریب پیچان رودی رودخانه، طول آبراهه اصلی حوضه، مشخصات ارتفاعی، وضعیت بارندگی و شیب تأثیرات زیادی بر رسوب‌دهی حوضه دارند.

پس از تعیین مهم‌ترین عوامل موثر بر رسوب معلق، تهیه مدل‌های مناسب برآورد آن از اهمیت خاصی برخوردار است (۱۲). به عنوان نمونه، خیرقام و وفاخواه (۱۳) داده‌های رسوب اندازه‌گیری شده در محدوده ۴۲ ایستگاه هیدرومتری جنوب و جنوب شرقی دریای خزر را با دوره‌های آماری بیش از ۲۰ سال مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از آزمون گاما، ۱۴ متغیر موثر بر تولید رسوب را به ۵ متغیر اصلی کاهش دادند و ایستگاه‌های مذکور را با استفاده از منحنی‌های اندرو در ۴ گروه همگن طبقه‌بندی نمودند. سپس برای هر گروه همگن و برای کل ایستگاه‌ها با ۵ عامل اصلی انتخاب شده، مدل رگرسیونی برای تخمین میزان متوسط رسوب معلق سالانه را تهیه نمودند. در نهایت از نمایه‌های آماری خطای نسبی^۳ و جذر میانگین

1- Principal component analysis (PCA)

2- Gamma test (GT)

3- Relative error (RE)

4- Root mean square errors (RMSE)

ثانيه عرض شمالي واقع شده است (شکل ۱). مجموع وسعت دو محدوده‌ي مشهد و نيشابور معادل ۱۷۲۳۸ كيلومتر مربع مي‌باشد. داده‌هاي مربوط به بارش، دبي جريان و غلظت رسوبات آبي معلق درطي چند سال و برخي از آمار مورد نياز آن‌ها در طول يك دوره آماري مناسب در منطقه مورد مطالعه قابل دسترسي است. در جدول ۱ مختصات جغرافيايي، نام و كد محدوده ايستگاه‌هاي هيدرومتری مورد مطالعه به اختصار ارائه شده است و شكل ۱ نيز نقشه موقعيت محدوده‌هاي مورد مطالعه را نشان مي‌دهد.

روش کار

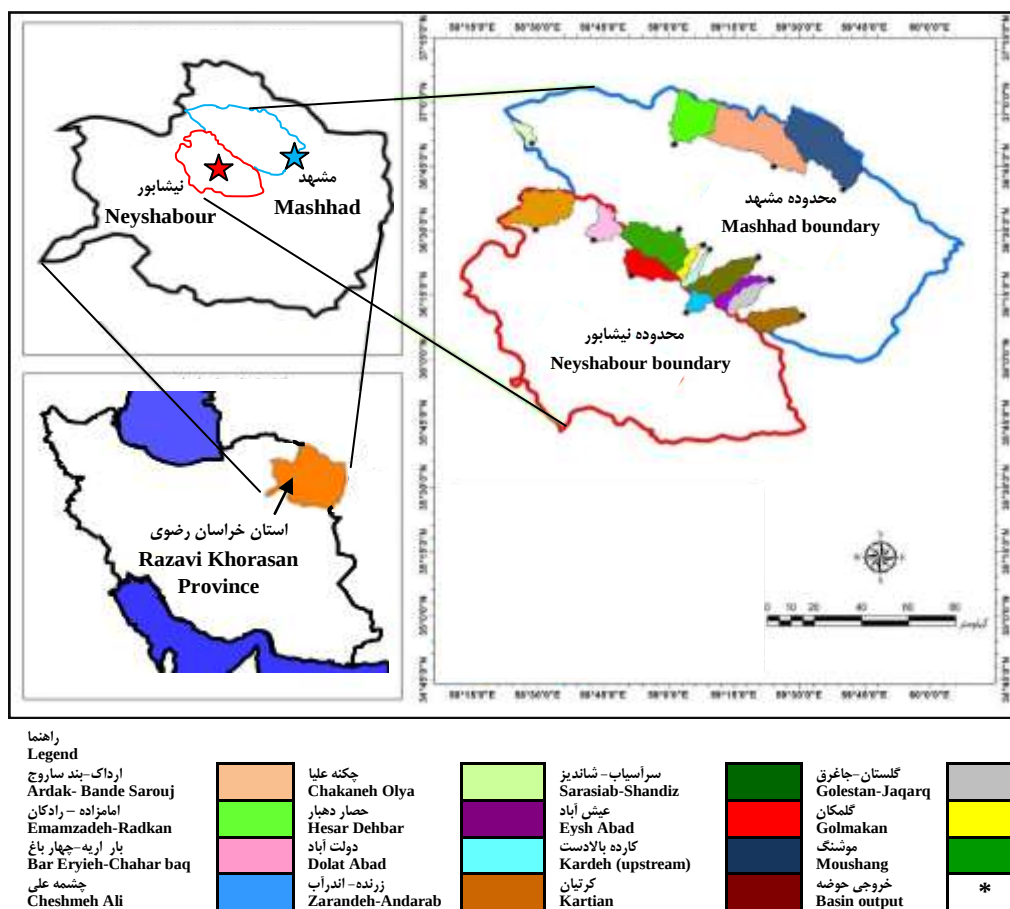
در اين پژوهش، ابتدا تمامي داده‌هاي اندازه‌گيري شده دبي جريان و غلظت رسوبات آبي معلق (که در بعضي از روزهاي سال اندازه‌گيري

جدول ۱- موقعيت جغرافيايي ايستگاه‌هاي مورد مطالعه

Table 1- Geographical location of study stations

نام ايستگاه Station name	عرض جغرافيايي Latitude			طول جغرافيايي Longitude			کد محدوده مطالعاتي Study area code	نام محدوده مطالعاتي Study area name
	درجه Degree	دقيقه Minute	ثانيه Second	درجه Degree	دقيقه Minute	ثانيه Second		
اردک-بند ساروج Ardak- Bande Sarouj	36	44	59	59	24	8	60	مشهد Mashhad
امامزاده - رادکان Emamzadeh-Radkan	36	50	11	59	1	13	60	مشهد Mashhad
بار اريه-چهار باغ Bar Eryieh-Chahar baq	36	27	50	58	42	43	47	نیشابور Neyshabour
چشمه علي Cheshmeh Ali	36	11	27	59	4	27	47	نیشابور Neyshabour
چکنه عليا Chakaneh Olya	36	50	24	58	28	39	60	مشهد Mashhad
حصار دهبار Hesar Dehbar	36	18	27	59	24	0	60	مشهد Mashhad
دولت آباد Dolat Abad	36	25	38	59	9	۲۷	60	مشهد Mashhad
زرنده- اندراب Zarandeh-Andarab	36	28	42	58	29	۴۶	47	نیشابور Neyshabour
سراسياب- شاندیز Sarasiab-Shandiz	36	23	58	59	20	37	60	مشهد Mashhad
عیش آباد Eysh Abad	36	19	22	58	51	25	47	نیشابور Neyshabour
کارده بالادست (Kardeh (upstream)	36	39	35	59	39	58	60	مشهد Mashhad
کرتيان Kartian	36	10	17	59	30	42	60	مشهد Mashhad
گلستان-جاغرق Golestan-Jaqrq	36	18	53	59	24	4	60	مشهد Mashhad
گلمکان Golmakan	36	26	36	59	7	59	60	مشهد Mashhad
موشنگ Moushang	36	30	20	59	2	27	60	مشهد Mashhad

شده‌اند) و همچنين مقادير دبي روزانه ايستگاه‌هاي هيدرومتری مورد مطالعه (جدول ۱) از شرکت آب منطقه‌اي خراسان رضوي اخذ گرديد. علاوه بر اين، آمار بارندگي در ايستگاه‌هاي مورد مطالعه، نقشه‌هاي زمين‌شناسي، توپوگرافي و فيزيوگرافي مورد نياز که به صورت لايه‌هاي مختلف و قابل استفاده در نرم‌افزار Arc GIS10.3 موجود بود، توسط اين شرکت فراهم شد. به منظور تعيين دوره مشترک آماری، پس از ترسيم بارگراف دوره آماری مربوط به رسوب معلق، دبي جريان روزانه و بارندگي ساليانه و همچنين کنترل نسبي کفايت داده‌ها، ايستگاه‌هايي که از طول دوره آماری طولاني برخوردار بوده و کم‌ترين نقص آماری را داشتند، انتخاب شدند.



شکل ۱- موقعیت حوضه‌های مورد مطالعه در استان خراسان رضوی
Figure 1- Location of the study basins in Khorasan Razavi Province

دسته از عواملی که با یکدیگر همبستگی بالایی (بیش از ۰/۹) دارند، مورد بررسی بیش‌تر قرار گیرند (۱۶). در این راستا از بین هر دو عاملی که با یکدیگر همبستگی قوی داشتند یکی از آن‌ها که بر اساس نظرات کارشناسی، شواهد و سوابق پیشین مهم‌تر به نظر می‌رسید، حفظ و دیگری از لیست عوامل انتخابی برای مدل نهایی کنار گذاشته شد. این امر به این علت انجام گردید که عواملی که همبستگی قوی با یکدیگر دارند و می‌توانند باعث ایجاد تورم واریانس در مدل نهایی شوند، در محاسبات وارد نشوند (۱۶).

یکی از روش‌های آماری چند متغیره برای کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه مسئله، در مواردی که حجم زیادی از داده‌ها وجود دارد، روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی می‌باشد. با اعمال این روش، متغیرهای اولیه به مؤلفه‌هایی جدید که بدون همبستگی می‌باشند، تبدیل می‌شوند و مؤلفه‌های جدید ایجاد شده، ترکیبی خطی از متغیرهای اولیه هستند. در این روش به جای استفاده مستقیم از متغیرهای اولیه، ابتدا آن‌ها را به مؤلفه‌هایی تبدیل کرده و سپس از تعدادی از اجزاء این مؤلفه‌ها به جای متغیرهای اولیه استفاده می‌گردد (۸ و ۱۰). یکی از روش‌های انتخاب متغیرهای مناسب برای اجرای

در این پژوهش به منظور بررسی درستی و همگنی داده‌ها، از روش آزمون توالی یا دنباله‌ها استفاده شد و کیفیت داده‌های موجود کنترل گردید (۳). به منظور تعیین داده‌های پرت از آزمون گرویز-بک استفاده شد (۳). برای نشان دادن این موضوع که چه عواملی بار رسوبی را در محدوده‌های مورد بررسی کنترل می‌کنند، ابتدا آزمون نرمال بودن بر روی متغیرها انجام شد، زیرا نرمال بودن و استاندارد نمودن داده‌ها در استفاده بهینه از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای و مدل‌سازی ضروری می‌باشد. با توجه به نرمال نبودن متغیر وابسته رسوب معلق با استفاده از عمل لگاریتم طبیعی این متغیر به یک متغیر با توزیع نرمال تبدیل شد.

پس از اینکه عوامل موثر بر تولید رسوب به صورت اولیه تعیین شدند، عواملی که تاثیر بیش‌تری در تولید رسوب معلق داشتند، انتخاب شدند. به این منظور در این پژوهش دو روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و آزمون گاما به عنوان روش‌هایی که موثرترین عوامل بر یک پدیده را شناسایی می‌نمایند، مورد استفاده قرار گرفتند (۱۷، ۱۹ و ۲۰). قبل از اجرای آزمون گاما و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی، ماتریس همبستگی برای عوامل مستقل تشکیل گردید، تا بدین منظور آن

آزمون گاما یک ابزار مدل سازی غیرخطی است که به کمک آن می توان ترکیب مناسبی از متغیرهای ورودی برای مدل سازی داده های خروجی و تهیه یک مدل هموار را بررسی نمود. هنگامی که عوامل مؤثر بر پدیده ای به طور قابل ملاحظه ای زیاد باشد با استفاده از آزمون گاما می توان ترتیب میزان اهمیت متغیرهای ورودی و بهترین ترکیب از میان تمام ترکیب های ممکن را بدست آورد. همچنین با استفاده از آزمون M می توان تعداد داده های ورودی که مقدار گاما را به حالت پایدار برای ایجاد مدل هموار می رساند، تعیین نمود (۷). علاوه بر این، یک ابزار توسعه یافته برای تخمین میانگین مربعات خطای حاصل از مدل سازی پدیده های مختلف با استفاده از مجموعه داده های مشاهداتی از آن پدیده می باشد (۱۱ و ۲۱). فرض این آزمون این است که مجموعه داده های ورودی X_i و خروجی Y_i مشاهده شده از پدیده ای به صورت رابطه (۳) در اختیار باشد.

$$\{(X_i, Y_i), 1 \leq i \leq M\} \quad (3)$$

در صورتی که با توجه به مجموعه ورودی X_i خروجی Y_i بدست آید و M نشان دهنده تعداد سری مجموعه ای مشاهده شده از پدیده ای مورد بررسی باشد، آنگاه آزمون گاما با فرض عدم قطعیت و پذیرش مقادیر خطا در بدست آوردن خروجی از روی ورودی بخاطر پیچیدگی غیرخطی بودن پدیده های مدل سازی، این خطا را به صورت رابطه بین مجموعه داده های ورودی و خروجی با تابع f نشان می دهد (رابطه ۴).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m) + r \quad (4)$$

که در آن f نمایان گر تابع همواری است که برای مدل سازی داده ها استفاده می شود و r نشان دهنده متغیر تصادفی است که برای نمایش خطا به کار می رود. با فرض اینکه میانگین توزیعی که r از آن پیروی می کند برابر صفر است (هر مقدار ثابت دیگر را نیز می توان برای میانگین تابع f در نظر گرفت) و فرض دیگر آن که واریانس خطا کران دار است، مدل فوق به مدلی با مشتقات جزئی درجه اول محدود می شود و آزمون گاما نشان دهنده ای آن بخش از واریانس داده های خروجی است که نمی تواند توسط مدل هموار، محاسبه شود.

آزمون گاما بر این اساس استوار است که اگر دو نقطه $\bar{X}_1$ و $\bar{X}_2$ نزدیک به هم در فضای ورودی باشند، باید دو نقطه $\bar{Y}_1$ و $\bar{Y}_2$ متناظر با آن ها نیز نزدیک به هم در فضای خروجی باشند، که عدم ایجاد این حالت سبب بروز خطا در مدل گاما تست می شود.

با ایجاد رابطه رگرسیون خطی بین p مجموعه ای $M(K)$ ، اطلاعات مفیدی مطابق رابطه ۵ به دست می آید:

$$\gamma = A\delta + I \quad (5)$$

از روی خط رگرسیون بیان شده در رابطه ۵ می توان اطلاعات مفیدی به دست آورد؛ نخست آن که عرض از مبدأ این خط نشان دهنده مقدار آزمون گاما است که بیانگر آن بخش از واریانس داده های خروجی است که نمی تواند به وسیله ی مدل برآورد گردد.

تحلیل مؤلفه های اصلی استفاده از ماتریس همبستگی بین متغیرها است و توصیه می شود که متغیرهایی که با متغیرهای دیگر همبستگی کمی دارند از تحلیل حذف گردند (۱۴).

در روش تحلیل مؤلفه های اصلی بر اساس معادله ۱، هر یک از سری داده های ورودی به نحوی استاندارد شدند که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک باشند.

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

که در این رابطه Z : معادل استاندارد شده متغیر مورد نظر، X : مقدار متغیر، μ : میانگین متغیر مورد بررسی و σ : مقدار انحراف معیار متغیر مورد بررسی می باشد.

ماتریس همبستگی، ماتریسی مقارن با بعد $P \times P$ است (P : تعداد متغیرهای مورد بررسی است) که عضوهای روی قطر اصلی این ماتریس، واریانس متغیرهای ورودی و بقیه درایه های این ماتریس، کوواریانس بین متغیرهای ورودی است. این ماتریس، به ماتریس واریانس - کوواریانس معروف می باشد و میزان تغییرات در نمونه و میزان همبستگی P متغیر را با هم نشان می دهد. به همین دلیل این ماتریس، معادل ماتریس همبستگی بین متغیرهای ورودی است. با توجه به اینکه برای تشکیل این ماتریس از داده های استاندارد شده استفاده شده است، بنابراین درایه های روی قطر اصلی در تمامی این ماتریس ها یک می باشد و درایه های غیرقطری کوواریانس بین متغیرهای ورودی است. برای محاسبه مقادیر ویژه λ و بردارهای ویژه از ماتریس همبستگی استفاده می شود.

هر مقدار ویژه با اطلاعات مربوط به آن (بردارهای ویژه) ویژگی های یک مؤلفه را می دهد. هر مؤلفه نیز درصدی از اطلاعاتی که توسط متغیرهای اولیه بیان می شود را در بر می گیرد. هر چه کمیت عددی مقادیر ویژه بزرگ تر باشد، بیانگر این است که مؤلفه متناظر با آن نیز درصد بیش تری از اطلاعات متغیرهای اولیه را شامل می گردد. هر مؤلفه، ترکیبی خطی از متغیرهای اولیه می باشد و با رابطه ۲ مشخص می شود:

$$PC_i = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ip}x_p \quad (2)$$

که در آن: PC_i آمین مؤلفه مورد نظر، a_{ip} : آمین بردار ویژه متناظر با P آمین مؤلفه و x_p : P آمین متغیر اصلی می باشد (۱۰ و ۱۴). با انتخاب چند مؤلفه اصلی اول، سایر مؤلفه ها از محاسبات بعدی حذف می شوند و بنابراین باید دقت زیادی در انتخاب آستانه حذف نمود. اسکری پلات یکی از روش های تشخیص آستانه حذف می باشد که در آن مقادیر ویژه شماره مؤلفه ها رسم می شود. در این روش، مرز بین مؤلفه های اصلی و غیر اصلی محلی است که نمودار میل به افقی شدن می نماید؛ یعنی محلی که مقادیر ویژه در مقابل تغییر شماره مؤلفه، تغییر چندانی ننماید.

دوم آن که شیب خط رگرسیون نشان دهنده‌ی پیچیدگی بیش‌تر مدلی است که از روی مجموعه داده‌های ورودی و خروجی ساخته می‌شود و این شیب هرچه تندتر باشد نشان دهنده‌ی پیچیدگی بیشتر مدل است (۱۱). یکی دیگر از معیارهای مهم که با استفاده از این آزمون می‌توان به‌دست آورد معیار بدون بعد V_{ratio} است که دارای مقادیری در بازه‌ی ۰ و ۱ است و هرچه این مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد، نمایان‌گر دقت بالای مدل برای یافتن خروجی‌های مطلوب از ورودی‌ها است. در واقع اگر مقدار V_{ratio} از عدد یک کم شود مقدار ضریب تبیین را نشان می‌دهد (۲۱). اگر فرض شود N متغیر ورودی برای پدیده‌ای مؤثر باشند، تعداد $2N-1$ ترکیب معنی‌دار از متغیرهای ورودی به‌وجود می‌آید. بنابراین هنگامی که عوامل ورودی مؤثر بر پدیده‌ای به‌طور قابل ملاحظه‌ای زیاد باشد با استفاده از آزمون گاما می‌توان ترتیب میزان اهمیت متغیرهای ورودی و بهترین ترکیب‌های ممکن را به‌دست آورد (۷).

نتایج و بحث

نتایج حاصل از رسم باروگراف آماری برای داده‌های غلظت رسوب معلق، دبی جریان و بارش نشان داد که طی سال‌های آبی ۱۳۶۳-۱۳۶۲ تا ۱۳۹۲-۱۳۹۱ تقریباً داده‌ها دارای کم‌ترین نقص می‌باشد و از این رو، در این پژوهش، این دوره به عنوان دوره مشترک آماری انتخاب گردید. همان‌گونه که بیان شد، آزمون داده‌ی پرت با استفاده از رابطه گرویز-بک در مورد داده‌های دبی روزانه و برای داده‌های دبی رسوب معلق انجام شد و داده‌های پرت بعد از شناسایی، مورد بررسی بیش‌تر قرار گرفتند. در نتیجه برخی از داده‌ها بر اساس نظرات کارشناسی و همچنین شواهد آمار و ارقام موجود از قبیل آمار سیلاب و هیدروگراف روزانه حفظ و برخی دیگر از داده‌های پرت که

اشتباه و غیرواقعی به نظر می‌رسیدند (با مقایسه مقادیر دبی یک ایستگاه با ایستگاه‌های مجاور، مقدار بارندگی منجر به رواناب، شواهد تاریخی حوضه و تجربه کارشناسان یا ساکنین حوضه‌ها) حذف شدند. با استفاده از روش تحلیل مولفه‌های اصلی، ۱۲ عامل مستقل مورد بررسی (جدول ۲)، به چند مولفه تبدیل شدند. به این ترتیب فقط با انتخاب مولفه‌هایی که بیش‌ترین تغییرات را نشان می‌دهند، تعداد متغیرها کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی نشان داد که پنج مولفه اول ۹۰/۰۵ درصد تغییرات ایجاد شده را توجیه می‌کنند. بر اساس جدول ۲، متغیرها از پنج مولفه اول انتخاب شده‌اند و مولفه‌های پنجم به بعد در نظر گرفته نشدند. مولفه‌های ۱ تا ۵ به ترتیب ۳۳/۲۵، ۲۱/۵۹، ۱۶/۵۲، ۱۱/۱۶ و ۷/۰۷ درصد واریانس را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین دو مولفه اول و دوم بیش‌ترین تأثیر را بر تغییرات تولید رسوب در حوضه‌های مورد مطالعه دارند.

با توجه به جدول ۳ متغیرهای مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی از مولفه اول بیش‌ترین همبستگی را با تولید رسوب معلق دارند. در بین عوامل مولفه دوم، میانگین دبی سالیانه و ضریب پیچان‌رودی آبراهه به عنوان مهم‌ترین عامل مؤثر بر تولید رسوب شناخته شدند. بنابراین، عوامل مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی از مولفه اول، میانگین دبی سالیانه و ضریب پیچان‌رودی آبراهه اصلی از مولفه دوم و تراکم زهکشی آبراهه از مولفه سوم نقش مهمی در تولید رسوب معلق دارند. در نتیجه از دو مولفه اول، از هر کدام دو عامل، و از مولفه سوم یک عامل و در مجموع ۵ عامل، انتخاب شدند. به عبارتی از مولفه اول X_4 و X_6 ، مولفه دوم X_8 و X_{11} و مولفه سوم X_{11} انتخاب گردید (جدول ۳).

جدول ۲- نتایج حاصل از تحلیل مولفه‌های اصلی عوامل مؤثر بر تولید رسوب در منطقه مورد مطالعه

Table 2- Results of PCA of the effective factors on sediment yield in the study area

نام مولفه Component name	Statistical		
	مقدار ویژه Spacial value	درصد واریانس Variance (%)	درصد واریانس تجمعی Accumulative variance (%)
مولفه اول First component	3.99	33.25	33.25
مولفه دوم Second component	2.59	21.59	54.84
مولفه سوم Third component	1.98	16.52	71.36
مولفه چهارم Fourth component	1.39	11.60	82.97
مولفه پنجم Fifth component	0.84	7.07	90.05

شکل ۲ رابطه عوامل با دو مؤلفه اصلی را نشان می‌دهد، که به دلیل تاثیر مشابه بعضی از متغیرها در مؤلفه‌های اول و دوم هم‌پوشانی زیادی بین این متغیرها به وجود می‌آید که تعیین مقادیر بردارهای ویژه آن‌ها از روی شکل عملاً غیر ممکن می‌شود، به همین دلیل در جدول ۳ مقادیر مربوط به بردارهای ویژه هر یک از پارامترها در مورد هر یک از مؤلفه‌ها و هر یک از عوامل مورد بررسی ارائه شده است.

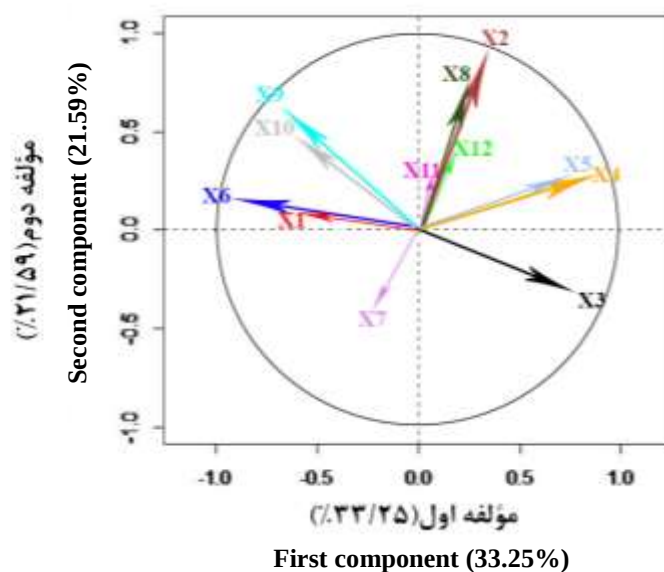
همان گونه که پیش از این اشاره شد، با استفاده از آزمون گاما برای پیش پردازش عوامل می‌توان ترتیب اهمیت عوامل ورودی و بهترین ترکیب از میان تمامی ترکیب‌های ممکن را تعیین نمود. در این پژوهش از بین ۱۵۰۰ ترکیب پیشنهاد شده، ۹۰ ترکیب برتر پیشنهادی که با استفاده از آزمون گاما به دست آمد، مورد بررسی قرار گرفت تا تاثیر هر عامل بر رسوب معلق مشخص گردد. در شکل ۳ هیستوگرام مقادیر درصد حضور عوامل در ترکیبات برتر نشان داده شده است. در این راستا به منظور مشخص نمودن ترتیب اهمیت عوامل ورودی ابتدا آزمون گاما برای تمامی آن‌ها (۱۲ پارامتر) انجام شد و مقدار آماره گاما تعیین گردید. مقادیر به دست آمده گاما برای هر ترکیب پیشنهاد شده برای تمامی حالت‌ها مقایسه شد. نتایج نشان داد که با حذف پارامتر تاثیرگذار مقدار آماره گاما زیاد و با حذف عامل کم‌تاثیر، مقدار این آماره کم می‌گردد.

با توجه به معادلات، حضور عوامل در مدل با کد یک و عدم حضور آن‌ها با کد صفر مشخص شد. مقادیر گاما، Gradient و V_{ratio} مربوط به ۹۰ ترکیب برتر پیشنهاد شده توسط آزمون گاما برای ایستگاه‌های هیدرومتری ارائه شد. مقادیر ناچیز گاما و V_{ratio} به دست آمده بیانگر دقت بالای مدل در یافتن خروجی‌های مطلوب از روی ورودی‌ها است. مقادیر زیاد Gradient نشان دهنده پیچیدگی بودن مدل نهایی است، زیرا هرچه Gradient کم‌تر باشد پیچیدگی مدل کم‌تر و مدل مناسب‌تر خواهد بود. با توجه به مقادیر گاما، عوامل میانگین دبی سالیانه، مساحت حوضه، ضریب پیچان‌رودی آبراهه اصلی و ضریب انشعاب‌پذیری آبراهه‌ها مهم‌ترین عوامل می‌باشند (مقدار گاما با حذف این عوامل نسبت به سایر پارامترها زیاد شده است) و به همین ترتیب عوامل درصد سطح سنگ‌های حساس به فرسایش در حوضه، طول آبراهه اصلی، میانگین بارش سالیانه، ضریب گراویلیوس، شیب متوسط حوضه، ارتفاع متوسط حوضه، تراکم زهکشی آبراهه‌ها و شیب ناخالص آبراهه اصلی در مرتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند. مقادیر درصد حضور هر یک از ۱۲ متغیر مورد بررسی در میان نود ترکیب برتر معادلات برآورد رسوب معلق در جدول ۴ و شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر مربوط به بردارهای ویژه هر یک از پارامترها در هر یک از مؤلفه‌ها

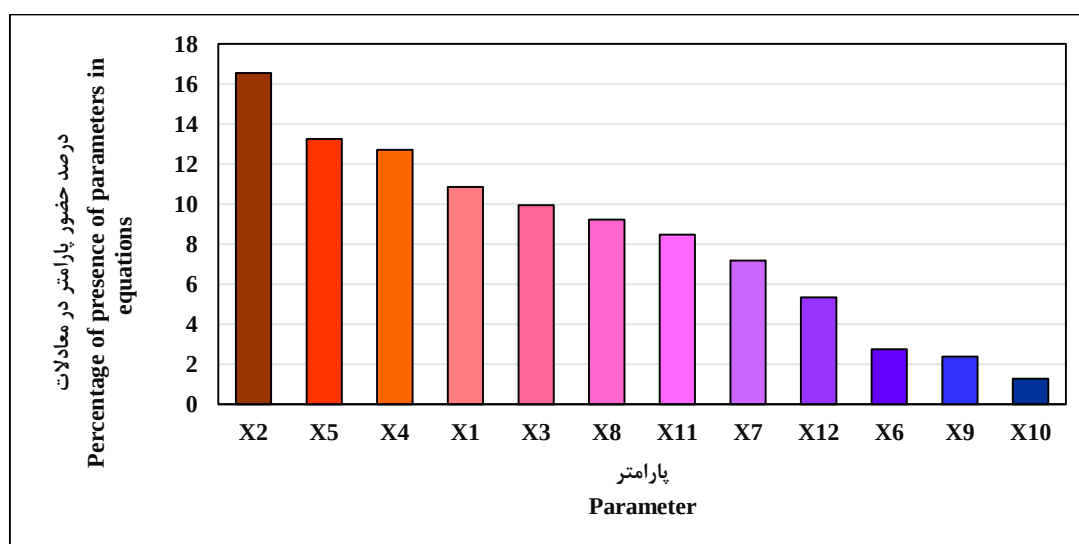
Table 3- The values for each parameter vectors in each component

نام متغیر Variable name	نماد Symbol	مؤلفه اول First component	مؤلفه دوم Second component	مؤلفه سوم Third component	مؤلفه چهارم Fourth component	مؤلفه پنجم Fifth component
میانگین بارش سالیانه Mean annual precipitation	X_1	-0.48	0.08	-0.34	-0.25	0.68
میانگین دبی سالیانه Mean annual discharge	X_2	.033	0.87	0.18	-0.08	0.005
درصد رخنمون سنگ‌های حساس به فرسایش Outcrop of erosion sensitive rocks (%)	X_3	0.77	-0.32	0.48	-0.16	0.05
مساحت Area	X_4	0.87	0.27	0.24	0.13	0.02
طول آبراهه اصلی Main chnnel lenght	X_5	0.72	0.24	0.1	0.55	0.07
شیب ناخالص آبراهه اصلی Main channel gross slope	X_6	-0.92	0.15	0.07	0.12	-0.26
ضریب گراویلیوس Gravilious coefficient	X_7	-0.21	-0.38	0.18	0.71	0.17
ضریب پیچان‌رودی آبراهه اصلی Main channel meandering coefficient	X_8	0.27	0.78	-0.1	-0.16	0.25
شیب متوسط حوضه Mean slope of basin	X_9	-0.64	0.59	0.38	0.24	-0.13
ارتفاع متوسط حوضه Mean elevation of basin	X_{10}	-0.59	0.46	0.59	0.06	0.13
تراکم زهکشی آبراهه Channel draining density	X_{11}	0.06	0.21	-0.73	0.58	0.12
ضریب انشعاب‌پذیری آبراهه‌ها Channels branching coefficient	X_{12}	0.17	0.42	-0.66	0.09	-0.4



شکل ۲- رابطه بین عوامل با دو مولفه اصلی

Figure 2- Relationship between factors and two major components



شکل ۳- درصد حضور پارامترها در ترکیبات پیشنهادی مدل‌ها

Figure 3- Percentage of presence of parameters in the suggested hybrids models

گاما جهت تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تولید و انتقال رسوبات آبی معلق استفاده شد. براساس نتایج حاصل از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی، به ترتیب دو عامل مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی به عنوان مهم‌ترین عوامل مؤثر بر مقدار رسوبات آبی معلق سالانه انتخاب شدند. بر اساس نتایج حاصل از آزمون گاما نیز ۱۲ متغیر اصلی و مؤثر بر رسوب معلق (رسوبات آبی معلق) شناسایی شده و تأثیر هر کدام بر رسوب معلق نیز مشخص شد.

نتایج حاصل از جدول ۴ نشان می‌دهد که عوامل ارتفاع متوسط حوضه، شیب متوسط حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی به ترتیب کم‌ترین حضور را در بین ترکیب‌های بهینه داشته‌اند. در نتیجه، این عوامل تأثیر کم‌تری در رسوب‌دهی حوضه داشته‌اند. از طرفی عوامل میانگین دبی سالیانه و طول آبراهه اصلی بیش‌ترین حضور و نیز بیش‌ترین تأثیر را در رسوب‌دهی در منطقه مورد مطالعه داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش از دو روش تجزیه به مولفه‌های اصلی و آزمون

جدول ۴- درصد حضور پارامترها در نود ترکیب برتر

Table 4- Percentage of presence of the parameters in the top ninety hybrids models

ردیف Row	پارامتر Parameter	نماد Symbol	درصد حضور Percentage of presence
1	میانگین بارش سالیانه Mean annual precipitation	X _۱	10.86
2	میانگین دبی سالیانه Mean annual discharge	X _۲	16.55
3	درصد رخمون سنگ‌های حساس به فرسایش Outcrop of erosion sensitive rocks (%)	X _۳	9.94
4	مساحت Area	X _۴	12.71
5	طول آبراهه اصلی Main channel length	X _۵	13.26
6	شیب ناخالص آبراهه اصلی Main channel gross slope	X _۶	2.76
7	ضریب گراویلیوس Gravilious coefficient	X _۷	7.18
8	ضریب پیچان‌رودی آبراهه اصلی Main channel meandering coefficient	X _۸	9.22
9	شیب متوسط حوضه Mean slope of basin	X _۹	2.39
10	ارتفاع متوسط حوضه Mean elevation of basin	X _{۱۰}	1.29
11	تراکم زهکشی آبراهه Channel draining density	X _{۱۱}	8.47
12	ضریب انشعاب پذیری آبراهه‌ها Channels branching coefficient	X _{۱۲}	5.34

با توجه به نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر می‌توان به این نتیجه رسید که بررسی پارامترهای بیش‌تر زمینه‌های ارزیابی اهمیت آن‌ها در تولید رسوب را فراهم نموده است و در نهایت با توجه به همبستگی بسیاری از پارامترهای مورد بررسی با یکدیگر، تعداد محدودی پارامتر که اهمیت بیش‌تری در برآورد رسوب معلق دارند، انتخاب شده‌اند. افزایش دقت تهیه مدل رسوب به دلیل دستیابی به پارامترهایی مهم‌تر و مؤثرتر در تولید رسوب و شناسایی آن‌ها به منظور بررسی بهترین اقدامات مدیریتی رسوب در حوضه‌های آبخیز از دیگر یافته‌های این پژوهش است. پیشنهاد می‌شود که مشابه با این پژوهش در دیگر حوضه‌های آبخیز با شرایط متفاوت از نظر شرایط آب و هوایی، توپوگرافی، زمین‌شناسی و... انجام شود.

بر اساس مقایسه نتایج حاصل از دو روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و آزمون گاما می‌توان به این نتیجه رسید که چنانچه هدف از پژوهش و یا مطالعه تهیه مدلی با بالاترین دقت در برآورد رسوب معلق باشد، مدل ۱۲ متغیره حاصل از آزمون گاما شامل عواملی از قبیل فیزیوگرافی، زمین‌شناسی، اقلیمی و هیدرولوژیکی پیشنهاد می‌گردد، ولی اگر تهیه مدلی با دقت مناسب و تعداد متغیر ورودی محدود مد نظر باشد، مدل ۵ متغیره حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد می‌گردد. در عین حال اگر هدف تهیه مدلی با کم‌ترین متغیر ورودی و دسترسی و محاسبه آسان آنها و برآورد اولیه رسوبات معلق باشد، مدل دو متغیره (بر اساس عوامل مساحت حوضه و شیب ناخالص آبراهه اصلی) حاصل از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی پیشنهاد می‌گردد.

منابع

1. Adhami M., and Sadeghi S.H.R. 2016. Sub-watershed Prioritization based on sediment yield using game theory. Journal of Hydrological Processes S0022-1694(16): 30487-5.
2. Agnihotri D., Kumar T., and Jhariya D. 2020. Intelligent vulnerability prediction of soil erosion hazard in semi-arid and humid region. Environment, Development and Sustainability 23: 2524-2551.
3. Alizadeh A. 2019. Principles of Applied Hydrology. Astan Quds Razavi Pub., 41st ed., Mashhad. 941p. (In Persian)
4. Bina M., Ranjbaran L., and Mosavi Jahromi S.H. 2009. Estimation of suspended sediment using physiographic

- parameters in the upstream basin of Karkheh. Proceedings of the 8th International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University, February 2009, Ahvaz, Iran. (In Persian)
5. Chuenchum P., Xu M., and Tang W. 2020. Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang-Mekong River by using the modified RUSLE Model. *International Soil and Water Conservation Research* 8: 213-227.
 6. Du M., Mu X., Zhao G., Gao P., and Sun W. 2021. Changes in runoff and sediment load and potential causes in the Malian River basin on the Loess Plateau. *Sustainability* 13: 130-145.
 7. Ghabaei Sough M., Mosaedi A., Hessam M., and Hezarjaribi A. 2010. Evaluation of the effect of pre-processing of the input parameters of the artificial neural networks (ANNs) using stepwise regression and gamma test in order to obtain a quicker estimation of evapotranspiration. *Journal of Water and Soil* 3(24): 610-624. (In Persian with English abstract)
 8. Helena B., Pardo R., Vega M., Barrado E., Fernandez J., and Fernandez M. 2000. Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 34: 807-816.
 9. Hajigholizadeh M., Melesse A.M., Hector R., and Fuentes H.R. 2018. Erosion and Sediment Transport Modelling in Shallow Waters: A Review on Approaches, Models and Applications. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(3): 518 (24p).
 10. Johnson R.A., and Wichern D.W. 1982. *Applied multivariate statistical analysis*. Prentice- Hall Inc., Englewood Cliffs, England. 590p.
 11. Kemp SE., Wilson ID., and Ware JA. 2004. A tutorial on the gamma test. *International Journal of Simulation* 6 (1-2): 67-75
 12. Kheirfam H., and Mokarram-Kashtiban S. 2018. A regional suspended load yield estimation model for ungauged watersheds. *Water Science and Engineering* 11(4): 328-337
 13. Khyerfam H., and Vafakhah M. 2015. Evaluation of the gamma test and Andrew curves in order to estimate the amount of suspended sediment of the watersheds of the south and southeast of the Khazar Sea. *Watershed Management Journal* 6(11): 47-58. (In Persian with English abstract)
 14. Liu C.W., Lin K.H., and Kuo Y.M. 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment* 313: 77-89.
 15. Mazhar N., Mirza A.L., Abbas S., Akram M.A.N., Ali M., and Javid K. 2021. Effects of climatic factors on the sedimentation trends of Tarbela Reservoir, Pakistan. *SN Applied Sciences* 122: 300-315.
 16. Mesdaghi M. 2011. *Statistics and regression methods*. Imam Reza University. Mashhad. (In Persian)
 17. Mohammadi A.A., Yousefi M., Soltani J., Ahangar A.G., and Javan S. 2018. Using the combined model of gamma test and neuro-fuzzy system for modeling and estimating lead bonds in reservoir sediments. *Environment Science Pollution Control* 25(30): 315-324.
 18. Mosaedi A., Mohammadi O.K. A., Najafinezhad A., and Yaghmaei F. 2006. Optimization of flow and suspended sediment discharge in selected stations of Gorganroud. *Iranian Journal of Natural Resources* 59(2): 331-342. (In Persian with English abstract)
 19. Noori R., Karbassi A.R., Moghaddamnia A., Han D., Zokaei-Ashtiani M.H., Farokhnia A., and Gousheh M.G. 2011. Assessment of input variables determination on the SVM model performance using PCA, Gamma test, and forward selection techniques for monthly stream flow prediction. *Journal of Hydrology* 401(3): 177-189.
 20. Rashidi S., Vafakhah M., Lafdani E.K., and Javadi M.R. 2016. Evaluating the support vector machine for suspended sediment load forecasting based on gamma test. *Arabian Journal of Geoscience* 9(11): 583.
 21. Remesan R., Shamim M.A., and Han D. 2008. Model data selection using gamma test for daily solar radiation estimation. *Journal of Hydrological Processes* 22: 4301-4309.
 22. Sadeghi S.H.R., Noor H., Fazli S., and Raesi M.B. 2011. Estimation of thunderstorm sediment based on rainfall and runoff parameters in research and education watershed of Tarbiat Modarres University. *Journal of Soil and Water Science* 21(2): 158-149. (In Persian with English abstract)
 23. Shi Z. H., Huangb X. D., Ai L., Fang N.F., and Wu G.L. 2014. Quantitative analysis of factors controlling sediment yield in mountainous watersheds: Geomorphology 226: 193-201.
 24. Shozugawa K., Kuno A., Matsuo M., and Sano Y. 2008. Estimation of the sources of pelagic sediments from the South Pacific Ocean to the Antarctic Ocean. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 278(2): 331-335.
 25. Vahabzadeh G.H., Safari A.S., Farhodi M., Abdollahi H., Fathyad H., and Khosravi G.H. 2014. Study of erosion and sediment delivery ratio in dirt and forest paths. *Journal of Soil and Water Sciences-Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 18(70): 295-313. (In Persian with English abstract)
 26. Wilkes M.A., Gittins J.R., Mathers K.L., Mason R., Casas-Mulet R., Vanzo D., Mckenzie M., Murray-Bligh J., England J., Gurnell A., and Jones J.I. 2018. Physical and biological controls on fine sediment transport and storage in rivers. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6(2): e1331 (21 pp.). *Water* 6:e1331. doi: 10.1002/wat2.1331
 27. Yuana X.P., Braun J., Guerit L., Simon B., Bovy B., Roubay D., Robin C., and Jiao R. 2019. Linking continental erosion to marine sediment transport and deposition: A new implicit and O(N) method for inverse analysis, *Earth*

- and Planetary Science Letters. 524-115728.
28. Zare Chahoki A., Salajeghe A., Mahdavi M., Khalighi Sigaroudi S.H., and Asadi M. 2013. Regional model of flow duration curve in watersheds with no statistics in arid areas, Iranian Journal of Natural Resource 66(2): 125-139. (In Persian with English abstract)
29. Zhang H.Y., Shi Z.H., Fang NF., and Gua M.H. 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. Geomorphology 234(1): 19-27.



Assessment the Effective Factors on Production and Transportation of Suspended Sediments using Gamma Test and PCA Techniques

A. Mosaedi^{1*}– E. Ramezanipour²–M. Mesdaq³– M. Tajbakhshian⁴

Received: 09-01-2020

Accepted: 25-09-2021

Introduction: Soil erosion and sediment transportation decrease water resources, and cause many social and economic problems. On the other hand, sediment transportation by rivers causes problems such as water quality degradation, reservoirs sedimentation, redirect of rivers, or decrease in their transportability. Therefore, finding the proper methods in sediment yield study in watersheds is essential in planning and management of land and water resources. Climatic characteristics, physiography, geology, and hydrology of basins are the most effective factors in producing and transporting sediments according to several sources, but the role and impact of some factors are more pronounced than the others in different areas. As a result, the objective of this study was to investigate and identify the most important climatic, physiographic, geological, and hydrological factors in several watersheds of the northeastern part of Iran, by applying Gamma Test (GT) and principal component analysis (PCA) techniques.

Materials and Methods: In this study, the data of discharge flow and suspended sediment concentration, and daily flow discharge recorded in 15 hydrometric stations in Mashhad and Neyshabour restricts and required maps were provided from the Regional Water Company of Khorasan Razavi, Iran. After drawing statistical bar graph period of suspended sediment, daily discharge, annual precipitation, and relatively adequate data, stations with the longest period and with the lowest deficit data were selected to determine the common statistical periods. Therefore, in this study, the time period of 1983-1984 to 2011-2012 was selected, and the run test was applied to control data quality and homogeneity. Then, the most effective factors of sediment yield were determined by principal component analysis (PCA) and Gamma Test (GT).

Results and Discussion: The results of the principal component analysis showed that 90 percent of the first five components justify the changes. Among the factors, area and gross gradient of the mainstream from the first component, the average annual flow rate of mainstream, meandering waterways of the mainstream from second component, and drainage density of third component were identified as the most important influencing factors on suspended sediment production. Ninety superior combinations of 1500 proposed combinations were obtained by Gamma Test to evaluate the effects of each parameter on suspended sediment yield. To determine the order of importance of the entered parameters, first, Gamma Test was performed on all 12 parameters. Gamma values of all cases for each proposed combination were compared. The results showed that the impact of these statistics was lowered by eliminating high gamma parameters and the removal of low values. The data analysis revealed that the low levels of gamma and high accuracy of ratio to find the desired outputs from entries. By lowering the gradient, the complexity of the model was lowered and more suitable model was provided. As a result, high levels of gradient represented the complexity of the final model. The results of the percentage values of each of the 12 variables were considered among the superior equations for estimating the suspended sediment composition. In this regard, the mean annual discharge, main channel length, area, average annual rainfall, and percentage of the outcrop of erosion sensitive rocks with a total of 63 percent of the proposed equations were the most important factors affecting the sediment yield in the study area. The average height parameter of area, the average and gross slope of the mainstream had the lowest presence among the optimized compounds.

Conclusion: Based on the results of the principal component analysis, the two factors of basin area and gross slope of the mainstream were selected as the most important factors affecting the amount of annual suspended sediment load, respectively. Based on the results of the Gamma Test, 12 main variables affecting suspended

1- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad

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

2 and 3- Former M.Sc. Student of Watershed Management and Professor, Faculty of Natural Resources and Environmental Science, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

4- Ph.D. Candidate, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad

DOI: 10.22067/JSW.2021.14112.0

sediment load were identified and the effect of each of them on the production and transport of suspended sediment was determined. Based on the comparison of the results of the two methods of PCA and GT, it can be concluded that if the purpose of research or study is to prepare a model with the highest accuracy in estimating suspended sediment load, the 12-variable model of GT includes factors related to physiographical, geological, climatic and hydrological factors are suggested. However, if the preparation of a model with appropriate accuracy and a limited number of input variables is considered, a 5-variable model derived from the PCA method is proposed. At the same time, if the purpose is to prepare a model with the least input variables and their easy access and calculation and initial estimation of suspended sediments, a bivariate model (based on basin area and gross slope of the mainstream factors) resulting from PCA is proposed. According to the results of the present study, it can be concluded that the study of more parameters has provided grounds for evaluating their importance in sediment yield. Finally, due to the correlation of many parameters with each other, a limited number of parameters that have a more important role in suspended sediment estimation, were selected. Another finding of this study is the increase in the accuracy of the sediment model's preparation due to achieving more important and effective parameters in sediment yield and identifying them in order to investigate the best sediment management measures in watersheds. It is suggested that similar research should be done in other watersheds with different conditions in terms of climatic conditions, topography, geology, and so on.

Keywords: Annual rainfall, Gamma test, Principal component analysis, Suspended sediment



مقاله پژوهشی

شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) تحت شرایط تنش

خشکی: ۲- شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد

اسماعیل فرخی^۱ - مهدی نصیری محلاتی^{۲*} - علیرضا کوچکی^۳ - سید علیرضا بهشتی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۱۷

چکیده

پیش‌بینی عملکرد محصول با هدف بهینه کردن میزان آب آبیاری به خصوص هنگامی که آب قابل دسترس محدود باشد، برای افزایش پایداری در تولید بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه مدل آب محور آکوواکراپ که توسط فائو توسعه داده شده است، به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست توده و عملکرد گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری واسنجی و صحت‌سنجی شد. آزمایش در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در دو سال زراعی ۱۳۹۵-۱۳۹۶ اجرا شد. واسنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۵ و صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۶ انجام شد. در این مطالعه مدل آکوواکراپ تحت شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) و کم آبیاری (۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی) اجرا و در دو مرحله رویشی و زایشی برای محصول گوجه‌فرنگی واسنجی و صحت‌سنجی شد. کارایی مدل با استفاده از میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تعیین (R^2) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل آکوواکراپ به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده بالای سطح خاک و عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی برای همه تیمارهای آبیاری به‌ترتیب با مقادیر شاخص‌های آماری $R^2=0.93$, $d=0.85$, $NRMSE=0.14/81$ ، $R^2=0.97$, $d=0.96$, $NRMSE=0.09/97$ و $R^2=0.92$, $d=0.94$, $NRMSE=0.09/92$ واسنجی شد. در طول مرحله صحت‌سنجی، $R^2=0.73$, $d=0.90$, $NRMSE=0.13/64$ ، $R^2=0.95$, $d=0.95$, $NRMSE=0.15/64$ و $R^2=0.95$, $d=0.95$, $NRMSE=0.15/64$ به‌ترتیب برای بهره‌وری آب، زیست توده بالای سطح خاک و عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی بدست آمد. به طور کلی توانایی مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی مقادیر بهره‌وری آب، زیست‌توده بالای سطح خاک و عملکرد مشاهده شده رضایت‌بخش بود، با این وجود کارایی مدل با افزایش تنش آب کاهش پیدا کرد.

واژه‌های کلیدی: آکوواکراپ، مرحله رویشی و زایشی، کم آبیاری، مدل‌سازی، بهره‌وری آب

مقدمه

آب مواجهه شود (۲۷). با توجه به نیاز آبی بالای گوجه‌فرنگی دارد (۱۶)، ۱۷ و ۱۸) و به دلیل اینکه آب یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیرگذار بر رشد و تولید گیاه می‌باشد، برنامه‌ریزی آبیاری برای افزایش عملکرد کمی و کیفی گوجه‌فرنگی بسیار مهم است (۲۶). رشد و نمو گیاه گوجه‌فرنگی بویژه در شرایط تنش آبی، پدیده‌ای بسیار پیچیده است، بنابراین مدل‌های شبیه‌سازی موقعیت بسیار مناسبی ایجاد می‌کنند تا در پیش‌بینی و توضیح رفتار چنین سیستم پیچیده و پویایی که رشد گیاه را توصیف می‌کند به عنوان ابزارهای قدرتمندی عمل کنند (۱۱).

آکوواکراپ مدلی است چند گیاهی که عملکرد انواع گیاهان زراعی یکساله را در شرایط مختلف مدیریتی و فیزیولوژیکی در واکنش به محدودیت آب شبیه‌سازی می‌کند (۲۰ و ۲۲). آکوواکراپ

یکی از چالش‌های واقعی در بخش کشاورزی کاهش مصرف آب و در عین حال تأمین تغذیه مورد نیاز جمعیت رو به رشد جهان می‌باشد. بدون اقدام‌های مؤثر جهت بهبود کارایی، پیش‌بینی می‌شود که مصرف آب کشاورزی تا سال ۲۰۵۰ حدود ۲۰ درصد افزایش یابد (۲۸) و یا به عبارت دیگر جهان تا سال ۲۰۳۰ با کمبود ۴۰ درصدی

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادان، گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(*) - نویسنده مسئول:
(Email: mnassiri@um.ac.ir)

۴- دانشیار، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی

ارقام رشد نامحدود گوجه‌فرنگی به دلیل پیچیدگی‌های رشد و نمو، کمتر مورد توجه محققان مدل‌سازی قرار گرفته است و اکثر مطالعات انجام گرفته بر روی گوجه‌فرنگی در جهان، در مورد گوجه‌فرنگی‌های مخصوص فراوری می‌باشد که ویژگی مهم آن‌ها این است که تنها یک بار آن هم با دستگاه مکانیزه، برداشت صورت می‌گیرد. از طرفی تاکنون مطالعه‌ای به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی در ایران صورت نگرفته است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی با تمرکز بر شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده و عملکرد آن با استفاده از مدل آکوواکراپ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آکوواکراپ

از همان مسیری که تعرق صورت می‌گیرد، دی‌اکسیدکربنی که از طریق فتوسنتز به کربوهیدرات‌ها تبدیل می‌شود نیز توسط گیاه جذب می‌شود، از اینرو میزان تعرق با تولید زیست‌توده متناسب است (۲۲ و ۲۵). رابطه بین زیست‌توده تولید شده و آب مصرف شده توسط یک گونه خاص گیاهی برای شرایط خاص آب و هوایی مشخص به صورت خطی است، از اینرو آکوواکراپ به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده از نوعی تابع بهره‌وری آب گیاه نرمال‌شده (ماده خشک تولید شده بالای سطح زمین در واحد سطح زمین یا در واحد میزان آب تعرق‌یافته (میلی متر)) استفاده می‌کند. این رابطه، هسته مدل آکوواکراپ را تشکیل می‌دهد و از اینروست که آکوواکراپ را مدلی آب محور می‌نامند. بنابراین به منظور شبیه‌سازی زیست‌توده از رابطه (۲) استفاده می‌شود (۲۲ و ۲۵):

$$B = WP \cdot \Sigma Tr \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن B زیست‌توده بالای سطح خاک (کیلوگرم در متر مربع)، WP بهره‌وری آب نرمال‌شده (کیلوگرم در متر مربع) و Tr (میلی‌متر) تعرق گیاه می‌باشد.

آکوواکراپ به منظور محاسبه عملکرد، از شاخص برداشت (HI) تنظیم شده با توجه به زمان تنش در شروع تشکیل محصول، در طول گلدهی و هنگام تشکیل عملکرد، استفاده می‌کند (۲۲ و ۲۵). رابطه ۳ محاسبه عملکرد توسط آکوواکراپ را بیان می‌کند.

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه Y عملکرد (کیلوگرم در متر مربع)، HI_o شاخص برداشت مرجع، B زیست‌توده بالای سطح خاک (کیلوگرم در متر مربع) و f_{HI} ضریبی است که اثر تنش‌ها را مدنظر قرار می‌دهد و شاخص برداشت را نسبت به مقدار مرجع خودش تنظیم می‌کند. تنظیم شاخص برداشت به زمان و شدت تنش کمبود آب و دمای هوا در طول دوره رشد بستگی دارد. تأثیر تنش بر شاخص برداشت

اثرات پویای طیف وسیعی از تنش‌های محیطی، به‌ویژه تنش‌های آبی و دمایی، را بر رشد گیاه محاسبه می‌کند و تأثیر غلظت دی‌اکسید کربن جو بر بهره‌وری آب زراعی را مد نظر قرار می‌دهد. اثرات تنش‌های ناشی از عناصر غذایی و شوری خاک نیز به طور غیر مستقیم با واسنجی مدل برای تولید زیست‌توده در شرایط متفاوت حاصلخیزی و شوری منطقه مورد بررسی در نظر گرفته می‌شود (۸). رابطه بین عملکرد محصول زراعی و آب که در مدل آکوواکراپ استفاده شده است (۴)، بوسیله رابطه ساده‌ای توصیف می‌شود که در آن کاهش عملکرد نسبی با کاهش نسبی متناظر در تبخیر و تعرق مرتبط است (رابطه ۱).

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_x}\right) \quad \text{رابطه ۱}$$

که در این رابطه Y_x و Y_a به ترتیب عملکرد واقعی و حداکثر (ton/ha)، $(1 - Y_a/Y_x)$ کاهش عملکرد نسبی، ET_x و ET_a به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و حداکثر (mm)، $(1 - ET_a/ET_x)$ تنش نسبی آب و K_y ضریب پاسخ عملکرد^۱ (ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر و تعرق) می‌باشند. ضریب پاسخ عملکرد (K_y) مجموعه‌ای از روابط پیچیده بین تولید و مصرف آب توسط گیاه است که بسیاری از فرآیندهای بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی در آن دخیل هستند (۱۳).

چندین آزمایش با مدل آکوواکراپ به منظور بررسی شبیه‌سازی کم آبیاری و عملکرد محصول در پاسخ به اعمال تنش‌های مختلف آبی در مناطق وسیعی از جهان انجام شده است. آرایا و همکاران (۲) از آکوواکراپ به منظور بهبود مصرف آب محصول در شرق آفریقا، احمدی و همکاران (۱۱) به منظور بررسی رشد گیاه و محتوی آب خاک تحت مدیریت‌های آبیاری مختلف در جنوب ایران، گریوس و وانگ (۹) برای ارزیابی استراتژی‌های مدیریتی در آبیاری با هدف بهبود مصرف آب کشاورزی در جنوب تایوان و پاور و همکاران (۱۹) برای بررسی بهبود بهره‌وری آب استراتژی‌های مختلف آبیاری در هند، استفاده کردند.

بسیاری از مطالعات نیز لزوم آزمایش‌های بیشتر به منظور واسنجی پارامترهای کلیدی در شرایط متنوع اقلیمی، خاکی، زراعی، آبیاری و مدیریت‌های مزرعه‌ای پیشنهاد داده‌اند (۱۲، ۱۰، ۲۳ و ۱۴). کاترجی و همکاران (۱۴) نشان دادند که مدل آکوواکراپ توانست زیست‌توده نهایی و عملکرد گوجه‌فرنگی را در شرایط بدون تنش آب و تنش متوسط آب به خوبی شبیه‌سازی کند، این در حالی است که شبیه‌سازی عملکرد در شرایط تنش شدید آب ضعیف گزارش شد. رشد و نمو گیاه گوجه‌فرنگی پدیده‌ای بسیار پیچیده است (۱۱) به خصوص زمانی که تحت تأثیر مسئله پیچیده تنش آبی نیز قرار بگیرد.

محل اجرای آزمایش

این پژوهش در دو سال متوالی (۱۳۹۵-۹۶) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد اجرا شد. بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در سال اول آزمایش ۲۹/۹ و در سال دوم ۸/۳ میلی‌متر بود (شکل ۱). در طول فصل رشد، میانگین تشعشع خورشیدی ۱۸/۱۰ و ۱۸/۴۸ مگاژول بر متر مربع بر روز به‌ترتیب در سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ بود. میانگین حداقل و حداکثر دما در طول فصل رشد در سال ۱۸/۵، ۹۵ و ۳۳/۱ درجه سانتی‌گراد و در سال ۱۸/۴، ۹۶ و ۳۳/۲ درجه سانتی‌گراد بود (شکل ۱). خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

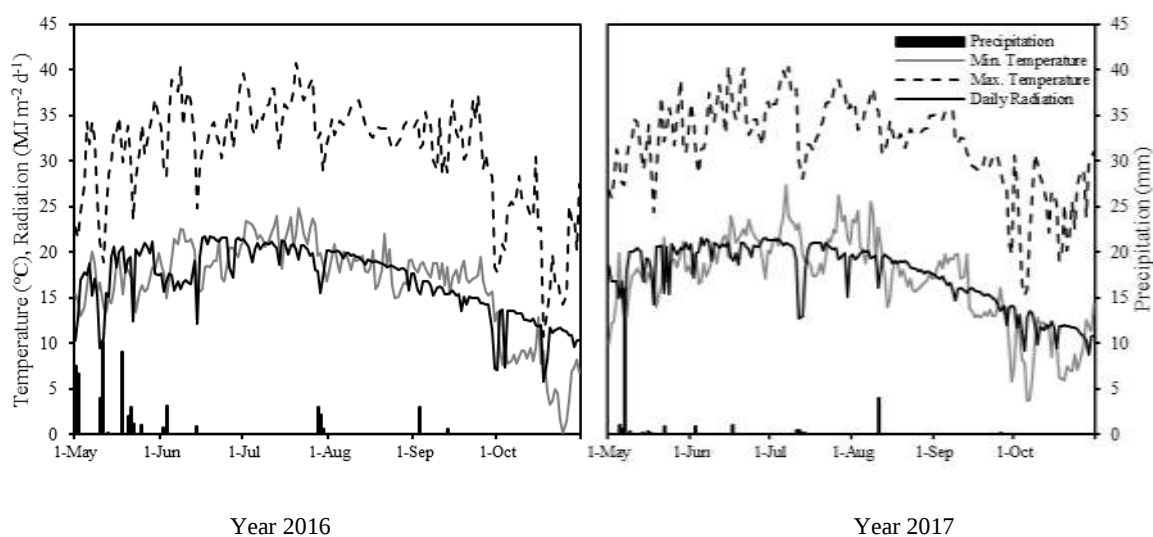
طرح آماری و شرایط انجام آزمایش

آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با اجرای رژیم‌های مختلف آبیاری در مرحله رویشی و زایشی به ترتیب به عنوان فاکتورهای کرت‌های اصلی و فرعی در سه تکرار اجرا شد. نشاءهای ۳۵ روزه گوجه‌فرنگی با اندازه‌های یکسان (۱۵ تا ۲۰ سانتی‌متر) در مرحله ۴ تا ۵ برگی در ۲۷ کرت ۴/۵ در ۳ متری (۱۳/۵ متر مربع) در تاریخ‌های ۱۳۹۵/۲/۱۵ و ۱۳۹۶/۲/۱۵ با تراکم ۲/۶ بوته در متر مربع کاشته شدند.

می‌تواند مثبت ($f_{HI} > 1$) یا منفی ($f_{HI} < 1$) باشد.

آکواکراپ تنها به تعداد کمی داده‌های ورودی نیاز دارد که این داده‌ها نیز به سادگی قابل دستیابی هستند. پارامترهای مورد نیاز مدل شامل پارامترهای آب و هوایی، گیاهی، خاکی، مدیریت مزرعه، آب زیرزمینی، عمق حداقل ریشه مؤثر و عمق اولیه آب خاک یا محتوای آب خاک می‌باشد. متغیرهای آب و هوایی شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، بارندگی، غلظت دی‌اکسیدکربن جو و تبخیر و تعرق مرجع (ETo) می‌باشد. در مطالعه حاضر، مقدار پیش فرض غلظت دی‌اکسیدکربن استفاده شد. پارامترهای گیاهی شامل تراکم کشت، تاریخ کشت، بهره‌وری آب نرمال‌سازی شده برای تبخیر و تعرق مرجع و غلظت دی‌اکسیدکربن جو (WP^*) می‌باشد. پارامترهای خاکی شامل بافت خاک، محتوای آب اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی و هدایت هیدرولیک اشباع می‌باشد. مدیریت مزرعه‌ای شامل روش آبیاری، ارتفاع کرت و زمان آبیاری می‌باشد.

در این مطالعه از نسخه ۶/۱ آکواکراپ (۶) برای شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی استفاده شد. مدل در حالت زمان حرارتی (درجه روز رشد) اجرا شد. دوره‌های شبیه‌سازی با چرخه رشد گیاه مرتبط بودند (روز اول پس از کاشت تا رسیدگی).



شکل ۱- داده‌های روزانه هواشناسی ثبت شده در طول فصل رشد در دو سال اجرای آزمایش (ایستگاه هواشناسی مشهد)

Figure 1- Daily meteorological data for Mashhad, Iran, during crop growing season in the two years of the experiment (2016 and 2017; Mashhad Weather Station)

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

عمق (سانتی‌متر)	بافت	پتاسیم	فسفر	نیتروژن کل	هدایت الکتریکی	کربن آلی	ماده آلی	اسیدیته
Depth (cm)	Texture	K (mg/kg)	P (mg/kg)	Total N (%)	EC (dS/m)	OC (%)	OM(%)	pH
0-30	Silty clay loam	289	13.5	0.076	6.75	0.65	1.12	8.15

گل دهی تا پایان دوره رشد به عنوان مرحله زایشی در نظر گرفته شد.

محاسبه آب آبیاری

قبل از اجرای آزمایش، نیاز آبی گیاه گوجه فرنگی با استفاده از نرم افزار کراپ وات ۰/۸ محاسبه شد. اطلاعات مورد نیاز مدل کراپ وات شامل داده های گیاهی، اقلیمی و خاک بود. داده های هواشناسی (میانگین دمای ماهانه، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارش) که اصلی ترین داده های مورد نیاز تخمین آب مورد نیاز گیاه در مدل کراپ وات می باشد از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

براساس داده های ۳۰ ساله هواشناسی (۱۹۸۶-۲۰۱۵ میلادی)، مقدار خالص آب مورد نیاز گوجه فرنگی در شرایط آب و هوایی مشهد و مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، ۸۲۴/۵ میلی متر و کل آبیاری ناخالص، ۱۲۰۴/۵ میلی متر محاسبه شد. به منظور آبیاری گیاهان از روش آبیاری قطره ای استفاده شد. نوار تیپ های ۲۵ سانتی متری در مرکز هر ردیف دوتایی قرار داده شد.

فاصله بین ردیف های کاشت ۱/۵ متر و فاصله بین نشاء ها ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نشست آب بین کرت های تیمارهای مختلف، فاصله بین کرت های اصلی ۳ متر، کرت های فرعی ۱/۵ متر و تکرارها ۲/۵ متر در نظر گرفته شد.

آزمایش به نحوی اجرا شد که اثر کم آبیاری و سطوح مختلف آن در هر دو مرحله رویشی و زایشی مورد بررسی قرار گیرد، به این منظور فاکتورهای اصلی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی (100V)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (75V)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد رویشی (50V) و فاکتورهای فرعی این آزمایش شامل: ۱- آبیاری کامل به میزان ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی (100R)، ۲- آبیاری به میزان ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (75R)، ۳- آبیاری به میزان ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رشد زایشی (50R) بود. بنابراین این طرح شامل ۹ ترکیب تیماری می باشد. تیمارهای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. از کاشت تا تشکیل ۱۰ درصد گل ها در هر کرت به عنوان مرحله رویشی و از ۱۰ درصد

جدول ۲- توصیف تیمارهای آزمایش

Table 2- Description of experimental treatments

تیمار (رژیم های آبیاری) Treatment (irrigation regimes)	توصیف تیمار Description
100V-100R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در تمامی مراحل رشد (آبیاری کامل) Irrigation applied 100% water requirement at the all growth stages (full irrigation)
100V-75R	اعمال آبیاری ۱۰۰ نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
100V-50R	اعمال آبیاری ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 100% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
75V-100R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
75V-75R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
75V-50R	اعمال آبیاری ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 75% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage
50V-100R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۱۰۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 100% water requirement at the reproductive stage
50V-75R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۷۵ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 75% water requirement at the reproductive stage
50V-50R	اعمال آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله رویشی و ۵۰ درصد نیاز آبی در مرحله زایشی Irrigation applied 50% water requirement at the vegetative stage and 50% water requirement at the reproductive stage

جدول ۳- مقادیر آب اعمال شده در رژیم‌های مختلف آبیاری

Table 3- Amount of water applied in different irrigation regimes

تیمار (رژیم‌های آبیاری)	مرحله رویشی	مرحله زایشی	کل فصل رشد
Treatment (irrigation regimes)	Vegetative stage (mm)	Reproductive stage (mm)	Total growing season (mm)
100V-100R	253.4	951.1	1204.5
100V-75R	253.4	713.3	966.7
100V-50R	253.4	475.6	729.0
75V-100R	190.1	951.1	1141.2
75V-75R	190.1	713.3	903.4
75V-50R	190.1	475.6	665.6
50V-100R	126.7	951.1	1077.8
50V-75R	126.7	713.3	840.0
50V-50R	126.7	475.6	602.3

درون آون قرار گرفتند و سپس وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد. میوه‌های گوجه‌فرنگی به صورت دستی و هنگامی که به طور کامل رسیدند برداشت شدند. برداشت در هر دو فصل رشد در ۵ نوبت در تاریخ‌های یکم، چهاردهم، بیست و یکم، بیست و نهم مرداد ماه، دوازدهم شهریور ماه و دوم مهرماه انجام گرفت. هر کرت به دو بخش مساوی تقسیم شده بودند، یک بخش برای نمونه‌برداری‌های تخریبی در طول فصل رشد و بخش دیگر برای اندازه‌گیری عملکرد.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز مدل آکوواکراپ می‌باشند در بازه سی‌ساله (از ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۷ میلادی) از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در مدل آکوواکراپ به داده‌های خاک شامل میزان آب در خاک در حالت اشباع (θ_{sat})، ظرفیت زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) و هدایت هیدرولیک خاک اشباع (K_{sat}) نیاز می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از آزمایش خاک مزرعه (جدول ۱) و با استفاده از برنامه Soil Water Characteristics (version 6.02.74) که توسط سازمان خدمات تحقیقات ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است، خصوصیات خاک ذکر شده در بالا به منظور استفاده در مدل آکوواکراپ برآورد شدند.

داده‌های رطوبت خاک

دور آبیاری براساس برنامه آبیاری حاصل از برآورد مدل کراپ‌وات تنظیم شد. دور آبیاری در طول فصل رشد ثابت نبود و بسته به مرحله رشد و نیاز آن مرحله به آب تغییر می‌کرد. اما به طور کلی و در اکثر مراحل، آبیاری هر دو روز یکبار انجام شد. همه آبیاری‌ها در محدوده زمانی ساعت ۸ تا ۱۰ صبح انجام شدند. اندازه‌گیری رطوبت در

تقریباً یک هفته بعد از انتقال هنگامی که بوته‌های گوجه‌فرنگی به خوبی مستقر شده بودند، تیمارهای آبیاری اجرا شد. آبیاری سه بار در هفته در زمان یکسان برای همه تیمارها بر اساس کل آبیاری ناخالص و برنامه آبیاری بدست آمده از کراپ‌وات اجرا شد. عمق آب مصرف‌شده در رژیم‌های مختلف آبیاری و در مراحل مختلف رشدی در جدول ۳ نشان داده شده است. برای تنظیم حجم مذکور در هر نوبت آبیاری از کنتور حجمی استفاده شد. به منظور جلوگیری از اختلاط حجم تیمارهای آبی برای آب ورودی تمام کرت‌ها شیر آب در نظر گرفته شد و در زمان آبیاری هر کرت شیرهای آب سایر کرت‌ها بسته بود.

جمع‌آوری داده‌ها

داده‌های گیاهی

در هر دو فصل رشد، پارامترهای رشدی و فیزیولوژیکی گیاه با اندازه‌گیری دو بوته در هر کرت با فاصله دو هفته‌ای انجام شد. نمونه‌برداری از ۴۵ روز بعد از انتقال^۱ نشاء (DAT) تا ۱۴۵ روز بعد از انتقال نشاء ادامه یافت. پس از نمونه‌برداری تخریبی و جدا کردن کامل بوته از سطح خاک، برگ، ساقه و میوه از یکدیگر جدا شدند. به منظور حذف اثر حاشیه، نمونه‌برداری‌ها از دو ردیف میانی در هر کرت انجام گرفت. بلافاصله بعد از جداسازی، سطح برگ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (DeltaT Ltd., UK) اندازه‌گیری شد. همزمان با این اندازه‌گیری‌ها، میزان تشعشع رسیده به بالای کانوپی و تشعشع عبور کرده از کانوپی و رسیده به سطح زمین در پایین کانوپی از طریق قرار دادن حسگر دستگاه سپتومتر خطی (AccuPAR-LP80, Decagon Devices, USA) روی سطح زمین در دو طرف ردیف‌ها و در چهار جهت مختلف در فاصله ساعات ۱۲ تا ۱۴ برای تمام کرت‌های آزمایشی اندازه‌گیری و ثبت شد. برگ‌ها و سایر اندام‌های هوایی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت

1- Day After Transplanting (DAT)

محدوده توسعه ریشه با استفاده از دستگاه انعکاس سنجی زمانی (TDR) در همه تیمارها صورت گرفت. اندازه‌گیری‌ها در سه نوبت شامل قبل از آبیاری، ۵ ساعت بعد از آبیاری و یک روز بعد از آبیاری انجام شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

واسنجی عبارت است از تخمین پارامترهای مدل به نحوی که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده (متغیرهایی شامل تولید زیست‌توده و عملکرد) و مقادیر محاسباتی آن که توسط مدل برآورد شده است به حداقل برسد. تمامی داده‌های ورودی مورد نیاز بر اساس داده‌های به دست آمده از فصل کشت اول (۱۳۹۵) وارد مدل شد. مرحله واسنجی با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به بهترین توافق بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده به طور دقیق انجام شد و مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی برآورد شد (۷).

صحت‌سنجی یکی از مهم‌ترین مراحل تأیید مدل‌های شبیه‌سازی می‌باشد. صحت‌سنجی مدل آکوواکراپ برای گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای بدست آمده از فصل زراعی دوم (۱۳۹۶) و بدون تغییر در پارامترهایی نهایی شده در مرحله واسنجی برای تمامی تیمارهای مورد بررسی انجام شد. خروجی‌های بدست آمده از این مرحله نیز با مقادیر اندازه‌گیری‌شده متناظر در آزمایش مزرعه‌ای مقایسه شد.

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل، اثبات کارایی مدل به منظور استفاده آتی می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت مدل آکوواکراپ در پیش‌بینی پوشش کانوبی، تولید زیست‌توده و عملکرد میوه گوجه‌فرنگی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (ME)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۴ تا ۹ نشان داده شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n \cdot \bar{O}_i}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه (۹)}$$

در روابط فوق P_i مقدار شبیه‌سازی‌شده، O_i مقدار اندازه‌گیری‌شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده

و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره ME نشان‌دهنده این است که مدل آکوواکراپ مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل مقدار پارامتر موردنظر را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است.

مقدار EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است. مقدار R^2 از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

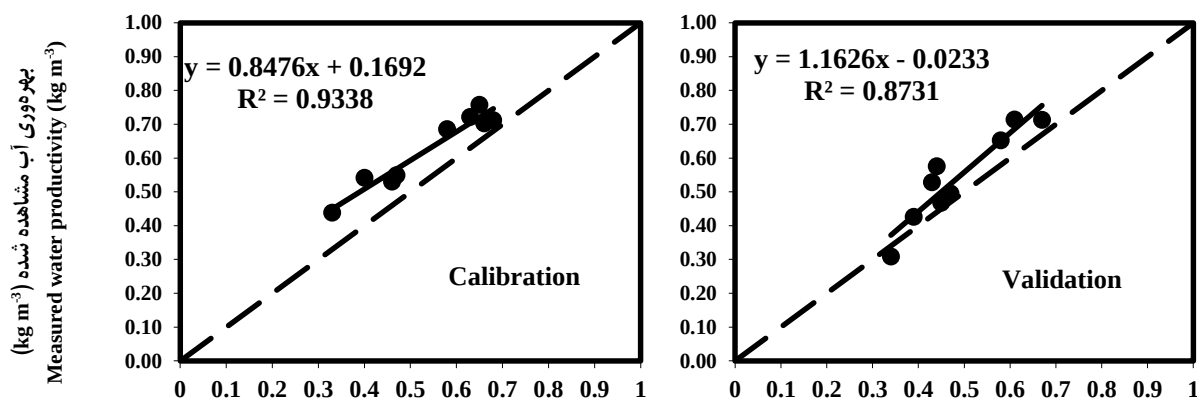
نتایج و بحث

شبیه‌سازی بهره‌وری آب

بهره‌وری آب اندازه‌گیری‌شده در مزرعه با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل مقایسه شد و نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۲ ارائه شده است. علاوه بر این نتایج بدست آمده از محاسبه شاخص‌های آماری به منظور ارزیابی کارایی مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل ۲ می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بهره‌وری آب شبیه‌سازی‌شده همستگی بسیار خوبی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در هر دو مرحله واسنجی ($R^2 = 0.93$) و صحت‌سنجی ($R^2 = 0.87$) داشت. بررسی مقادیر شاخص میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در مرحله واسنجی ($NRMSE = 14/81\%$) و صحت‌سنجی ($NRMSE = 13/64\%$) (جدول ۴) نشان داد که مدل آکوواکراپ قادر به شبیه‌سازی میزان بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی در سطح قابل قبولی بود.

بهره‌وری آب اندازه‌گیری‌شده در مزرعه دامنه‌ای از ۰/۴۴ تا ۰/۷۶ کیلوگرم در مترمکعب در سال ۱۳۹۵ و از ۰/۳۱ تا ۰/۷۱ کیلوگرم در متر مکعب در سال ۱۳۹۶ را به خود اختصاص داد. نتایج شبیه‌سازی در مطالعه حاضر نشان داد که بهره‌وری آب شبیه‌سازی‌شده با مدل آکوواکراپ در سال ۱۳۹۵ در محدوده‌ای از ۰/۳۳ تا ۰/۶۸ کیلوگرم در متر مکعب و از ۰/۳۴ تا ۰/۶۷ کیلوگرم در متر مکعب در سال ۱۳۹۶ قرار داشت.

اختلاف تقریباً بالایی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده شده در مرحله واسنجی (۶ تا ۲۶ درصد) و صحت سنجی (۶ تا ۲۳ درصد) مشاهده شد. این اختلافات در واقع بیانگر این است که آکوواکراپ مقادیر بهره‌وری آب را در سطح خوبی شبیه‌سازی نکرده است و در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی تمایل مدل به کم‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب مشهود بود. بالاترین مقادیر خطا در مرحله واسنجی مربوط به تیمارهایی است که در هر دو مرحله رویشی و زایشی بیشتر تحت تنش آب قرار گرفته بودند.



بهره‌وری آب شبیه‌سازی شده (kg m^{-3})
Simulated water productivity (kg m^{-3})

شکل ۲- مقایسه بهره‌وری آب (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر متر مکعب آب تبخیر و تعرق یافته) مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 2- Comparison between measured and simulated values of water productivity (kg m^{-3}) from all water treatments for calibration and validation

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر مترمکعب آب تبخیر و تعرق یافته) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی

Table 4- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting water productivity (kg m^{-3}) for calibration and validation

مرحله شبیه‌سازی Simulation	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices					
	RMSE	NRMSE(%)	d	R ²	RE	ME
واسنجی Calibration	0.09	14.81	0.85	0.93	-13.86	0.23
صحت‌سنجی Validation	0.07	13.64	0.90	0.87	-10.29	0.66

جدول ۵- مقایسه مقادیر بهره‌وری آب مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده (کیلوگرم عملکرد خشک میوه در هکتار بر متر مکعب آب تبخیر و تعرق یافته) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 5- Comparison between measured and simulated values of water productivity (kg m^{-3}) from all water treatments for calibration and validation

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت‌سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	RE (%)	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی شده Simulated	RE (%)
	Measured	Simulated	RE (%)	Measured	Simulated	RE (%)
100V-100R	0.70	0.66	-6.0	0.71	0.67	-5.6
100V-75R	0.72	0.63	-12.7	0.71	0.67	-6.0
100V-50R	0.71	0.68	-4.5	0.53	0.43	-18.6
75V-100R	0.53	0.46	-13.3	0.58	0.44	-23.6
75V-75R	0.69	0.58	-15.5	0.65	0.58	-11.1
75V-50R	0.76	0.65	-14.3	0.47	0.45	-3.9
50V-100R	0.55	0.47	-14.5	0.50	0.47	-5.1
50V-75R	0.54	0.40	-26.2	0.43	0.39	-8.5
50V-50R	0.44	0.33	-24.8	0.31	0.34	-10.0

بهبود بهره‌وری آب گیاه (کارایی مصرف آب گیاه) عاملی بسیار مهم در بهبود تولیدات کشاورزی تحت سناریوهای منابع آب محدود، افزایش تقاضای مواد غذایی و تغییر اقلیم به شمار می‌رود. تخمین کارایی مصرف آب از طریق آزمایش‌های میدانی همیشه امکان‌پذیر نیست چون که محاسبه دقیق آن مستلزم ارزیابی طیف گسترده‌ای از تلفیق مدیریت‌های مختلف مزرعه‌ای از جمله تاریخ و تراکم کاشت، مقدار و زمان اجرای آبیاری، کاربرد کود و سایر موارد متنوع دیگر می‌باشد. این در حالی است که به منظور پر کردن خلأ موجود، مدل‌های شبیه‌سازی دقیق می‌توانند سودمند باشند (۲۱). در اکثر مطالعات انجام شده با استفاده از مدل آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی (۳، ۴ و ۱۵) کارایی مدل برای شبیه‌سازی بهره‌وری آب مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

احمدی و همکاران (۱) گزارش کردند که خطای پیش‌بینی مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب ذرت از ۲/۳۵ تا ۲۷/۵ درصد برای سطوح مختلف آبی و کودی متغیر بود. با این حال، آنها مقدار میانگین مربعات خطا را ۰/۱۲ کیلوگرم در مترمکعب و شاخص EF را در محدوده ۰/۶۶ تا ۰/۷۴ بدست آوردند که نشان‌دهنده کارکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب بود. کاترجی و همکاران (۱۴) گزارش کردند که کارایی مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب گوجه‌فرنگی مطلوب نبود و مدل تمایل به بیش‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب در اکثر تیمارها داشت. آنها علت را خطا در شبیه‌سازی دقیق پوشش کانوپی و ضریب تعرق گیاهی و در نهایت تأثیر آن بر عملکرد گیاه بیان کردند. ایوت و تولک (۵) در تلاش برای کشف چگونگی کارکرد مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب چندین محصول زراعی شامل پنبه، ذرت، کینوا (*Chenopodium quinoa*) و آفتابگردان نتیجه گرفتند که مدل‌های شبیه‌سازی قادر به تخمین مطلوب کارایی مصرف آب تحت شرایط بدون تنش آب بودند اما در شرایط تنش آب کارکرد آنها کاهش یافت. این تمایل مدل، قابلیت اجرای آن برای شناسایی سناریوهای کم آبیاری یا دیم را محدود می‌کند.

شبیه‌سازی زیست‌توده بالای سطح خاک

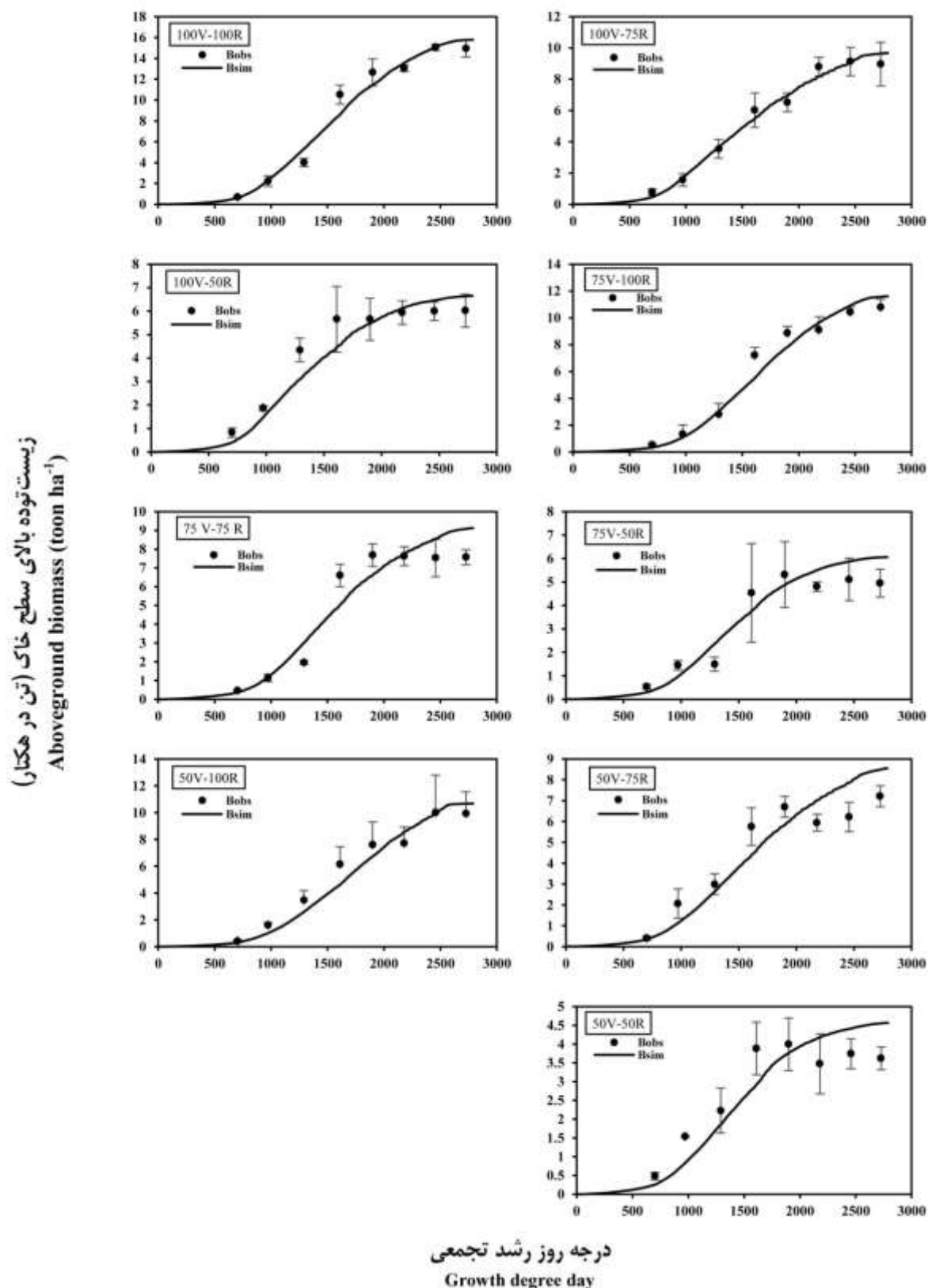
شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی را برای ۹ تیمار مختلف آبیاری نشان می‌دهد. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در پیش‌بینی زیست‌توده بالای سطح خاک در جدول ۶ آورده شده است. NRMSE پایین و R^2 بالا نشان‌دهنده شبیه‌سازی رضایت‌بخش توسعه زیست‌توده در مرحله واسنجی ($RMSE = 0.79 \text{ ton/ha}$) و

صحت‌سنجی ($RMSE = 0.76 \text{ ton/ha}$) می‌باشد. مقادیر RMSE در مرحله واسنجی بین ۰/۴۲ تا ۱/۰۷ تن در هکتار متغیر بود، در حالی که این مقادیر در مرحله صحت‌سنجی دامنه‌ای از ۰/۳۷ تا ۱/۰۷ تن در هکتار را شامل شد (جدول ۶). با توجه به نتایج بدست آمده در مرحله واسنجی، حداکثر NRMSE در تیمار 50V-50R با ۲۳ درصد و حداقل NRMSE در تیمار 100V-75R معادل ۷/۴ درصد بدست آمد. این در حالی است که در مرحله صحت‌سنجی حداکثر NRMSE در تیمار 75V-75R به میزان ۲۱/۳ درصد و حداقل NRMSE در تیمار 75V-100R معادل ۱۰/۶ درصد بدست آمد. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که اغلب عدم تطابق خوب بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در اواخر دوره رشد بود، بعلاوه تیمارهایی که با تنش آب مواجه هستند باعث افزایش خطا در شبیه‌سازی شده‌اند.

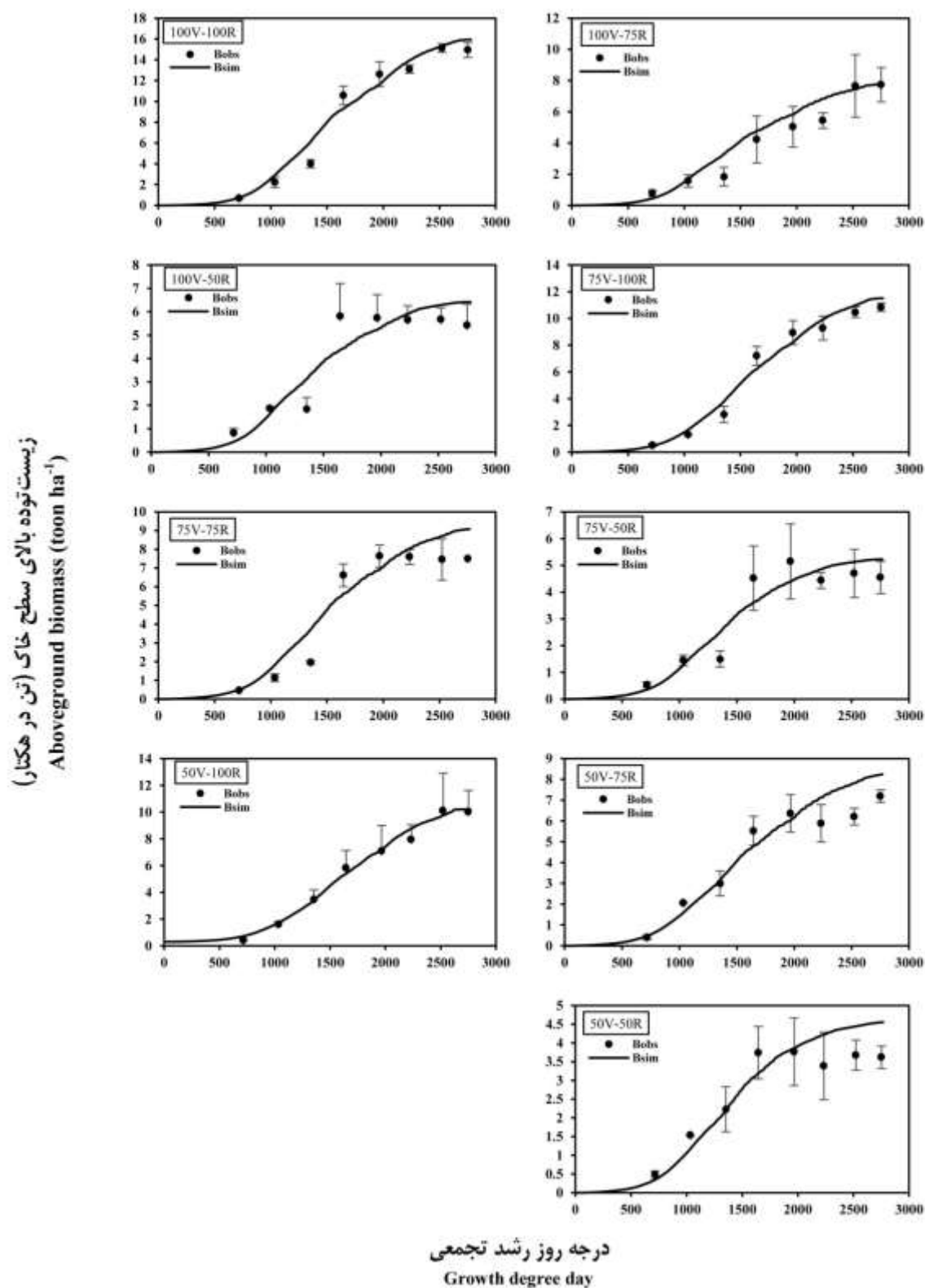
ساکماکیس و همکاران (۲۴) با اجرای مدل آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی گزارش کردند که شبیه‌سازی زیست‌توده تا قبل از ۱۴۰ روز بعد از کاشت به خوبی انجام شد اما پس از آن و در مرحله نهایی رشد گیاه مقادیر زیست‌توده اندازه‌گیری شده نسبت به شبیه‌سازی شده در هر دو سال آزمایش پایین‌تر بود. با توجه به مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص خطای نسبی (RE) (جدول ۶)، در مرحله واسنجی، مدل در بیشتر تیمارها تمایل به کم‌برآوردی ماده خشک دارد این در حالی است که در مرحله صحت‌سنجی، مدل همه مقادیر شبیه‌سازی شده ماده خشک در همه تیمارها را نسبت به مقادیر مشاهده شده بیشتر برآورد کرده است. RE در مرحله واسنجی محدوده‌ای بین ۵/۳۰ تا ۵/۳۰- و در مرحله صحت‌سنجی محدوده‌ای بین ۱/۳۵ تا ۱۱/۰۲ درصد را شامل می‌شود. کاترجی و همکاران (۱۴) گزارش کردند که آکوواکراپ تمایل به بیش‌برآورد زیست‌توده گوجه‌فرنگی در تیمارهای تنش آبی داشت. آنها همچنین بیان کردند که آکوواکراپ قادر به پیش‌بینی زیست‌توده گوجه‌فرنگی در شرایط تنش آبی با دقت قابل قبولی می‌باشد.

شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی

در شکل ۵ و ۶ به ترتیب، مقایسه مقادیر عملکرد خشک و تر مشاهده شده و پیش‌بینی شده گوجه‌فرنگی توسط مدل آکوواکراپ تحت رژیم‌های مختلف آبیاری طی مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل ارائه شده است. همچنین مقادیر عددی شاخص‌های آماری مربوط به ارزیابی مدل در پیش‌بینی عملکرد خشک و تر میوه در جدول ۷ آورده شده است.



شکل ۳- زیست توده بالای سطح خاک شبیه‌سازی شده (Bsim) و مشاهده شده (Bobs) در هر یک از تیمارها در مرحله واسنجی (۱۳۹۵)
Figure 3- Observed (Bobs) and simulated (Bsim) values of aboveground biomass under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016 year)



شکل ۴- زیست توده بالای سطح خاک شبیه سازی شده (Bsim) و مشاهده شده (Bobs) در هر یک از تیمارها در مرحله صحت سنجی (۱۳۹۶)
Figure 4- Observed (Bobs) and simulated (Bsim) values of aboveground biomass under different irrigation regimes during growing season for validation (2017 year)

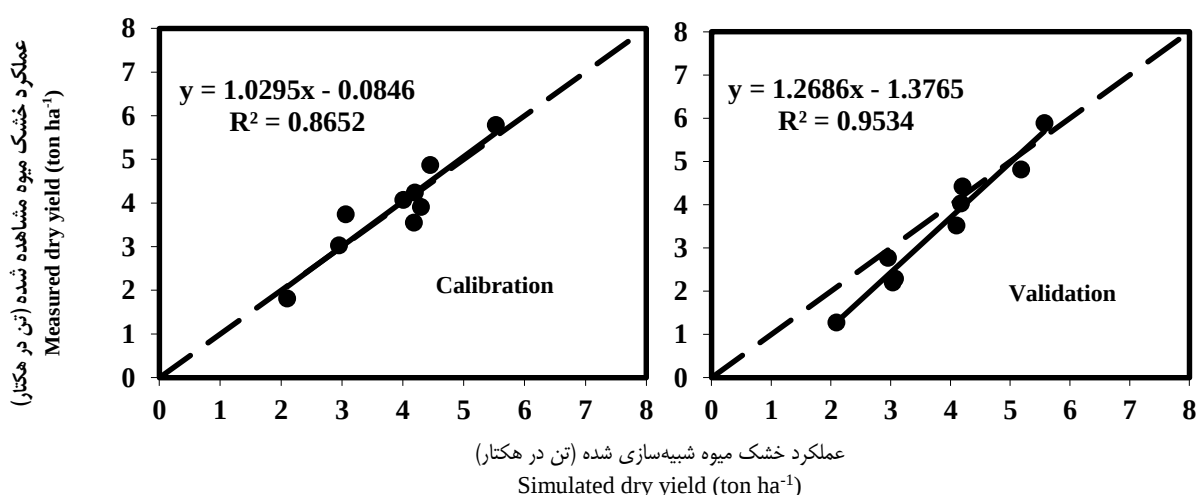
جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده بالای سطح خاک گوجه‌فرنگی (تن در هکتار) در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 6- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting above-ground biomass in different irrigation treatments

مرحله شبیه‌سازی Simulation	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices						
		RMSE	NRMSE(%)	EF	d	R ²	RE	ME
واسنجی Calibration	100V-100R	0.98	10.8	0.97	0.99	0.98	-0.66	0.97
	100V-75R	0.42	7.4	0.98	1	0.99	-.54	0.98
	100V-50R	0.70	15.5	0.87	0.97	0.96	-6.01	0.87
	75V-100R	0.81	12.7	0.96	0.99	0.98	-2.14	0.96
	75V-75R	1.00	19.7	0.89	0.97	0.95	2.44	0.89
	75V-50R	0.71	20.3	0.85	0.97	0.95	5.30	0.85
	50V-100R	0.83	14.1	0.94	0.99	0.98	-5.30	0.94
	50V-75R	1.07	22.9	0.79	0.96	0.94	1.09	0.80
	50V-50R	0.66	23	0.71	0.94	0.92	-0.78	0.71
میانگین Average		0.79	16.26	0.88	0.97	0.96	-0.73	0.88
صحت‌سنجی Validation	100V-100R	1.07	11.7	0.96	0.99	0.98	3.54	0.96
	100V-75R	0.78	18.6	0.90	0.98	0.97	11.02	0.90
	100V-50R	0.83	20.3	0.83	0.96	0.92	1.86	0.83
	75V-100R	0.68	10.6	0.97	0.99	0.99	2.75	0.97
	75V-75R	1.07	21.3	0.87	0.97	0.95	9.94	0.87
	75V-50R	0.64	19.2	0.86	0.96	0.93	1.98	0.86
	50V-100R	0.37	6.5	0.99	1	0.99	1.35	0.99
	50V-75R	0.87	19	0.85	0.97	0.96	7.01	0.85
	50V-50R	0.57	20.5	0.76	0.95	0.95	7.00	0.76
میانگین Average		0.76	16.41	0.89	0.97	0.96	5.16	0.89

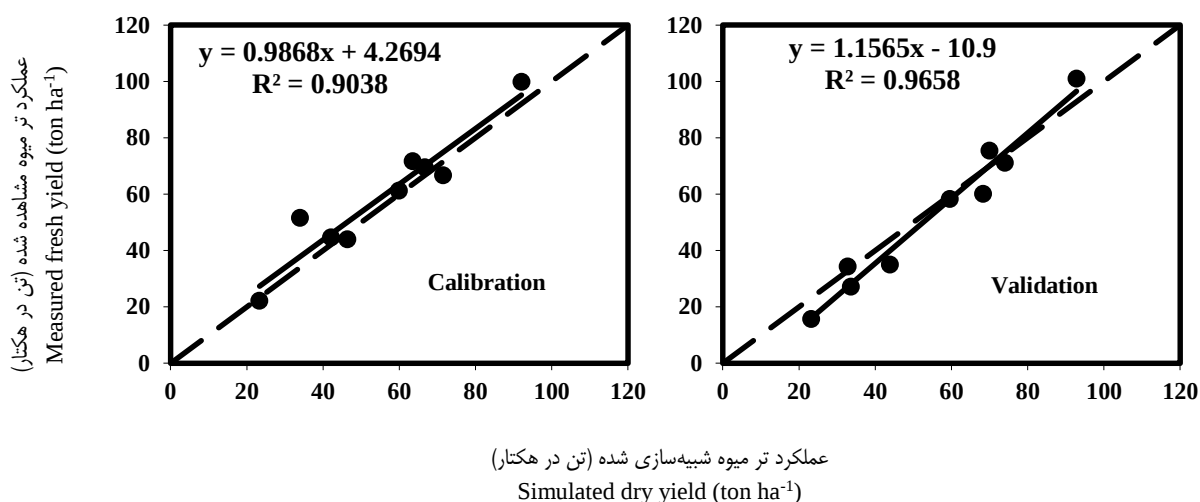
عملکرد خشک واسنجی و صحت‌سنجی شده به ترتیب ۹/۹۷ و ۱۵/۶۴ درصد بدست آمد. شکل ۵ رگرسیون خطی بین مقادیر نهایی عملکرد خشک شبیه‌سازی شده توسط مدل و اندازه‌گیری شده در مزرعه را نشان می‌دهد.

براساس نتایج جدول ۷ مدل آکواکراپ، عملکرد خشک میوه را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرد. مقدار NRMSE برای مرحله واسنجی کمتر از ۱۰ درصد بدست آمد که براساس این آماره، مدل‌سازی عملکرد، ایده‌آل است. مقادیر این آماره به ترتیب برای



شکل ۵- مقایسه عملکرد خشک میوه مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 5- Comparison between measured and simulated values of dry yield from all water treatments for calibration and validation



شکل ۶- مقایسه عملکرد تر میوه مشاهده شده و شبیه سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت سنجی
Figure 6- Comparison between measured and simulated values of fresh yield from all water treatments for calibration and validation

ME نزدیک به یک، نشان از کارایی بالای مدل در شبیه سازی عملکرد خشک در همه تیمارها دارد. شاخص توافق ویلموت (d) نیز نزدیک به یک است که نشان دهنده انطباق روند کاهش عملکرد خشک با مقدار آب آبیاری در مدل، با عملکرد خشک واقعی است و بیانگر توافق بهتر بین مقادیر واقعی و شبیه سازی شده است.

مقدار R^2 برای مرحله واسنجی و صحت سنجی به ترتیب معادل ۰/۹۵ و ۰/۸۶، نشان می دهد که مقادیر شبیه سازی شده عملکرد خشک محصول، توافق و همبستگی خوبی با مقادیر واقعی (اندازه گیری شده) دارد. بعلاوه شیب و عرض از مبدا خط رگرسیون بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی تفاوت معنی داری با خط ۱:۱ نداشت (شکل ۵). مقادیر

جدول ۷- مقادیر شاخص های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه سازی عملکرد خشک و تر میوه گوجه فرنگی (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت سنجی

Table 7- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting fresh and dry yield (ton per ha) for calibration and validation

مرحله شبیه سازی Simulation	عملکرد میوه Fruit yield	شاخص های ارزیابی مدل Model evaluation indices					
		RMSE	NRMSE(%)	d	R^2	RE	ME
واسنجی Calibration	عملکرد خشک Dry yield	0.39	9.97	0.96	0.86	0.75	0.86
	عملکرد تر Fresh yield	7.32	12.40	0.97	0.90	-5.99	0.87
صحت سنجی Validation	عملکرد خشک Dry yield	0.54	15.64	0.95	0.95	10.13	0.85
	عملکرد تر Fresh yield	6.27	11.80	0.98	0.96	4.2	0.94

75V-50R و 100V-50R معادل ۱۷/۷ و ۱۸/۲- درصد بود. همچنین در مرحله صحت سنجی عملکرد خشک میوه مقادیر RE_{min} و RE_{max} به ترتیب مربوط به تیمارهای آبیاری 50V-50R و 100V-100R بود که مقادیر خطا به ترتیب ۶/۴ و ۵/۴- درصد بدست آمد. RE مثبت

مقادیر شاخص خطای نسبی (RE %) به تفکیک برای هر تیمار در جداول ۸ و ۹ به ترتیب برای عملکرد خشک و تر میوه گوجه فرنگی آمده است. براساس جدول ۸ مقادیر RE_{min} و RE_{max} در مرحله واسنجی عملکرد خشک میوه به ترتیب مربوط به تیمارهای آبیاری

مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد تر میوه در هر دو مرحله واسنجی ($R^2 = 0/90$) و صحت سنجی ($R^2 = 0/96$) مشاهده شد. بنابراین مدل آکواکراپ موفق به شبیه‌سازی عملکرد تر میوه در هر دو مرحله واسنجی ($NRMSE = 12/40\%$) و صحت‌سنجی ($NRMSE = 11/80\%$) (جدول ۷) در سطح قابل اطمینانی شد. مقایسه مقادیر عملکرد تر مشاهده شده با شبیه‌سازی شده (جدول ۹) نشان داد که مدل در مرحله واسنجی برای اغلب تیمارها تمایل به بیش‌برآورد کردن و در مرحله صحت‌سنجی تمایل به کم‌برآورد کردن عملکرد تر میوه داشت.

نشان می‌دهد که مدل عملکرد را بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده، و مقادیر منفی RE نشان می‌دهد که مدل عملکرد را نسبت به مقادیر مشاهده‌شده کمتر برآورد کرده است.

به منظور تخمین عملکرد تر میوه از عملکرد خشک میوه شبیه‌سازی شده، از نتایج بدست آمده از میزان رطوبت میوه گوجه‌فرنگی در این مطالعه استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده، میزان رطوبت میوه تیمارهایی که ۷۵، ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی را در مرحله زایشی دریافت کرده بودند به ترتیب تقریباً برابر با ۹۴، ۹۳ و ۹۱ درصد بود. براساس نتایج شکل ۷، همبستگی بسیار خوبی بین

جدول ۸- مقایسه مقادیر عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده simulated	RE (%)	مشاهده‌شده measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)
100V-100R	5.79	5.52	-4.6	5.89	5.57	-5.4
100V-75R	4.87	4.45	-8.7	4.81	5.18	7.7
100V-50R	3.74	3.06	-18.2	2.77	2.95	6.5
75V-100R	4.07	4.00	-1.6	4.42	4.20	-5.0
75V-75R	4.24	4.19	-1.1	4.03	4.17	3.5
75V-50R	3.55	4.18	17.7	2.20	3.03	37.7
50V-100R	3.91	4.29	9.8	3.52	4.10	16.5
50V-75R	3.03	2.95	-2.7	2.29	3.07	34.1
50V-50R	1.81	2.10	16.0	1.27	2.09	64.6

آکواکراپ تحت رویکردهای مختلف آبیاری در طول دوره رشد به بررسی پیش‌بینی این مدل برای گوجه‌فرنگی با استفاده از مجموعه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های آبیاری طی دوره‌ای ۹ ساله در ایتالیا پرداختند. این محققین دقت مطلوب مدل در شبیه‌سازی عملکرد میوه گوجه‌فرنگی را گزارش کردند به گونه‌ای که با مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد میوه در مرحله واسنجی، $RMSE=0/705$ ، $d=0/983$ و $RE_{max}=-16/73$ بدست آمد، در حالی که در مرحله صحت‌سنجی مقادیر $RMSE$ ، d و RE_{max} به ترتیب ۱/۰۵۱۶، ۰/۹۲۸۹ و ۳۰/۶۱ بدست آمد. بنابراین آنها نتیجه‌گیری کردند که مدل در مرحله واسنجی تمایل به کم‌برآورد و در مرحله صحت سنجی تمایل به بیش‌برآورد داده‌های شبیه‌سازی شده نسبت به داده‌های مشاهده‌ای دارد. به طور کلی با توجه به نتایج بدست آمده، مدل آکواکراپ قادر به پیش‌بینی مطلوب عملکرد میوه خشک و تر گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود.

عدم دقت در شبیه‌سازی عملکرد میوه توسط مدل آکواکراپ تحت شرایط تنش شدید آبی به گونه‌ای است که به نظر می‌رسد الگوریتم یا طرز عمل مدل برای شبیه‌سازی همزمان شدت، زمان و مدت تنش آبی بویژه در طول مرحله پیری دقت کافی را نداشته باشد (۱۰). علاوه بر این عدم دقت در شبیه‌سازی کل محتوای آب خاک و تخصیص دقیق آب به تبخیر و تعرق گیاه ممکن است وجود آریبی در شبیه‌سازی عملکرد را توضیح دهد (۲۱). با این حال کاترجی و همکاران (۱۴) پیش‌بینی ضعیف مدل در شبیه‌سازی عملکرد گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش آبی را به شبیه‌سازی نامناسب پوشش کانوپی (CC) نسبت دادند، و پیشنهاد کردند که ضرایب مربوط به رشد پوشش کانوپی به کار رفته در واسنجی مدل دوباره ارزیابی شوند. آنها همچنین بیان داشتند که حتی اگر پارامترهای رشد گیاه براساس داده‌های مشاهده‌شده مزرعه‌ای تنظیم شده باشند، اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده برای محتوای آب خاک و همچنین تبخیر و تعرق گیاه ممکن است بر تخمین عملکرد تحت شرایط تنش آب تأثیرگذار باشد.

باتیلانی و همکاران (۳) با هدف تجزیه و تحلیل قابلیت

جدول ۹- مقایسه مقادیر عملکرد تر میوه گوجه‌فرنگی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده (تن در هکتار) در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 9- Comparison between measured and simulated values of fresh yield (ton ha⁻¹) from all water treatments for calibration and validation

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration			صحت‌سنجی Validation		
	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)	مشاهده‌شده Measured	شبیه‌سازی‌شده Simulated	RE (%)
100V-100R	99.81	92.05	-7.8	101.01	92.83	-8.1
100V-75R	71.69	63.53	-11.4	71.13	74.00	4.0
100V-50R	51.58	33.99	-34.1	34.28	32.78	-4.4
75V-100R	9.49	66.73	-4.0	75.50	70.00	-7.3
75V-75R	61.24	59.91	-2.2	58.24	59.57	2.3
75V-50R	44.02	46.43	5.5	27.19	67.30	23.8
50V-100R	66.73	71.55	7.2	60.13	68.33	13.7
50V-75R	44.68	42.11	-5.7	35.03	43.86	25.2
50V-50R	22.22	23.32	5.0	15.66	23.22	48.3

نتیجه‌گیری

مدل آکوواکراپ (نسخه ۶/۱) به منظور شبیه‌سازی بهره‌وری آب، زیست‌توده بالایی سطح خاک و عملکرد میوه خشک و تر گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد واسنجی و صحت‌سنجی شد. در مرحله واسنجی مقادیر پارامترهای گیاهی با دقت بالا استخراج شد. علی‌رغم عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی بهره‌وری آب در تیمارهای مختلف، نتایج نشان داد که آکوواکراپ مقادیر بهره‌وری آب را در سطح خوبی شبیه‌سازی نکرده است و در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی تمایل مدل به کم‌برآورد مقادیر بهره‌وری آب مشهود بود. بالاترین مقادیر خطا در مرحله واسنجی مربوط به تیمارهایی است که در هر دو مرحله رویشی و زایشی بیشتر تحت تنش آب قرار گرفته بودند. با این حال توافق خوبی بین مقادیر زیست‌توده بالایی سطح خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود داشت. این درحالی بود که تیمارهایی که با تنش آب شدید مواجه بودند، باعث افزایش خطا در شبیه‌سازی شدند. به طور کلی نتایج صحت‌سنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه زیست‌توده بالایی سطح خاک در

منابع

- 1- Ahmadi S. H., Mosallaeepour E., Kamgar-Haghighi A.A., and Sepaskhah A.R. 2015. Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. Water Resources Management 29: 2837-2853.
- 2- Araya A., Keesstra S.D., and Stroosnijder L. 2010b. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. Field Crops Research 116: 196-204.
- 3- Battilani A., Letterio T., and Chiari G. 2015. Aquacrop model calibration and validation for processing tomato crop in a sub-humid climate. pp. 167-174. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.
- 4- Doorenbos J., and Kassam A. 1979. Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33, 257.
- 5- Evett S.R., and Tolk J.A. 2009. Introduction: Can Water Use Efficiency Be Modeled Well Enough to Impact Crop Management? Agronomy Journal 101: 423-425.

همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا (>0.92)، EF قابل قبول (>0.76)، خطای پایین (RMSE)، دامنه‌ای بین 0.37 تا 1.07 و مقادیر d بالا (>0.95) نشان داد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در دامنه $6/5$ تا $21/3$ درصد برای پیش‌بینی زیست‌توده بالایی سطح خاک در محدوده قابل قبول بود.

به طور کلی شاخص‌های آماری ME ، RE ، R^2 ، d ، $NRMSE$ برای عملکرد خشک میوه گوجه‌فرنگی $9/97$ ، $0/96$ ، $0/86$ ، $0/75$ و $0/86$ درصد و $15/64$ ، $0/95$ ، $0/95$ ، $10/13$ و $0/85$ درصد برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بدست آمد که دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی عملکرد خشک میوه را نشان می‌دهد.

بنابراین علی‌رغم کاهش کارایی مدل در شبیه‌سازی تیمارهای تحت شرایط تنش آبی شدید، نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکوواکراپ با سطح اطمینان قابل قبولی می‌تواند رشد و نمو گوجه‌فرنگی را در شرایط تنش آبی شبیه‌سازی کند. از اینرو از مدل آکوواکراپ به عنوان یک ابزار مدیریتی کارآمد می‌توان در انتخاب بهینه‌ترین سناریو آبیاری در کشت گوجه‌فرنگی استفاده کرد.

- 6- FAO. 2019. Downloads for AquaCrop (Version 6.1) Standard Window Program and Plug-in Program. <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- 7- Farrokhi E., Nassiri Mahallati M., Koocheki A., and Beheshti S.A. 2021. Simulation of growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Under drought stress: 1- simulation of soil water content, evapotranspiration and green canopy cover. Journal of Water and Soil 35(3): 299-318. (In Persian with English abstract)
- 8- Foster T., Brozović N., Butler A.P., Neale C.M.U., Raes D., Steduto P., Fereres E., and Hsiao T.C. 2017. AquaCrop-OS: An open source version of FAO's crop water productivity model. Agricultural Water Management 181: 18-22.
- 9- Greaves E.G., and Wang Y.-M. 2016. Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. Water 8.
- 10- Heng L.K., Hsiao T., Evett S., Howell T., and Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agronomy Journal 101: 488-498.
- 11- Heuvelink E. 2018. Tomatoes, 2nd edition. Boston, MA: CABI.
- 12- Hsiao T.C., Heng L., Steduto P., Rojas-Lara B., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize. Agronomy Journal 101: 448-459.
- 13- Ismail S., El-Abedin T.Z., El-Ansary D., and Abdel-Al A. 2015. Modification of FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water for Peach Trees. Misr Journal Agriculture Engineering 32: 145-172.
- 14- Katerji N., Campi P., and Mastrorilli M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agricultural Water Management 130: 14-26.
- 15- Linker R., Ioslovich I., Sylaios G., Plauborg F., and Battilani A. 2016. Optimal model-based deficit irrigation scheduling using AquaCrop: A simulation study with cotton, potato and tomato. Agricultural Water Management 163: 236-243.
- 16- Ngouajio M., Wang G., and Goldy R. 2007. Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch. Agricultural Water Management 87: 285-291.
- 17- Patanè C., and Cosentino S.L. 2010. Effects of soil water deficit on yield and quality of processing tomato under a Mediterranean climate. Agricultural Water Management 97: 131-138.
- 18- Patanè C., Tringali S., and Sortino O. 2011. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions. Scientia Horticulturae 129: 590-596.
- 19- Pawar G.S., Kale M.U., and Lokhande J.N. 2017. Response of aquacrop model to different irrigation schedules for irrigated cabbage. Agricultural Research 6: 73-81.
- 20- Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. Agronomy Journal 101: 438-447.
- 21- Sandhu R., and Irmak S. 2019. Performance of AquaCrop model in simulating maize growth, yield, and evapotranspiration under rainfed, limited and full irrigation. Agricultural Water Management 223: 105687.
- 22- Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal 101: 426-437.
- 23- Stricevic R., Cosic M., Djurovic N., Pejic B., and Maksimovic L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. Agricultural Water Management 98: 1615-1621.
- 24- Tsakmakis I.D., Kokkos N.P., Gikas G.D., Pinaras V., Hatzigiannakis E., Arampatzis G., and Sylaios G.K. 2019. Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. Agricultural Water Management 213: 419-432.
- 25- Vanuytrecht E., Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Heng L.K., Garcia Vila M., and Mejias Moreno P. 2014. AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. Environmental Modelling & Software 62: 351-360.
- 26- Wang F., Kang S., Du T., Li F., and Qiu R. 2011. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments. Agricultural Water Management 98: 1228-1238.
- 27- WRG (2030 Water Resources Group). 2009. Charting Our Water Future. The Barilla Group, The Coca-Cola Company, The International Finance Corporation, McKinsey & Company, Nestle S.A. Available from: <http://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2014/07/Charting-Our-Water-Future-Final.pdf>
- 28- WWAP (World Water Assessment Programme), 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, France. UNESCO. Available from: <https://www.zaragoza.es/contenidos/medio ambiente/onu//newsletter12/789-eng-sum-ed4.pdf>



Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: 2- Simulation of Water Productivity, Above Ground Biomass and Yield

E. Farrokhi¹- M. Nassiri Mahallati^{2*}- A. Koocheki³- S.A. Beheshti⁴

Received: 27-09-2020

Accepted: 08-08-2021

Introduction: Predicting yield is increasingly important to optimize irrigation under limited available water to enhance sustainable production. Calibrated crop simulation models therefore increasingly are being used as an alternative means for rapid assessment of water-limited crop yield over a wide range of environmental and management conditions. AquaCrop is a multi-crop model that simulates the water-limited yield of herbaceous crop types under different biophysical and management conditions. It requires a relatively small number of explicit and mostly-intuitive parameters to be defined compared to other crop models, and has been validated and applied successfully for multiple crop types across a wide range of environmental and agronomic setting. This study was conducted as a two-year field experiment with the aim of the simulation of water productivity, above ground biomass and fresh and dry yield of tomato using AquaCrop model under different irrigation regimes applied at two growth stages in Mashhad climate conditions.

Materials and Methods: A two-year field experiment was conducted during 2016-2017 growing seasons in the experimental field of Ferdowsi University of Mashhad located in Khorasan Razavi province, North East of Iran. The water-driven AquaCrop model developed by FAO was calibrated and validated to simulate water productivity, above-ground biomass and yield of tomato crop under varying irrigation regimes. AquaCrop was calibrated and validated for tomato under full (100% of water requirements) and deficit (75 and 50% of water requirements) irrigation regimes at vegetative (100V, 75V, and 50V) and reproductive stages (100R, 75R, and 50R). Model performance was evaluated in terms of the normalized root mean squared error (NRSME), the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (EF), Willmott's index of agreement (d) and coefficient of determination (R^2). The drip irrigation method was used for irrigation. The tomato water requirement was calculated using CROPWAT 8.0 software. The irrigation water was supplied based on total gross irrigation and obtained irrigation schedule of CROPWAT. The 2016 and 2017 measured data sets were used for calibration and validation of AquaCrop model, respectively.

Results and Discussion: Calibration results showed good agreement between simulated and observed data for water productivity in all treatments with high R^2 value (0.93), good ME (0.23), low estimation errors (RMSE=0.09 kgm³) and high d value (0.85). The goodness of fit results showed that measured WP values were closer to simulated WP values for the validation season (2017) than for the calibration season (2016). During calibration, (2016), the model simulated the biomass with good accuracy. The simulated above ground biomass values were close to the observed values during calibration (2016) for all treatments with R^2 ranging from 0.92 to 0.99, NRMSE in range of 7.4 to 23%, d varying from 0.94 to 1, and ME ranging from 0.71 to 0.98. Validation results indicated good performance of model in simulating above ground biomass for most of the treatments ($0.92 < R^2 < 0.98$, $6.5\% < \text{NRMSE} < 21.3\%$, $0.76 < \text{ME} < 0.99$). During validation (2017 growing season), overall, the trend of biomass growth (or accumulation) was captured well by model. However, the range of biomass of simulation errors was high, especially in treatments with higher stress. Accurate simulation of the response of yield to water is important for agricultural production, especially in an arid region where agriculture depends closely heavily on irrigation. During validation, the model predicted dry and fresh yield satisfactorily (NRMSE = 15.64% and 11.80% for dry and fresh yield, respectively).

Conclusion: In general, the AquaCrop model was able to simulate the observed water productivity, above ground biomass and yield of tomato satisfactorily in both calibration and validation stage. However, the model performance was more accurate in non- and/or moderate stress conditions than in severe water-stress environments. In conclusion, the AquaCrop model could be calibrated to simulate growth and yield of tomato

1, 2 and 3- Ph.D. Candidate and Professors of Agrotechnology Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, respectively.

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

3- Associate Professor, Agriculture and Natural Resources Research Center Khorasan Razavi, Iran

DOI: 10.22067/JSW.2021.15035.0

under temperate condition, reasonably well, and become a very useful tool to support decision on when and how much irrigate. This study provides the first estimate of the soil and plant parameter values of AquaCrop for simulation of tomato growth in Iran. Model parameterization is site specific, and thus the applicability of key calibrated parameters must be tested under different climate, soil, variety, irrigation methods, and field management.

Keywords: AquaCrop model, Deficit irrigation, Modelling, Vegetative and reproductive stages, Water productivity



مقاله پژوهشی

بررسی منشأ و عوامل مؤثر بر تغییرات غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$ آن در منابع آب منطقه سرپل ذهاب

حسین محمدزاده^{۱*} - مهدی بنیابادی^۲ - فائزه جنگجو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

چکیده

غلظت زیاد سولفات یکی از آلوده‌کننده‌های آب‌های زیرزمینی در بسیاری از مناطق جهان بشمار می‌رود و از منابع مختلفی (لیتولوژی، اتمسفر، صنعتی و...) وارد آب‌های زیرزمینی می‌گردد. با استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپی و هیدروژئوشیمی می‌توان ضمن تشخیص منشأ، به فرآیندها و واکنش‌های مؤثر بر غلظت سولفات و تولید گاز سولفید هیدروژن پی برد. در این مقاله، برای اولین بار به مطالعه منشأ سولفات و عوامل مؤثر بر تغییرات غلظت آن و مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$ در آب‌های زیرزمینی منطقه سرپل ذهاب پرداخته شد. تعداد ۱۳ نمونه آب از منابع آبی منطقه در دی ۹۳ و مهر ۹۴ برداشت گردید و در آزمایشگاه هیدروژئوشیمی و ایزوتوپی دانشگاه واترلو آنالیز گردید. غلظت سولفات در منابع آبی منطقه بین ۵ تا ۹۵۰ میلی‌گرم بر لیتر (در فصل تر و خشک به ترتیب دارای میانگین ۱۱۰/۱ و ۱۰۶/۹ میلی‌گرم بر لیتر) متغیر بوده، اما در نمونه‌های آب چشمه گنداب به دلیل ارتباط با مواد هیدروکربنی و تونل پاتاق به دلیل خروج آب از سازند گچساران زیاد بود (به ترتیب ۳۳۹/۶ و ۹۵۰/۱ میلی‌گرم بر لیتر). مقادیر $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ سولفات به ترتیب بین VSMOW ۹/۵ تا ۳۱/۸ ‰ و ۵/۸ تا ۱۳/۱ ‰ متغیر به دست آمد. در چشمه گنداب، به دلیل احیای سولفات توسط میکروارگانیسم‌ها، علاوه بر استنشام بوی نامطبوع H_2S ، مقادیر ایزوتوپ‌های $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ غنی‌تر از سایر منابع آبی (به ترتیب حدود ۳۱/۸ ‰ و ۱۰/۳ ‰) بوده و نمونه آب چشمه گلودره تحت تأثیر فاضلاب حمام و مواد شوینده ($\delta^{34}\text{S} \approx 10\text{‰}$) بالادست چشمه سبب تهی‌شدگی ایزوتوپی و آلودگی آن شده است. نتایج نشان می‌دهد که عوامل زمین‌شناسی، اتمسفری، انسانی و مواد هیدروکربنی بر غلظت و ایزوتوپ‌های سولفات در منابع آبی منطقه مؤثر است به طوری که عوامل انسانی و هیدروکربنی به صورت محلی و لیتولوژی در تمامی منابع آبی منطقه در غلظت و ایزوتوپ‌های سولفات تأثیرگذار بوده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، تکنیک‌های ایزوتوپی، سرپل ذهاب، سولفات

مقدمه

اسیدی شدن (۲۳)، کمک به سختی آب و پذیرنده مهم الکترون در فرآیند احیا است (۲). برای تعیین منابع مختلف سولفات در هیدروسفر استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپ پایدار بسیار مفید است (۱۳، ۲۴، ۱۱، ۱۵، ۲۵ و ۵). این رویکرد به خصوص زمانی موفق است که هر دو ایزوتوپ گوگرد و اکسیژن در سولفات مورد بررسی قرار گیرد. ایزوتوپ پایدار گوگرد به طور عمده برای تعیین منابع گوگرد استفاده می‌شود، در حالی که ایزوتوپ‌های اکسیژن سولفات می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد منابع سولفات و در مورد شرایط ژئوشیمیایی که در آن سولفات پیدا شده است فراهم می‌کند (۲۲). علاوه بر این، فرآیندهای تحول گوگرد را می‌توان با تجزیه و تحلیل مقادیر ایزوتوپی $\delta^{34}\text{S}$ و $\delta^{18}\text{O}$ مربوط به سولفات و دیگر گونه‌های ایزوتوپ گوگرد شناسایی کرد، به خصوص اگر روند مشاهده در مقادیر ایزوتوپی با پارامترهای هیدرولوژیکی و شیمیایی تفسیر گردد (۱). مطالعات متعددی در ارتباط با تعیین منشأ سولفات در آب‌های سطحی و زیرزمینی (۵)؛ احیای

منشأ و سرنوشت سولفات در نزولات جوی و منابع آب‌های زیرزمینی بسیار مهم و در مورد اثرات نهشته‌های سولفات جوی در اکوسیستم‌های خشکی زی و آبی تحقیقات زیادی صورت گرفته است (۱۶). سولفات یون اصلی تشکیل‌دهنده بسیاری از آب‌های سطحی و زیرزمینی است. شناسایی منابع و تاریخ زیستی سولفات محلول در منابع آب مهم است (۲۶ و ۲۷)، چراکه سولفات باعث

۱، ۳ و ۴- به ترتیب استاد و دانشجویان سابق کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- مدیر گروه پژوهشی تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب)، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mohammadzadeh@um.ac.ir)

کرده‌اند. سازند گچساران دارای مواد تبخیری است و سبب کاهش کیفیت در آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. سازند ایلام در تأمین مواد آلی مورد نیاز برای فرآیند احیای باکتریایی سولفات مؤثر است (شکل ۱).

روش کار

برای اندازه‌گیری غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپی آن، ۱۳ نمونه آب از منابع آبی چاه، چشمه و رودخانه برداشت شد (جدول ۱). در این پژوهش نمونه‌برداری در دو مرحله انجام گرفت. ابتدا پارامترهای صحرایی و نمونه‌برداری باهدف تعیین آنیون و کاتیون و در مرحله بعد نمونه‌برداری با هدف تعیین مقادیر ایزوتوپ‌های سولفات انجام شد. روش اندازه‌گیری پارامترهای صحرایی و نمونه‌برداری از منابع آبی مطابق دستورالعمل مرکز تحقیقات آب‌های زیرزمینی و ژئوترمال (متاب) دانشگاه فردوسی مشهد (۲۰) صورت گرفته است. پارامترهای صحرایی (T, pH, Eh, EC و TDS) توسط دستگاه VWR Handheld Multi parameter Research meter در محل هر کدام از منابع آبی اندازه‌گیری شد. برای تعیین آنیون و کاتیون از ظروف ۳۰ میلی‌لیتری از جنس پلی‌اتیلن استفاده شد. حجم و روش نمونه‌برداری ایزوتوپی سولفات با تفاوت در مقدار غلظت سولفات تغییر می‌کند. حجم نمونه‌برداری ایزوتوپی سولفات را با داشتن مقدار غلظت سولفات و استفاده از رابطه زیر می‌توان تعیین نمود.

$$V = \frac{M}{C} \quad \text{رابطه (۱)}$$

حداقل حجم مورد نیاز برای نمونه‌برداری در جدول ۱ ارائه شده است. به دلیل حضور سولفید و اکسید شدن آن در حضور اکسیژن به سولفات نمونه‌برداری بایستی در مظهر منابع آبی و در زیر سطح آب صورت گیرد. که در این رابطه V برابر با حداقل حجم نمونه، C برابر با غلظت سولفات در نمونه آب و M حداقل مقدار پودر BaSO_4 مورد نیاز برای آنالیز که مقداری ثابت و برابر با ۱۰ میلی‌گرم می‌باشد. نمونه‌های آب برای تعیین آنیون و کاتیون به آزمایشگاه هیدروژئوشیمی اتاوی کانادا ارسال گردید. تعیین غلظت کاتیون‌ها با استفاده از دستگاه ICP-EA^۲ و آنالیز آنیون‌ها به وسیله دستگاه یون کروماتوگراف^۳ انجام شد. نمونه‌های آب برای اندازه‌گیری مقادیر ایزوتوپ‌های سولفات به آزمایشگاه واترلوی کانادا ارسال گردید و در این آزمایشگاه مقادیر ایزوتوپ‌های سولفات توسط دستگاه طیف‌سنج جرمی نسبت ایزوتوپی - جریان پیوسته^۴، مدل دلتا پلاس، ساخت آلمان و با استفاده از رابطه ۲ تعیین شد.

باکتریایی سولفات (۱۰، ۷، ۶ و ۱۵)؛ سولفات از دیدگاه آلوده‌کنندگی آبخوان (۱۷) و دیگر موضوعات مرتبط صورت گرفته است. احیای سولفات مانند دنیتروبیفیکاسیون همراه با غنی‌شدگی ^{34}S و ^{18}O در باقیمانده سولفات آب زیرزمینی است. باکتری‌ها ترجیحاً SO_4 را به H_2S کاهش می‌دهند و SO_4 غنی‌شده با ^{34}S و ^{18}O را در مخزن سولفات بر جا می‌گذارند. غنی‌شدگی قوی در ایزوتوپ ^{34}S و ^{18}O سولفات نشانه واضحی است که باکتری‌های احیاکننده سولفات (SRBs) در کار هستند (۸). سولفات از منابع مختلف می‌تواند در آب‌های زیرزمینی حضور داشته باشد، که منبع عمده و اصلی آن عامل زمین‌شناسی (انحلال تبخیری‌ها مثل گچ و انیدریت و اکسایش مواد سولفیدی نظیر پیریت)، بوده و پس از آن عوامل اتمسفریک (اسپری آب دریا) و انسان ساخت نیز می‌توانند به عنوان منبع سولفات در آب‌های زیرزمینی مطرح شوند (۱۶، ۱ و ۸). ترکیب ایزوتوپ‌های سولفات از منابع مختلف، متفاوت است (۸) و همین مشخصه می‌تواند در شناسایی منبع سولفات در آب‌های زیرزمینی مفید واقع گردد. عوامل متعددی بر روی ترکیب ایزوتوپ‌های سولفات تأثیرگذار است از جمله می‌توان به اختلاط آب‌ها (ورود زهاب کشاورزی و فاضلاب‌های انسانی و...)، واکنش‌های شیمیایی و باکتری‌های احیاکننده سولفات و... اشاره کرد. هدف از این مقاله استفاده از تکنیک‌های ایزوتوپی و هیدروژئوشیمی، برای تعیین منشأ سولفات در آب‌های زیرزمینی در ایران (به‌خصوص در دشت ذهاب استان کرمانشاه) می‌باشد که برای اولین بار در ایران به کار گرفته می‌شود. همچنین با این تکنیک‌ها می‌توان به بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات سولفات مثل احیای باکتریایی سولفات پی برد.

مواد و روش‌ها

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

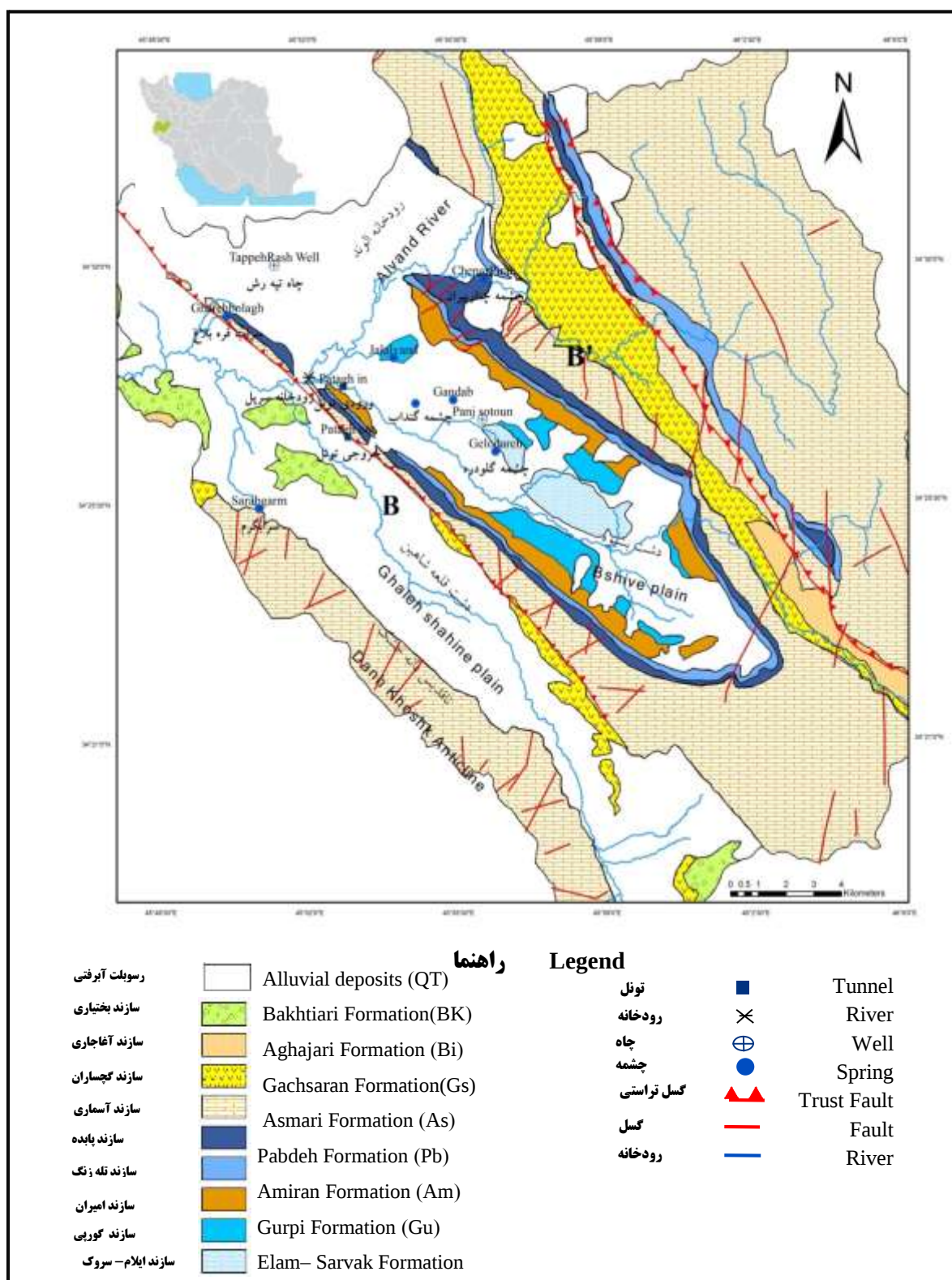
محدوده مطالعاتی پل ذهاب با کد ۲۱۱۷ در حوضه آبریز رودخانه الوند در غرب استان کرمانشاه قرار دارد. از لحاظ موقعیت جغرافیایی این محدوده در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۹ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی می‌باشد. مساحت کل محدوده ۶۲۰/۳ کیلومتر مربع بوده که از این مقدار ۱۲۰/۵ کیلومتر مربع را دشت‌ها و ۴۹۹/۸ کیلومتر مربع را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. سازندهای منطقه بر اساس سن از قدیم به جدید شامل سازندهای ایلام، گورپی، امیران، تله‌زنگ، پابده، آسماری، گچساران، آغاچاری، بختیاری و آبرفت‌های کواترنری می‌باشد. سازند آهکی آسماری و رسوبات آبرفتی کواترنری بیشترین مساحت از منطقه را اشغال

2- Inductively coupled plasma atomic emission (ICP-AE)

3- Ion chromatography

4- Continuous flow- isotope ratio mass spectrometer (CF-IRMS)

1- Sea spray



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی، زمین شناسی منطقه سرپل ذهاب و مکان های نمونه بردای
Figure 1- Geographic position, geological map of Sarpolzhab region and sampling points

جدول ۱- مقادیر پارامترهای صحرایی و غلظت و ایزوتوپ‌های ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$) سولفات در نمونه‌های آب مهر ۱۳۹۴ و دی ماه ۱۳۹۳ (*)

SI و V به ترتیب نشان دهنده شاخص اشباع کلسیت و حجم آب مورد نیاز (میلی لیتر) می‌باشد.

Table 1- Values of field parameters and concentrations and isotopes ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of sulfate in water samples (Jun. 2015 and in December 2014 *)

SIc and V indicate the calcite saturation index and the required volume of water (ml), respectively.

مکان نمونه‌برداری Sampling location	پارامترهای صحرایی Filed parameters				کاتیون‌ها و آنیون‌ها (میلی گرم بر لیتر) Cations and anions (mg L ⁻¹)				مقادیر ایزوتوپ‌های سولفات Sulfate isotopes values		V (ml)	SIc
	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (mg/l)	pH	Eh (mv)	Ca ²⁺	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	$\delta^{34}\text{S}$ (‰ VCDT)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW)		
سراب قره‌بلاغ Gharehbolag	528	259	6.7	30.7	81.6	5.2	33.2	6.5	14.3	10.2	300	-0.2
سرابگرم Sarabgarm	449	220	7.2	16.1	58.3	3.0	17.9	3.4	15.5	10.2	558	-0.3
چشمه جلالوند Jalalvand	641	314	7.2	17.2	96.7	10.4	38.5	16.5	16.2	7.4	259	0.0
چشمه پیرغیب Pyrgheib	702	344	7.2	-12.0	109.5	20.0	72.8	20.3	14.0	5.8	137	0.2
چشمه گنداب Gandab	1546	758	6.9	-441.0	163.5	64.5	339.6	87.3	31.8	10.3	29	0.1
چشمه چنارپیران* Chenarpiran*	335	164	7.3	219.0	58.0	1.4	13.1	2.7	12.1	9.8	763	-0.4
چشمه گلورده* *Gel va darre	459	225	7.2	897.0	72.9	4.2	21.7	7.4	9.5	8.5	460	-0.1
ورودی تونل* *Tunnel inlet	246	123	9.4	449.0	29.8	3.9	30.4	4.8	16.7	10.5	328	-0.9
خروجی تونل* *Tunnel outle	1884	924	7.7	409.0	286.0	50.6	950.1	41.4	21.6	13.1	10	0.0
چاه تپه‌رش* Tapehrash *	525	257	6.3	361.0	33.6	9.1	49.1	13.5	15.3	8.7	203	-0.9
رود الوند (سرپل ذهاب) Sarpol River	524	275	7.5	31.8	78.0	4.9	39.9	5.9	14.8	10.0	250	-0.2
تونل ازکله Ezgeleh Tunnel	2316	1133	7.8	na	362.1	72.2	124.6	92.3	na	na	80	na
چاه پنج ستون Panj sotoun	711	348	7.2	-314.0	79.9	33.2	44.1	30.6	na	na	226	-0.1

(میانگین استاندارد آب اقیانوس وینا) بوده و دقت اندازه‌گیری برای ایزوتوپ‌های گوگرد و اکسیژن ۰/۳ پرمیل می‌باشد.

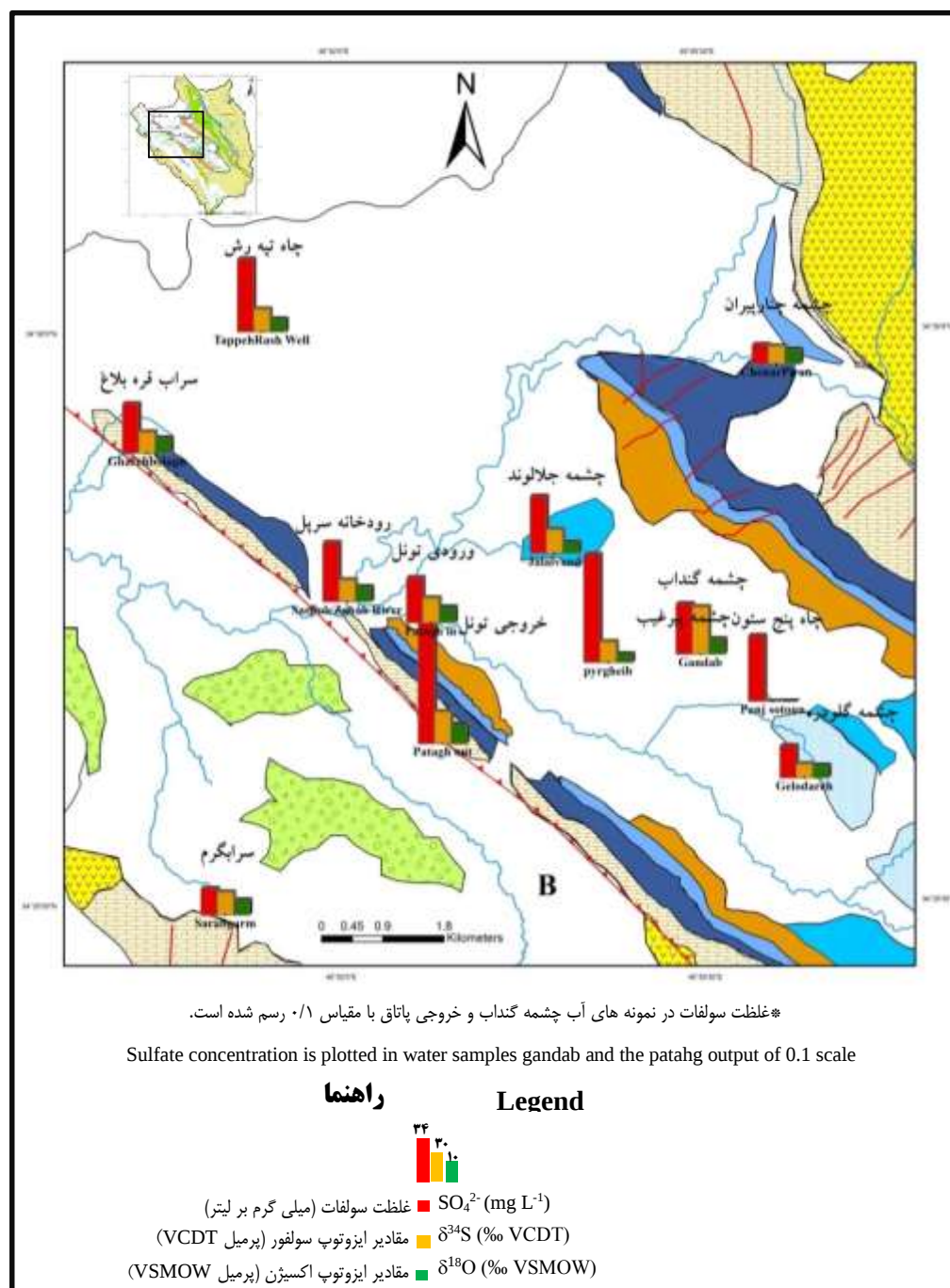
نتایج و بحث

نتایج حاصل از اندازه‌گیری پارامترهای صحرایی، غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپی سولفات در منابع آبی مختلف منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

$$\delta^{34}\text{S} = \left(\frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{std}}}{R_{\text{std}}} \right) \times 10^3 \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه: R_{sample} و R_{std} ، بیانگر نسبت فراوانی ایزوتوپ‌های سنگین به سبک ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) به ترتیب در استاندارد (VCDT) و نمونه آب می‌باشد، و $\delta^{34}\text{S}$ مقدار ایزوتوپ سولفور برحسب واحد پرمیل^۱ (‰) می‌باشد. لازم به ذکر است مرجع اندازه‌گیری برای ایزوتوپ سولفور و ایزوتوپ اکسیژن به ترتیب $^{\text{V}}\text{VCDT}$ و $^{\text{V}}\text{VSMOW}$

- 1- Permil
- 2- Vienna-Canyon Diablo Troilite meteorite
- 3- Vienna Standard Mean Ocean Water



شکل ۲- غلظت سولفات و مقادیر ایزوتوپ های ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$) در نمونه های آب
Figure 2- Sulfate concentrations and its isotope ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$) values in water sources

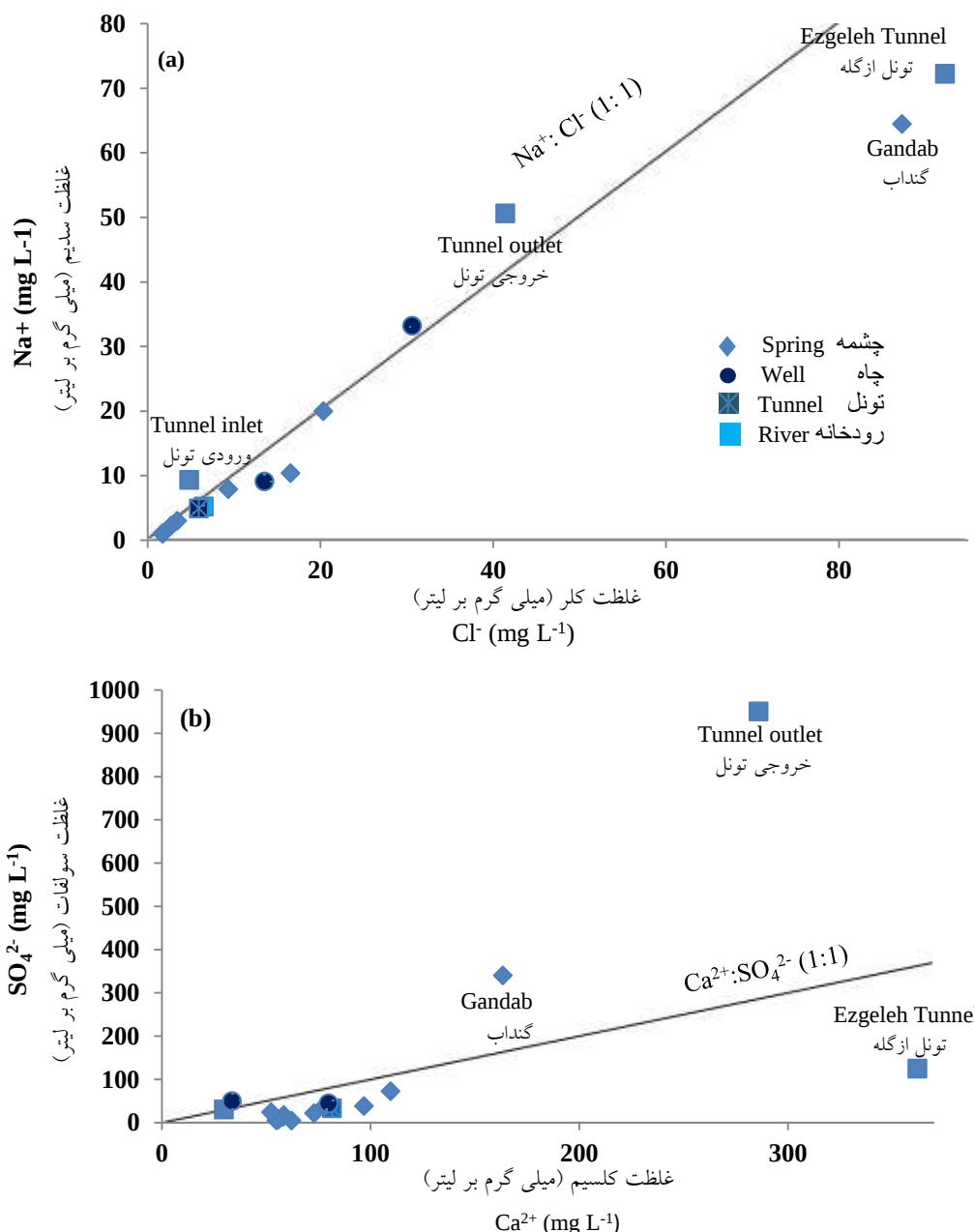
در طول دشت قلعه شاهین و در امتداد تاقدیس دانه خشک به سمت خروجی دشت در آبخوان آبرفتی دشت موجب ورود مقادیر سولفات بیشتری به منابع آب سازند کارستی آسماری از طریق گسل های عرضی شده است. که افزایش غلظت سولفات در چشمه سراب قره بلاغ نسبت به چشمه سراپگرم که در ابتدای دشت قلعه شاهین

تعیین منشأ سولفات آب های زیرزمینی بر اساس تغییر غلظت یون ها

به دلیل این که سازند گچساران سنگ کف آبخوان آبرفتی دشت قلعه شاهین (شکل ۱) را تشکیل می دهد، انحلال ژپس در تکامل هیدروشیمیایی آبخوان آبرفتی این دشت نقش مؤثر دارد. حرکت آب

افزوده می‌شود. بیشترین مقدار یون سولفات در چشمه گنداب نمود می‌یابد. این مطلب نشان‌دهنده ارتباط با مخزن حاوی مواد هیدروکربنی در سازند ایلام احتمالاً از طریق شکستگی‌ها و گسل‌ها در محل چشمه گنداب می‌باشد.

قرار دارد این فرضیه را ثابت می‌کند (شکل ۲). در دشت بشیوه چشمه گلودره که از سازند ایلام تخلیه می‌شود، دارای کمترین مقدار سولفات است و آب آن به دلیل ساخت حمام در بالادست کمی آلوده شده است. در دشت بشیوه نیز در جهت جریان آب‌های زیرزمینی به طرف شمال غرب بر میزان سولفات در چشمه‌های گنداب، پیرغیب و جلالوند



شکل ۳- موقعیت نمونه‌های آب منطقه (a) بر روی نمودار غلظت سدیم در برابر غلظت کلر، (b) بر روی نمودار غلظت سولفات در مقابل غلظت کلسیم
Figure 3- Water sample positions on (a) Na⁺ vs. Cl⁻ diagram, (b) SO₄²⁻ vs. Ca²⁺ diagram

باکتریایی سولفات دارای مقادیر ایزوتوپی غنی تر است. به دلیل آلودگی ناشی از تأثیر فاضلاب حمام ساخته شده در بالادست، چشمه گلدره دارای مقدار ایزوتوپی سولفور ($\delta^{34}\text{S}$) تهی تر بوده (۹/۵ پرمیل VCDT) و فقط این نمونه به همراه نمونه آب چنارپیران در محدوده آلودگی در شکل ۴- ب قرار می گیرد. به طور کلی مواد شوینده دارای مقدار $\delta^{34}\text{S}$ در حدود ۱ پرمیل (۱٪ VCDT)، اما مقدار $\delta^{34}\text{S}$ سولفات ناشی از لیتولوژی غنی تر از ۱۱ پرمیل (۱٪ VCDT) می باشد (۱۲).

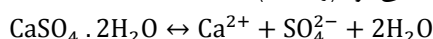
با پیاده کردن نمونه های آب بر روی نمودار $\delta^{34}\text{S}$ در مقابل غلظت سولفات نیز می توان منشأ سولفات آب های زیرزمینی را تشخیص داد (شکل ۵- الف). به جز نمونه آب چشمه گنداب منشأ سولفات آب سایر منابع آبی تقریباً یکسان است. البته فرآیندهای مختلف سبب پراکندگی موقعیت نمونه ها در سطح نمودار شده است. به دلیل آلودگی، چشمه های گلدره و چنارپیران مقدار ایزوتوپی گوگرد تهی-تری را نشان می دهند (به ترتیب ۹/۵ و ۱۲/۱، ۱٪ VCDT). نمونه آب خروجی تونل دارای مقدار ایزوتوپ سولفور نزدیک به سایر منابع آب می باشد، اما به دلیل خروج آب از سازند گچساران، غلظت سولفات در آن بسیار بالا است. آب چشمه گنداب به دلیل ارتباط با مخازن هیدروکربنی و وقوع پدیده احیای باکتریایی سولفات دارای مقدار ایزوتوپ سولفور بسیار غنی تری نسبت به بقیه منابع آب می باشد (حدود ۳۱/۹، ۱٪ VCDT). با پیاده نمودن نمونه های آب بر روی نمودار مقدار $\delta^{34}\text{S}$ نسبت به معکوس غلظت سولفات ($1/\text{SO}_4^{2-}$) می توان مقدار $\delta^{34}\text{S}$ را در منبع اولیه به دست آورد (شکل ۵- ب). به این صورت که با عبور دادن بهترین خط نسبت به داده ها، میزان عرض از مبدأ به عنوان مقدار $\delta^{34}\text{S}$ منبع اولیه به دست می آید (۱۸). شکل ۵- ب، نشان می دهد که در منطقه مطالعاتی مقدار اولیه ایزوتوپ سولفات ($\delta^{34}\text{S}$) حدود ۲۲ پرمیل (۱٪ VCDT) بوده است که نشان از منشأ زمین شناسی سولفات می باشد.

بررسی شرایط اکسیداسیون- احیا منابع آبی در منطقه مورد مطالعه

واکنش های اکسایش- احیاء واکنش های شیمیایی هستند که حین انجام آن ها، تبادل الکترون انجام می شود. در محیط های طبیعی عامل اکسند اصلی اکسیژن جو و عامل کاهنده اصلی کربن آلی است (۲۱). با کاهش میزان اکسیژن محیط به دلایل عدم ارتباط با جو و یا مصرف آن توسط ماده آلی، پتانسیل ریداکس (Eh) محیط کاهش یافته و واکنش های اکسایش- احیا به صورت توالی ذکر شده در پیش می رود (۸). بدین صورت که با مصرف هر عامل اکسند شرایط محیطی به سمت پایین و با مصرف هر عامل کاهنده شرایط محیطی به سمت بالای توالی پیش خواهد رفت (شکل ۶).

در صورت ارتباط مواد هیدروکربنی با شورابه های نفتی در آبخوان بایستی مقدار $\text{Na} < \text{Cl}$ و همچنین مقدار کل مواد جامد محلول آب (TDS) بیشتر از 500 mg L^{-1} باشد (۱۴). موقعیت نمونه آب گنداب و تونل از گله (موقعیت آن خارج از محدوده مورد مطالعه می باشد، (۳) نشان دهنده ای این مطلب است (شکل ۳- الف). غلظت سولفات در خروجی تونل نسبت به سایر منابع آبی بسیار بالاست (۹۵۰ میلی گرم بر لیتر) که به دلیل خروج آب از سازند گچساران می باشد. مقدار نسبت Na/Cl در نمونه های ورودی و خروجی تونل پاتاق نشان دهنده ای انحلال کانی های تبخیری و تبادل یونی است. کمترین میزان غلظت سولفات مربوط به چشمه چنارپیران است چون این چشمه در نواحی مرتفع قرار دارد و از سازند آسماری تخلیه می شود و دارای کیفیت خوبی می باشد، از طرفی نتایج ایزوتوپی نشان از آلودگی در این چشمه را می دهد و منشأ ثانویه ای از سولفات می تواند دخیل باشد (شکل ۲).

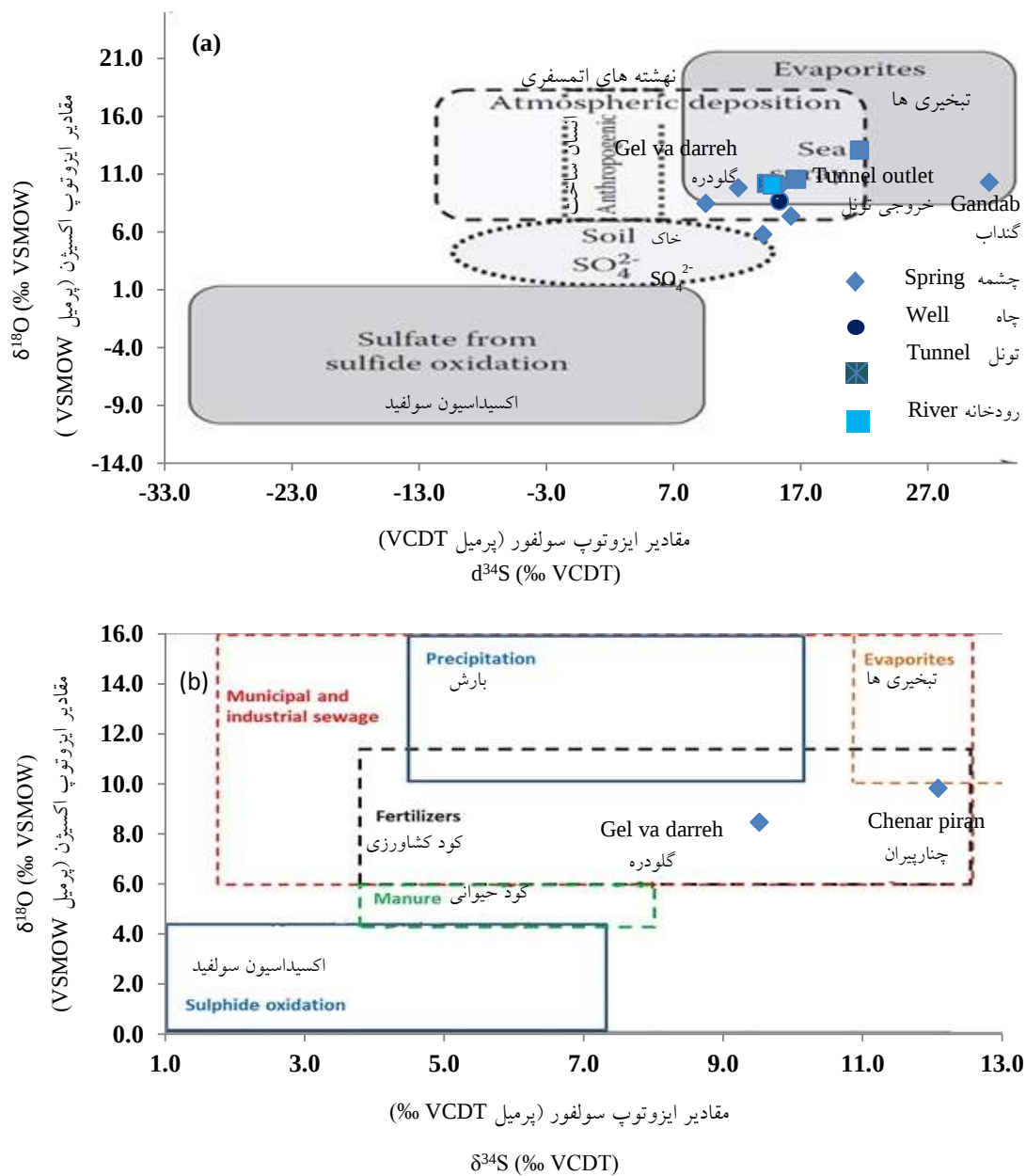
در صورتی که سولفات منشأ لیتولوژیک داشته باشد و از انحلال ژئیس در سازندهای تبخیری منشأ گیرد، بایستی نسبت $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ برابر ۱:۱ باشد. چراکه با انحلال یک مول ژئیس یک مول Ca^{2+} و یک مول سولفات تولید می شود (رابطه ۳).



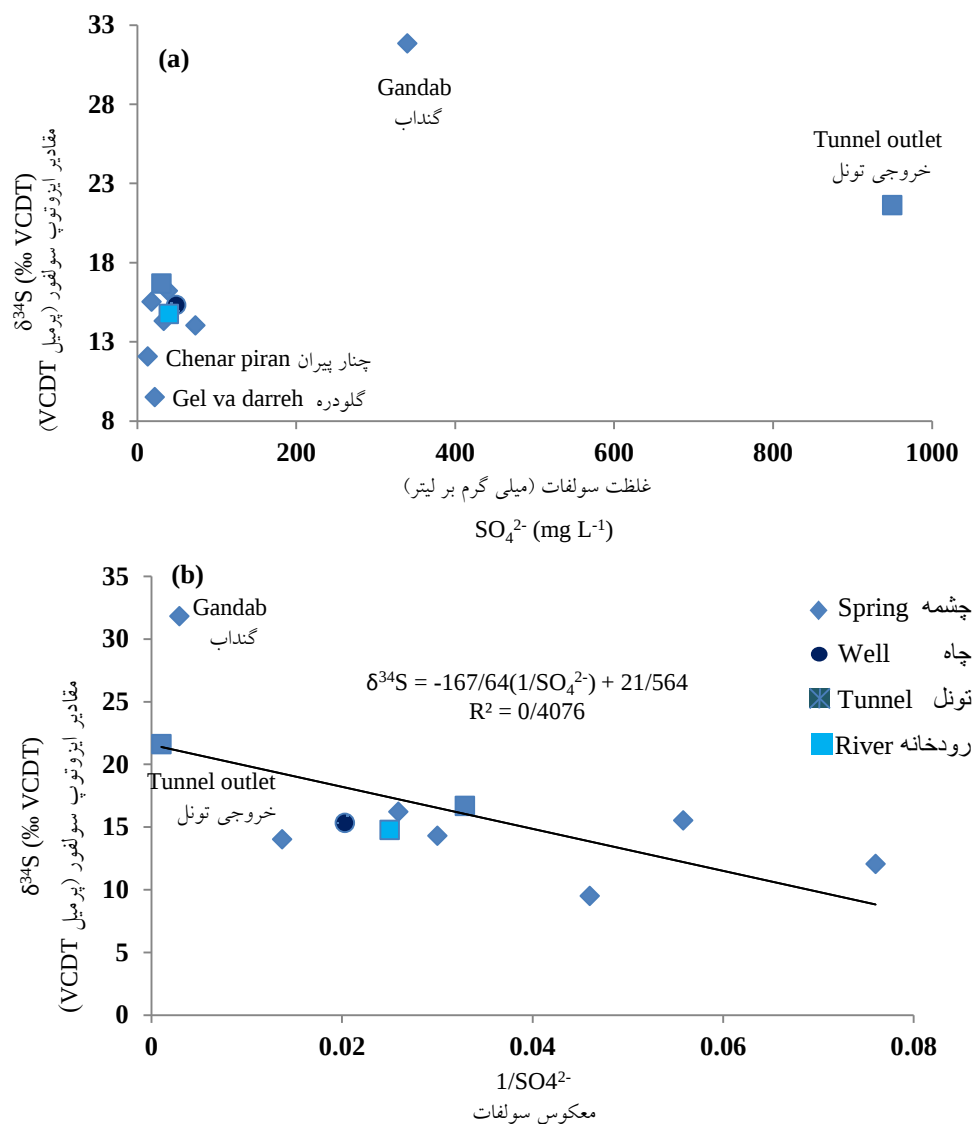
اما در بسیاری از نمونه ها (به جز نمونه های گنداب و خروجی تونل پاتاق) یک منبع اضافی برای کلسیم وجود دارد که با توجه به زمین شناسی منطقه، کلسیم می تواند علاوه بر انحلال تبخیری ها (ژئیس)، از انحلال کلسیت یا دولومیت (سازندهای آهکی) منطقه نیز تأمین شود (شکل ۳- ب). همان گونه که قبلاً اشاره شد آب چشمه گنداب و خروجی تونل پاتاق دارای میزان سولفات بسیار بالایی است، به طوری که فرآیندهای رسوب کلسیت و خروج Ca^{2+} از محیط با توجه به شاخص اشباع کلسیت (به ترتیب در آب خروجی تونل پاتاق و چشمه گنداب برابر با صفر و ۰/۱) و احیای باکتریایی سولفات (که متعاقباً بحث شده است) نتوانسته اند سبب کاهش غلظت سولفات گردد.

تعیین منشأ سولفات آب های زیرزمینی بر اساس تغییرات مقادیر ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^{34}\text{S}$)

در نمونه های اندازه گیری شده در منطقه مورد مطالعه، مقدار $\delta^{34}\text{S}$ بین ۹/۵ تا ۳۱/۸ پرمیل (۱٪ VCDT) و مقدار $\delta^{18}\text{O}$ بین ۵/۸ تا ۱۳/۱ پرمیل (۰٪ VSMOW) تغییر می کند (جدول ۱). موقعیت نمونه ها بر روی نمودار $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^{34}\text{S}$ (شکل ۴- ب) و مقادیر ایزوتوپی اندازه گیری شده نشان دهنده ای منشأ تبخیری ها و همچنین اتمسفری سولفات در آب می باشد. چشمه گنداب به دلیل احیای



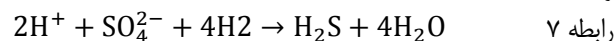
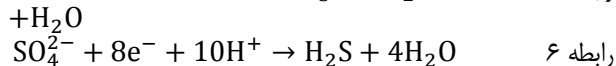
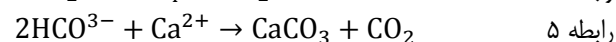
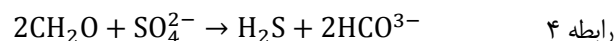
شکل ۴- موقعیت نمونه های آب منطقه بر روی نمودار $\delta^{18}\text{O}$ در مقابل $\delta^{34}\text{S}$ (a)، تغییر یافته از (۱) و (b)، تغییر یافته از (۱۲)
Figure 4- Water sample positions on $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^{34}\text{S}$ diagram, modified (a) from (1), (b) from (12)



شکل ۵- موقعیت نمونه‌ها بر روی نمودار $\delta^{34}\text{S}$ در مقابل (a) غلظت سولفات و (b) در مقابل معکوس غلظت سولفات (۱۸)

Figure 5- Water sample positions on $\delta^{34}\text{S}$ vs. (a) sulfate concentration, (b) reverse sulfate concentration diagram (18)

و $\delta^{18}\text{O}$) در سولفات باقی‌مانده، در آب می‌شود که توسط گروهی از باکتری‌ها (باکتری‌های کاهش‌دهنده‌ی سولفات) انجام می‌شود. در حین واکنش‌های احیای سولفات هیدروژن مصرف شده و بی‌کربنات تولید می‌شود و در نتیجه pH آب بالا می‌رود (۸). که در نهایت سبب رسوب کلسیت می‌شود، رابطه ۴ و ۵ (۶). علی‌رغم کاهش غلظت در اثر فعالیت‌های باکتریایی در چشمه گنداب به دلیل منبع هیدروکربنی و حجم زیاد ورود سولفات به آب این چشمه، غلظت آن بالاتر از غلظت سولفات در دیگر منابع آبی است. در منطقه مورد مطالعه در



در منطقه مورد مطالعه تمامی نمونه‌های آب در حالت احیا قرار دارند (شکل ۷- a). احیای سولفات به شرح زیر می‌باشد.

در طی یکی از این واکنش‌های ۴ تا ۷ که شامل انتقال الکترون، اکسیداسیون H_2 یا مواد آلی، تولید گاز H_2S ، همراه با کاهش غلظت سولفات و غنی‌شدگی ایزوتوپ‌های سولفات ($\delta^{34}\text{S}$)

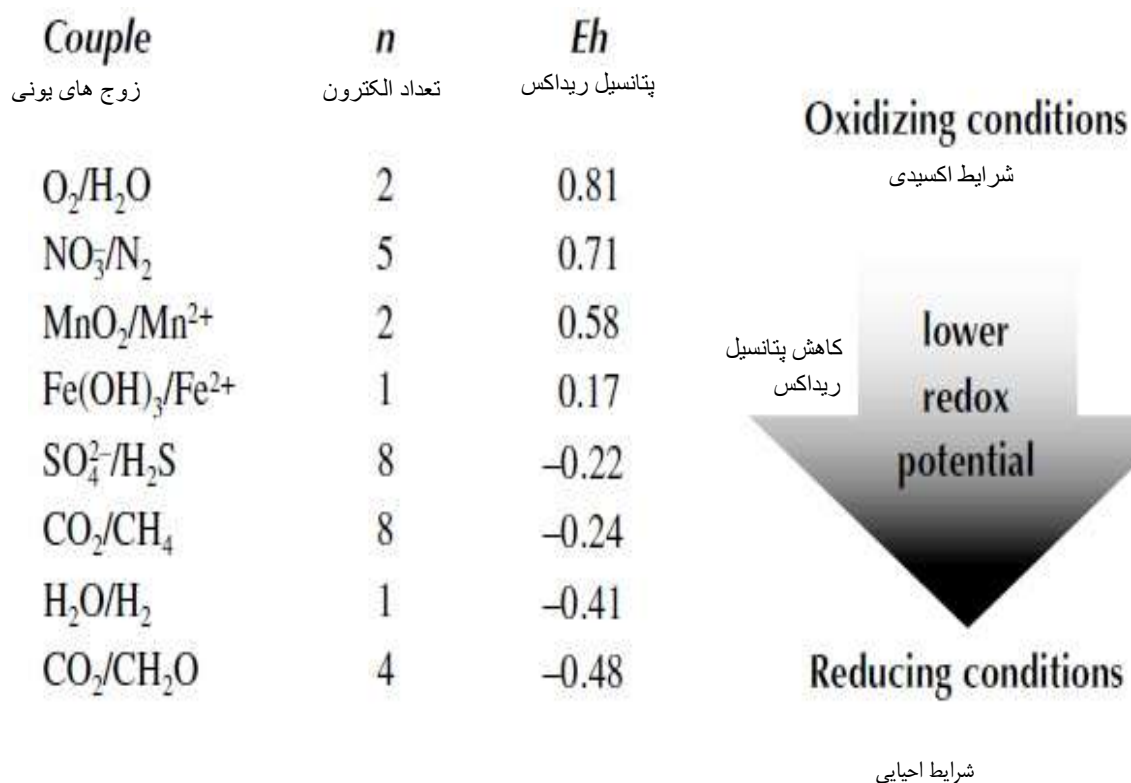
ایزوتوپ‌های سولفات در منابع آبی منطقه سرپل ذهاب است. هرچند که عوامل انسانی و هیدروکربنی به صورت محلی سبب تغییر در غلظت و ایزوتوپ‌های سولفات شده‌اند اما تأثیر لیتولوژی به صورت کلی در غلظت و ایزوتوپ‌های سولفات آب‌های منطقه بیشتر است. لیتولوژی منطقه که اغلب آهکی و تبخیری می‌باشد، به دلیل حالیت بالای این مواد در آب توانسته‌اند تأثیر قابل توجهی بر ایزوتوپ‌های سولفات در منابع آبی نیز داشته باشند. انحلال سازند تبخیری گچساران سبب کاهش چشمگیر کیفیت آب‌های زیرزمینی، به ویژه در حوالی خروجی تونل پاتاق شده است. در چشمه گلودره اختلاط منابع سولفات تبخیری - اتمسفری با فعالیت‌های انسانی سبب آلودگی این چشمه و تهی شدگی ایزوتوپی سولفات آن شده است. اما در چشمه گنداب فرآیندهای پیچیده‌تری در حال وقوع است، ارتباط سنگ‌بستر این چشمه با مواد هیدروکربنی سبب نشت مواد آلی به بالا و فراهم شدن شرایط احیایی و وقوع کاهش سولفات در آب این چشمه شده است.

چشمه گنداب بوی گاز سولفید هیدروژن (H_2S) به شدت احساس می‌شود. همان‌طور که اشاره گردید نتیجه احیای باکتریایی سولفات است. موقعیت چشمه‌ها بر اساس مقادیر pH و Eh اندازه‌گیری شده در صحرا بر روی نمودار Eh vs. pH (شکل ۷- b) نشان می‌دهد که چشمه گنداب و چاه پنج ستون (نزدیک به چشمه گنداب) در محدوده سولفید هیدروژن (H_2S) قرار می‌گیرند. این موضوع نشان‌دهنده تولید گاز H_2S و شرایط احیای سولفات توسط باکتری‌ها در آب چشمه گنداب می‌باشد.

با استفاده از مقادیر ایزوتوپ‌های سولفات نیز می‌توان به وقوع کاهش سولفات پی برد، بدین صورت که اگر نسبت ایزوتوپ‌های $\delta^{34}S$ به $\delta^{18}O$ سولفات در منابع آبی بین ۲/۴ تا ۴ باشد، نشان‌دهنده انجام فرآیند احیا سولفات است (۱۹). در چشمه گنداب این نسبت برابر با ۳/۱ می‌باشد که تأییدکننده شرایط احیایی آب چشمه می‌باشد.

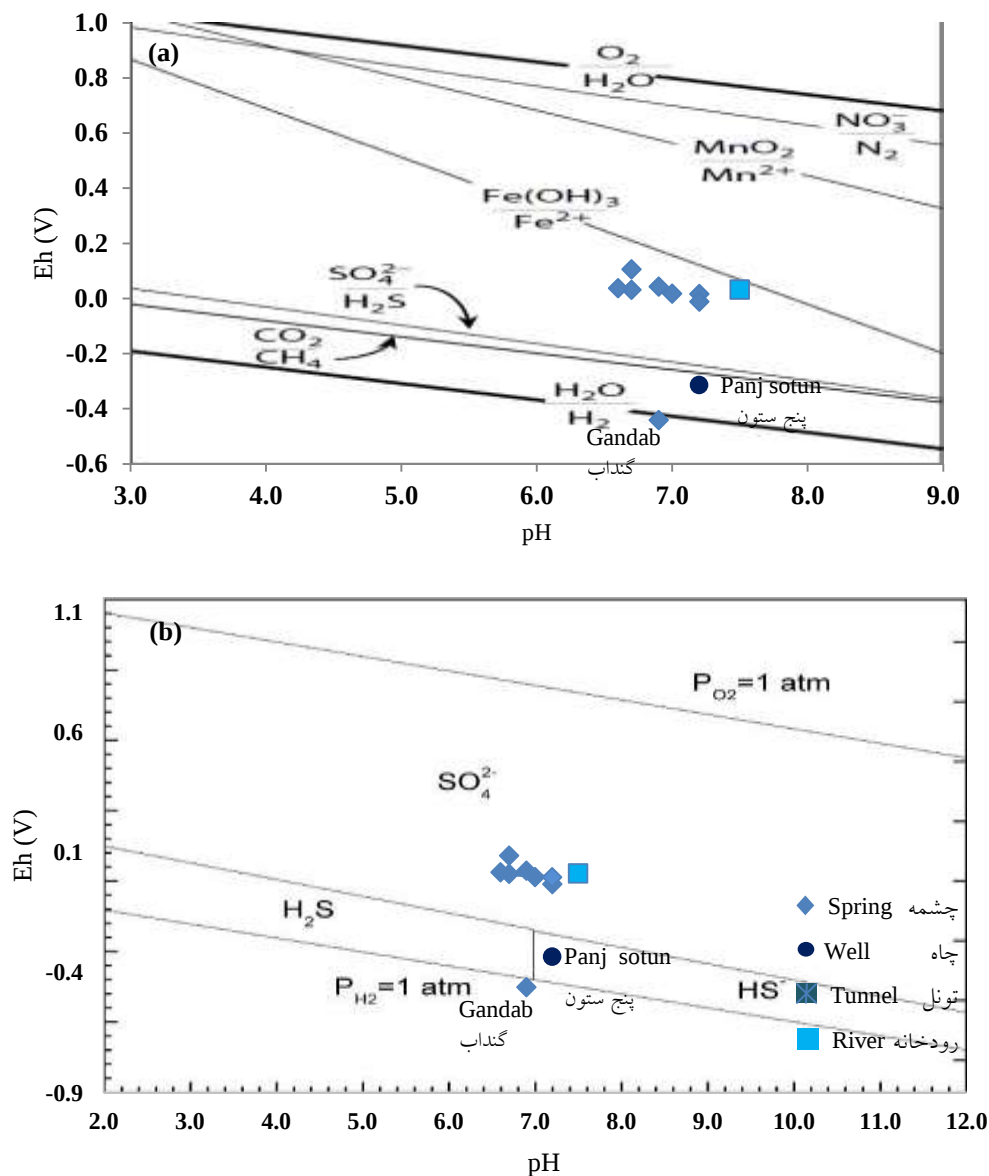
نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان‌دهنده تأثیر عوامل زمین‌شناسی، اتمسفری، انسانی و همچنین تأثیر مواد هیدروکربنی بر غلظت و



شکل ۶- زوج‌های اکسیداسیون - احیا در آب‌های زیرزمینی (۸)

Figure 6- Major redox couples in groundwater (8)



شکل ۷- (a) شرایط اکسیداسیون- احیا منابع آبی و زوج‌های ریداکس بر روی نمودار Eh- pH و (b) موقعیت نمونه‌های آب منابع آبی بر روی نمودار Eh- pH اجزای سولفات، تغییر یافته از (۹)

Figure 7- (a) Oxidation-reduction conditions of water resources and redox couples on Eh vs. pH diagram, and (b) water sample positions on Sulfate components Eh vs. pH diagram, modified from (9)

منابع

1. Aelion C.M., Höhener P., Hunkeler D., and Aravena R. 2010. Environmental Isotopes in Biodegradation and Bioremediation. CRC Press.
2. Appelo C.A.J., and Postma D. 2005. Geochemistry, groundwater and pollution, Leiden, The Netherlands: A A Balkema Publishers.
3. Arbabi M., Rafiei B., Bayati M., and Malekiran M. 2011. Determination of sulfuric acid (H_2SO_4) and dissolution wallrocks in Nosoud water supply tunnel (Ezgeleh, NW Kermanshah). 30th Earth Science Conference. (In Persian)
4. Berner R.A. 1971. Bacterial processes affecting the precipitation of calcium carbonate in sediment, In: Carbonate Cements, O. P. Bricker. The Johns Hopkins Press, Baltimore.
5. Bottrell S.H., Tellam J., Barlett R., and Hughes A. 2008. Isotopic composition of sulfate as tracer of natural and

- anthropogenic influences on groundwater geochemistry in an urban sandstone aquifer, Birmingham, UK. *Applied Geochemistry* 23: 2381–2394.
6. Brunner B., Bernasconi S.M., Kleikemper J., and Schroth H. 2005. A model for oxygen and sulfur isotope fractionation in sulfate during bacterial sulfate reduction processes. *Geochimica Cosmochimica Acta* 69: 4773–85.
 7. Canfield D.E., Olesen C.A., and Cox R.P. 2006. Temperature and its control of isotope fractionation by a sulfate-reducing bacterium. *Geochimica Cosmochimica Acta* 70: 548–61.
 8. Clark I.D. 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. CRC Press.
 9. Drever J.J. 1997. *The Geochemistry of Natural Waters*. 3rd ed. Prentice-Hall.
 10. Detmers J., Bruchert V., Habicht K.S., and Kuever J. 2001. Diversity of sulfur isotope fractionations by sulfate-reducing prokaryotes. *Applied Environmental Microbiology* 67: 888–94.
 11. Fritz P., and Drimmie R.J. 1991. Ground water. In *Stable isotope: Natural and anthropogenic sulphur in the environment*, SCOPE 43 (eds.). H. R. Krouse and V. A. Grinenko 228–41. Chichester: Wiley.
 12. Jakobczyk-Karpierz S., Sitek S., Jakobsen R., and Kowalczyk A. 2017. Geochemical and isotopic study to determine sources and processes affecting nitrate and sulphate in groundwater influenced by intensive human activity - carbonate aquifer Gliwice (southern Poland). *Applied Geochemistry* 6: 168–181.
 13. Hitchon B., and Krouse H.R. 1972. Hydrogeochemistry of the surface waters of the Mackenzie River drainage basin, Canada - III. Stable isotopes of oxygen, carbon and sulphur. *Geochimica Cosmochimica Acta* 36: 1337–1357.
 14. Saberi Nasr A., Dashti Barmaki M., and Mahmoudi N. 2014-1995. *Water quality data analysis and interpretation* (Translated in Persian).
 15. Knoeller K., Trettin R., and Strauch G. 2005. Sulphur cycling in the drinking water catchment area of Torgau-Mockritz (Germany): Insights from hydrochemical and stable isotope investigations. *Hydrological Processes* 19: 3445–65.
 16. Krouse H.R., and Mayer B. 2000. Sulphur and oxygen isotopes in sulphate, in: P. G. Cook & A. L. Herczeg (ed.). *tracers in subsurface In Environmental hydrology*, p.195–231. Boston: Kluwer.
 17. Man K., Zhenmin M., and Xiujin X. 2014. Research on the Mechanism of Sulfate Pollution of Groundwater in Jiaozuo Area. *Applied Mechanics and Materials* 665: 436–439.
 18. Miao Z., Carroll K., and Brusseau M. 2013. Characterization and quantification of groundwater sulfate sources at a mining site in an arid climate: The Monument Valley site in Arizona, USA. *Hydrology* 504: 207–215.
 19. Mizutani Y., and Rafter T.A. 1973. Isotopic behaviour of sulfate oxygen in the bacterial reduction of sulfate. *Geochem* 6: 183–191.
 20. Mohammadzadeh H., and Aravena R. 2015. Investigating the Origin and Interaction between Karstic and Alluvial Aquifers in NW of Zagros Mountain Range, Iran, Using Isotopic and Geochemical Tools. *Procedia Earth and Planetary Science* 13: 256–260.
 21. Mor F., Modaberi S., and Forghani Tehrani G. 2011. *Principles of Environmental Geochemistry*. (Translated in Persian)
 22. Pearson F.J., and Rightmire C.T. 1980. Sulphur and oxygen isotopes in aqueous sulphur compounds, In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*. Vol. I, eds. P. Fritz and J.-c. Fontes, Pp.227–258. Elsevier, Amsterdam.
 23. Reuss J.O., and Johnson D.W. 1986. *Acid deposition and the acidification of soils and water*, Ecological Studies. Springer Verlag, New York.
 24. Rightmire C.T., Pearson F.J., Back W., Rye R.O., and Hanshaw B.B. 1974. Distribution of sulfur isotopes of sulfates in ground waters from the principal artesian aquifer of Florida and the Edwards aquifer of Texas, United States of America. In *Proceedings of an symposium on isotope techniques in ground water hydrology*. ed. IAEA, 191–207 Vienna.
 25. Schiff S.L., Spoelstra J., Semkin R.G., and Jeffries D.S. 2005. Drought induced pulses of SO_4^{2-} from a Canadian shield wetland: Use of $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in SO_4^{2-} to determine sources of sulfate. *Applied Geochemistry* 20: 691–700.
 26. Torres-Martínez J.A., Mora A., Knappett P.S.K., Ornelas-Soto N., and Mählknecht J. 2020. Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model. *Water Research*.
 27. Wang H., and Zhang Q. 2019. Research Advances in Identifying Sulfate Contamination Sources of Water Environment by Using Stable Isotopes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*.



Investigating the Source and Factors Affecting Sulfate Concentration and Isotopic ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$) Variations in Water Resources of Sarpol-e Zahab Region

H. Mohammadzadeh^{1,2*} - M. Bonyabadi³ - F. Jangjoo⁴

Received: 08-06-2021

Accepted: 16-10-2021

Introduction: Sulfate is one of the important groundwater pollutant sources in many parts of the world and it can enter into groundwater from various sources, such as lithology (dissolution of evaporative and pyrite oxidation), atmosphere (sea water spray), industrial (combustion of fossil fuels, sulfide- minerals production, and agricultural fertilizers), and etc. Identifying sources of soluble sulfate in water sources is important. The sulfate in groundwater can be investigated using isotope and geochemistry techniques. Using isotope (^{34}S and ^{18}O) and hydro geochemical techniques, it can be possible to find out: sulfate origins and the effective processes/reactions on sulfate concentrations and hydrogen sulfide gas (H_2S) production. In this paper, for the first time, the sulfate source in groundwater of Sarpol Zahab and the parameters affecting sulfate concentration and its isotopic compositions ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$) in groundwater were studied. Sarpol-e Zahab is located in the catchment area of Alvand river in the west of Kermanshah province, west of Iran. The formations of the region, based on age from old to new, include the Ilam, Gurpi, Amiran, Telezang, Pabdeh, Asmari, Gachsaran, Aghajari, Bakhtiari and Quaternary alluvium formations. Asmari formation and Quaternary alluvial sediments form the largest area of the region. Gachsaran formation contains evaporative materials which is reducing the quality of groundwater in the region. Ilam formation is effective in providing the organic matter required for the bacterial sulfate reduction process.

Materials and Methods: 13 water samples were taken from the water resources (wells, springs and river) of Sarpol-e Zahab region in two steps (December 2014 and September 2015). Measuring field parameters (T, pH, Eh, Ec, and TDS) and sampling of water resources were performed according to the instructions of Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Ferdowsi University of Mashhad. Field parameters were measured by VWR Handheld Multi parameter Research meter at the location of each water source. The concentration of cations and the anions were determined by the devices inductively coupled plasma elemental analyzer (ICP-EA) and ion chromatography (IC), respectively. Chemical and isotopic analyses of all water samples were performed in Ottawa university geochemistry laboratory and Waterloo university isotope laboratory, respectively. The measurement reference for isotopic sulfate and oxygen were VCDT and VSMOW, respectively, and the value isotopic are expressed as permil (‰).

Results and Discussion: The sulfate concentrations in different water resources of the region varied from 5 to 950 mg L, however, it is very high in Gandab spring' water, due to the association with hydrocarbons, and in Patagh Tunnel water, due to discharging of water from Gachsaran Formation (339.6 mg L and 950.1mg L, respectively). Chenarpiran spring has the lowest sulfate concentration because it is located in highlands and is discharged from Asmari formation with good water quality. The amount of $\delta^{18}\text{O}$ varied between 5.8 to 13.1 VCDT ‰ and the amount of $\delta^{34}\text{S}$ ranges from 9.5 to 31.8 VSMOW ‰. In Gandab spring' water, due to sulfate reduction by microorganisms, in addition to the unpleasant smell of sulfide hydrogen (H_2S), the $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values were enriched than the isotopic composition of other water sources (about 31.8 ‰ and 10.3 ‰, respectively). In other hand, the Gel va Darreh spring's water, due to the effect of upstream bath waste water (soap and detergent with a value of about 1 ‰ for $\delta^{34}\text{S}$), indicated depleted isotope values.

Conclusion: The concentration and isotopic composition of sulfate in the water resources of the Sarpol-e Zahab region are affected by the geological, atmospheric, human and hydrocarbon materials. The impact of

1, 3 and 4- Professor and Former M.Sc. Students, Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

2- Head of Groundwater and Geothermal Research Center (GRC), Water and Environment Research Institute, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

DOI: 10.22067/JSW.2021.70540.1056

human and hydrocarbon factors on the concentration and isotopes of sulfate is local, however, the lithology effects are on all water resources of the region. Since, Gachsaran formation forms the alluvial aquifer bedrock of Ghaleshahin plain, the dissolution of gypsum has an effective role in the hydro chemical evolution of the alluvial aquifer of this plain. The lithology of the area is often limestone and evaporation. Due to the high solubility of these materials in water, they have been able to have a significant effect on sulfate isotopic in water sources. The amount of measured isotopic values indicated that the origin of evaporators and atmospheric sulfate is in water. The dissolution of the evaporation formation has reduced the water quality. The association of bedrock in the Gandab spring has led to have a reduction environment and the occurrence of sulfate reduction and production of hydrogen sulfide gas (H_2S). The human activities (by making bath upstream) caused oxidizing conditions, isotopic depletion and contamination of the Glodarreah spring.

Keywords: Groundwater, Isotope Techniques, Sarepole Zahab, Sulfate



مقاله پژوهشی

تأثیر سطوح احتمالات متفاوت در برآورد نیاز آبی خالص برنج در استان‌های شمالی ایران

ابراهیم اسعدی اسکویی^{۱*} - سعیده کوزه‌گران^۲ - محمدرضا یزدانی^۳ - اصغر رحمانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۳۰

چکیده

ارزیابی صحیح نوسانات تبخیر و تعرق در سناریوهای مختلف هواشناسی نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب دارد. تحلیل‌های احتمالاتی با احتمال وقوع متفاوت می‌توانند باعث افزایش انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری و بالا بردن ضریب اطمینان تصمیمات گردد. به این منظور، تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق گیاه برنج در سه تاریخ کشت متفاوت و با چهار احتمال وقوع متفاوت ۷۵، ۵۰، ۲۵ و ۱۰ درصد، با استفاده از معادله فائو پنمن مانتیث و داده‌های هواشناسی ۱۰ ایستگاه با دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) محاسبه گردید. همچنین احتساب ضریب گیاهی برنج در مراحل مختلف رشد، در دوره‌های ۱۰ روزه به صورت میانگین بر اساس مدل ویبول برآورد و محاسبه شد. این احتمالات معرف حدود احتمالی مقادیر مورد انتظار تبخیر و تعرق در سناریوهای مختلف سال‌های تبخیر و تعرق کم، متوسط، پر تبخیر و تعرق و بسیار پر تبخیر و تعرق می‌باشد. نتایج نشان داد، در تاریخ‌های کشت مختلف برنج در مناطق عمده برنجکاری گیلان و مازندران در سال‌های متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق از ابتدای دوره رشد تا مرحله پایانی اختلاف نسبتاً ثابتی با حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر در روز بسته به منطقه در طول کل فصل مشاهده می‌شود. در مناطق عمده شالیکاری و در سال‌های کم تبخیر و تعرق نیاز آبی نسبت به سال‌های متوسط، پر تبخیر و تعرق و بسیار پر تبخیر و تعرق دارای اختلاف قابل توجهی است که از شرق به غرب کاهش می‌یابد به طوری که در استان گلستان با اختلاف تقریبی ۳۰ درصد بیش از سایر مناطق به حداکثر می‌رسد. در وضعیت زودکاشت نسبت به وضعیت دیرکاشت در عمده مناطق غربی و مرکزی سواحل کاهش ۱۰ درصدی مصرف آب دیده می‌شود. در مقیاس کل فصل رشد در گرگان، تبخیر و تعرق در وضعیت‌های مختلف تاریخ کشت بطور متوسط ۲۰ درصد (۱۳۰۰ متر مکعب) بیشتر از عمده مناطق گیلان و مازندران می‌باشد. در وضعیت کاشت به موقع، نیاز خالص آبیاری سال‌های با تبخیر و تعرق بسیار زیاد نسبت به سال‌های متوسط در حدود ۲۰۰۰ متر مکعب در هکتار بیشتر است. در سال‌های با تبخیر و تعرق بسیار زیاد اتخاذ دیر کاشت موجب افزایش بیش از ۲۱۰ میلی‌متر در نیاز خالص آبیاری شود. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید در صورت وجود پیش‌بینی‌های اقلیمی دال بر گرم بودن فصل برنجکاری بهتر است که نوع مدیریت آبیاری با آب موجود با محاسبات سال‌های پر تبخیر و تعرق متناسب شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، تحلیل‌های احتمالاتی، گیاه برنج، نیاز آبی

مقدمه

برنج (*Oryza sativa* L.) یکی از مهم‌ترین محصولات

۱- استادیار پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو،

مشهد، ایران

(*) نویسنده مسئول : (Email: e.asadi.o@gmail.com)

۲- دکترای هواشناسی کشاورزی، گروه تحقیقات هواشناسی کاربردی مشهد، ایران

۳- استادیار مؤسسه تحقیقات برنج کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، رشت، ایران

۴- دانشجوی دکتری خاک‌شناسی، دانشگاه تهران، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2021.71370.1064

کشاورزی دنیا است. با وجود این که برنج در محدوده وسیعی از شرایط اقلیمی و جغرافیایی مورد کشت و کار قرار می‌گیرد، ولی نسبت به تغییرات شرایط محیطی آسیب‌پذیر می‌باشد. وضعیت رشدی و فنولوژیکی گیاه برنج ویژگی‌های اقلیمی موثر بر عملکرد آن با توجه به عوامل محیطی موجود جهت کاهش اتلاف انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است. مدیریت کاشت و طراحی سامانه‌های آبیاری و دور آبیاری مناسب جهت تولید بهینه در هر رقم برنج، از عوامل اصلی و تأثیرگذار در تولید پایدار است. عوامل مؤثر بر انتخاب سطح احتمال وقوع و دور آبیاری شامل نوع گیاه، بافت خاک، ریسک‌پذیری زارع و نوع سامانه آبیاری هستند (۱۰). مقدار آب مورد نیاز برنج به‌طور مستقیم به میزان رطوبت تبخیر شده از طریق برگ‌ها و خاک وابسته

نشان داده است که با افزایش احتمال، میزان تبخیر و تعرق افزایش یافته و نقطه اوج ET_0 و ET_c در اقلیم نیمه معتدل زودتر از اقلیم خشک تا نیمه خشک اتفاق خواهد افتاد (۱۵).

برای تخمین نیاز آبی مطالعه‌ای در کره جنوبی، یو و همکاران (۱۷) با استفاده از معادله فائو-پنمن-مانتیت (FPM)، پس از بررسی نه توزیع احتمال مختلف، تابع لجستیک تعمیم یافته را به عنوان تابع توزیع بهینه انتخاب نمودند. حیدری و همکاران (۴) در منطقه همدان تاثیر روش محاسبه، طول دوره حداکثر نیاز آبی و سطوح احتمال در برآورد بهینه آب مورد نیاز گیاه گندم را بررسی نمودند. نتایج اولیه آن‌ها نشان داده است در صورتی که طراحی سیستم آبیاری بر اساس میانگین ET_c گندم (طول دوره ۷ روزه) با احتمال وقوع ۵۰ درصد و با ۵ روش مختلف صورت پذیرد، ظرفیت سیستم جهت تأمین آب کمتر از حالتی خواهد بود که احتمال وقوع ۷۵ درصد اعمال شده است. از سوی دیگر، با افزایش دوره‌های حداکثر نیاز آبی، مقدار میانگین نیاز آبی روزانه کاهش می‌یابد. بنابراین برای یک دوره خاص با افزایش سطح احتمالاتی، میزان میانگین نیاز آبی روزانه گیاه نیز افزایش پیدا می‌کند. در روش آبیاری غرقابی در اراضی شالیزاری، تبخیر آب از سطح خاک یکی از اجزای تلفات آب محسوب می‌گردد. با توجه به اینکه دمای محیط ریشه در فرایندهای تبخیر و تعرق و رشد و توسعه گیاه و در نهایت نیاز آبی گیاه نقش بسزایی دارد، مطالعه اثر عمق آبیاری بر دمای آب و خاک در شالیزار و اثر آن بر سطوح تبخیر و تعرق در شالیزار توسط اسعدی اسکویی و همکاران (۳) انجام شده است. نتایج نشان داد که دمای خاک در عمق ۵ سانتی‌متر با اختلاف معنی‌داری بیشتر از عمق ۱۰ سانتی‌متری بوده است. اختلاف در اندازه‌گیری‌های صبح کمتر و در عصر بیشتر است و سه روند تغییرات تقریبی کاهش، افزایش و مجدداً کاهش دما نسبت به عمق آبیاری قابل مشاهده است و این نوسانات اثر مستقیم بر تغییرات میزان تبخیر و تعرق در شالیزار دارد.

در منطقه ارومیه مهدی‌زاده و همکاران (۸) نیز با استفاده از داده‌های ۲۴ ساله اقلیمی تبخیر و تعرق مرجع با دو روش فائو-پنمن-مونتیت (FPM) و هارگریوز-سامانی (HS) را محاسبه کرده و منحنی‌های توزیع روزانه تبخیر و تعرق با سطوح احتمال وقوع مختلف را استخراج کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که اختلاف بین مقادیر حداکثر ET_0 روزانه با روش FPM با سطوح احتمالاتی ۷۵ و ۹۰ درصد به ترتیب ۱/۰ و ۱/۹ میلی‌متر در روز (معادل ۱۳ و ۲۴ درصد) و برای روش HS به ترتیب ۰/۵ و ۰/۹ میلی‌متر در روز (معادل ۸ و ۱۵ درصد) خواهد بود. بنابراین بر اساس سطح احتمال این اختلاف تغییر خواهد کرد. در منطقه تبریز با هدف مقایسه نیاز آبیاری گندم پاییزه توسط توابع توزیع احتمال مختلف با مقادیر محاسبه شده توسط برنامه NETWAT نیز شریفی بناب و همکاران (۱۴) مطالعه‌ای انجام دادند و مشخص کردند نتایج

بوده و بر اساس دوره فنولوژیکی و رقم مورد استفاده تغییر می‌کند. مقدار آب مورد نیاز کشت گیاه برنج به نوع رقم، روش کاشت، ابعاد کرت، تراکم بوته، مقدار مصرف مواد غذایی، بافت خاک، شرایط زهکشی، اقلیمی و اکولوژیکی بستگی دارد (۲). ارقام زودرس برنج در مقایسه با ارقام دیررس به آب کمتری جهت رشدنمو نیاز دارند. اگر در مراحل فنولوژیکی حساس مثل خوشه‌دهی و گلدهی رطوبت کافی در اختیار گیاه قرار نگیرد، عمل تلقیح به خوبی انجام نشده و سبب کاهش عملکرد محصول برنج می‌شود. برای طراحی سامانه‌های آبیاری، توصیه شده است از مقادیر میانگین ET_c روزانه برای دوره حداکثر نیاز آبی و احتمال وقوع مناسب استفاده شود (۸). در این حالت از بروز تنش آبی در گیاه تحت آبیاری به دلیل عدم توانایی سامانه آبیاری در تأمین نیاز آبی گیاه جلوگیری خواهد کرد.

به اعتقاد یو و همکاران (۱۷) مهمترین بخش طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های تأمین‌کننده آب مورد نیاز کشاورزی تخمین نیاز آبی گیاه می‌باشد. برنامه‌ریزی‌های مدیریتی که در رابطه با محصولات مختلف صورت می‌گیرد، به درک درستی از اقلیم منطقه به‌خصوص بارندگی، مقدار تبخیر و دمای هوا بستگی دارد (۷). پایه و اساس برنامه‌ریزی آبیاری و طراحی ظرفیت سامانه‌های آبیاری نیز تبخیر و تعرق می‌باشد (۹). مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه (ET_c) از حاصل‌ضرب ضریب گیاهی (K_c) در تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) به‌دست می‌آید (۱). محققان متعددی در این زمینه مطالعاتی انجام داده‌اند. رایت و همکاران (۱۶)، نیکسون و همکاران (۱۲) و پرویت و همکاران (۱۳) در منطقه کالیفرنیا، کواستال و کیمبرلی مطالعه‌ای را برای تعیین تاریخ زمان حداکثر تبخیر و تعرق مرجع با طول دوره‌های مختلف مانند ۱ تا ۳۰ روزه با کمک منحنی‌های توزیع ET_0 روزانه با سطوح احتمال وقوع متفاوت انجام دادند. جنسن و همکاران (۶) برای گیاهان دارای توسعه ریشه کم، جهت برنامه‌ریزی آبیاری و طراحی سیستم‌های آبیاری، استفاده از منحنی‌های ET_0 روزانه با سطح احتمال وقوع ۸۰٪ یا ۹۰٪ را پیشنهاد نمودند. نیکبخت و میرلطیفی (۱۱) نیز تاثیر روش محاسبه ET_0 ، احتمال وقوع و طول دوره حداکثر مصرف آب بر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در تهران را در سطوح احتمال وقوع متفاوت در یک دوره ۳۰ ساله استخراج کردند. مطالعه نیکبخت و همکاران (۱۱) که در مراغه انجام شده است نشان می‌دهد اختلاف قابل ملاحظه در مقادیر میانگین ET_c روزانه با سطح احتمال وقوع‌های متفاوت وجود دارد که این حالت تاثیر قابل توجهی در مقادیر ظرفیت سامانه‌های آبیاری می‌گذارد. بنابراین در صورت استفاده از مقادیر میانگین ET_c روزانه برای دوره‌های ۱۰ روزه حداکثر نیاز آبی و در سطح احتمالاتی ۲۱ تا ۵۰ درصد کمتر از مقدار مورد نیاز گیاه (در دوره حداکثر نیاز آبی) آب تحویل می‌گردد. بررسی روند تغییرات منحنی‌های فراوانی وقوع تبخیر و تعرق در استان گلستان نیز

جغرافیایی $48,508,916^{\circ}$ تا $56,235,011^{\circ}$ شرقی و $36,914,573^{\circ}$ تا $37,959,753^{\circ}$ شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).

در این تحقیق فراسنج هواشناسی روزانه مورد نیاز برای دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۰ از سازمان هواشناسی تهیه شده و اطلاعات مراحل فنولوژیکی برنج (تعداد روزهای تکمیل مراحل چهارگانه) و کشاورزی (ضرایب kc) نیز از موسسه تحقیقات برنج کشور (گزارشات منتشر نشده در سال‌های اخیر دریافت گردید (جدول ۲).

به منظور بررسی تغییرات مقادیر تبخیر و تعرق گیاه برنج با استفاده از داده‌های هواشناسی در سه تاریخ کشت متفاوت و با چهار احتمال وقوع متفاوت ۷۵، ۵۰، ۲۵ و ۱۰ درصد، با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه و برآورد گردید. این احتمالات معرف سال‌های کم تبخیر، متوسط، پرتبخیر و بسیار پرتبخیر می‌باشد به عبارت دیگر اعداد برآورد شده در این پژوهش نشان دهنده حدود احتمالی مقادیر مورد انتظار تبخیر و تعرق در سناریوهای مختلف کم تا بسیار پرتبخیر می‌باشد.

در این پژوهش آمار روزانه تبخیر و تعرق گیاه با توجه به میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردی از معادله فائو پنمن مانیتیت و با احتساب ضریب گیاهی برنج در مراحل مختلف رشد با استعلام از موسسه تحقیقات برنج کشور، و بر اساس تحقیق (رضوی پور، یزدانی ۱۳۷۹) در دوره آماری ۳۰ ساله برآورد گردید.

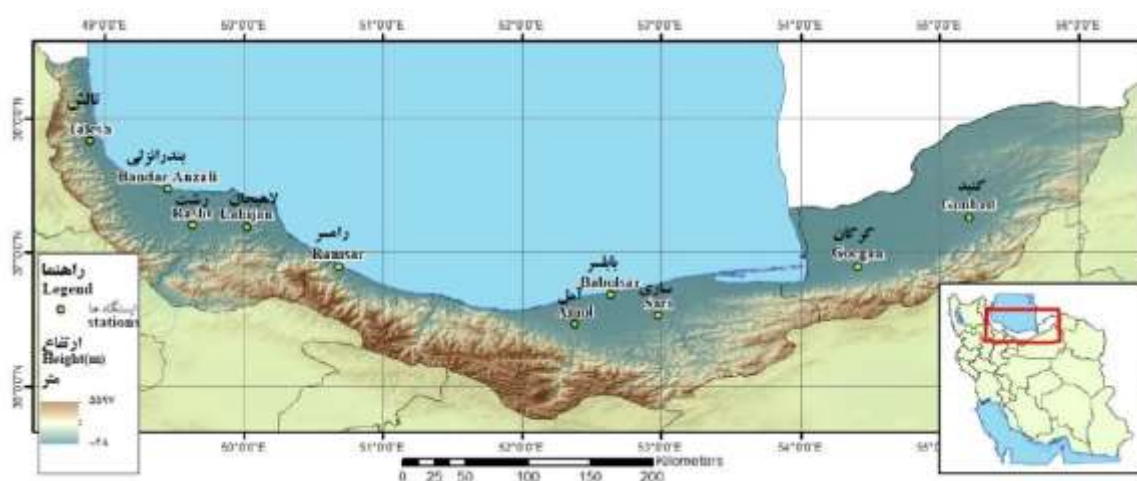
به دست آمده با مدل NETWAT متفاوت بوده و باید در پژوهش‌های مختلف، استفاده از روش ارائه شده در این تحقیق به منظور تخمین دقیق‌تر نیاز آبیاری گیاه (در سطوح احتمالاتی مختلف) به‌ویژه برای شرایط بحرانی (تبخیر و تعرق زیاد و بارندگی کم) و یا برای گیاهان حساس به تنش آبی (در سطح احتمال ۸۰ درصد و یا بالاتر) استفاده شود. در مطالعه توسط اسعدی اسکویی و همکاران (۲) اثر عمق آبگذاری بر تلفات تبخیر از سطوح شالیزار بررسی شده و مشخص گردیده است که عمق‌های مختلف غرقابی در سطح پنج درصد با یکدیگر تفاوت معنی‌دار دارند، به طوری که بیشترین و کمترین مقدار تبخیر به ترتیب مربوط به تیمار ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بوده و در همه تیمارها با گذشت زمان از ابتدای دوره، تبخیر در شالیزار کاهش می‌یابد.

تحلیل‌های احتمالاتی با احتمال وقوع متفاوت ضمن افزایش انعطاف‌پذیری در تصمیم‌گیری‌ها، می‌تواند ضریب اطمینان تصمیمات را نیز بالا ببرد. هدف از این پژوهش برآورد مقادیر تبخیر و تعرق گیاه برنج در تاریخ کشت‌های مختلف با احتمالات وقوع متفاوت به منظور برآورد نیاز آبی از مرحله اول رشد تا مرحله پایانی برنج بوده است تا بتوان از این طریق برنامه‌ریزی‌های مدیریتی بهینه و با کارایی بالاتر در شبکه آبیاری را مورد توصیه و استفاده قرار داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه خطه شمالی ایران را در برمی‌گیرد که شامل، استان‌های گیلان، مازندران و گلستان می‌باشد که مناطق اصلی برنجکاری در ایران محسوب می‌شوند. مساحت منطقه مورد مطالعه بالغ بر ۵۸۰۱۶۷ کیلومتر مربع است که در محدوده



شکل ۱- منطقه جغرافیایی استان‌های شمالی به همراه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Figure 1- Geographical location of the study area

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Table 1- Geographical location of meteorological stations in study

ردیف Row	ایستگاه Station	ارتفاع از سطح دریا Height	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude
1	بندر انزلی Bandar Anzali	-23.6	37.47°	49.45°
2	رشت Rasht	24.9	37.2°	49.63°
3	لاهیجان Lahijan	34.2	37.19°	50.02°
4	آمل Amol	23.7	36.47°	52.38°
5	بابلسر Babolsar	-21	36.69°	52.64°
6	گنبد Gonbad	1103.4	37.26°	55.21°
7	گرگان Gorgan	0	36.90°	54.41°
8	رامسر Ramsar	-20	36.90°	50.68°
9	ساری Sari	23	36.53°	52.98°
10	تالش Talesh	7	37.83°	48.89°

مازندران دارای کمترین مقدار تبخیر و تعرق در طول دوره رشد هستند و پس از آن در جهت غرب به شرق بر میزان تبخیر و تعرق افزوده می‌گردد. کمترین و بیشترین میزان تبخیر و تعرق محاسبه شده به ترتیب مربوط به وضعیت زودکاشت در سال‌های با تبخیر و تعرق کم (۷۵ درصد احتمال رخداد) به میزان ۳۸۳۹ میلی‌متر در تالش (جدول ۳) و وضعیت دیرکاشت در سال‌های بسیار تبخیر و تعرق (۱۰ درصد احتمال رخداد) و بالغ بر ۸۶۵۲ در گنبد کاووس است. در احتمالات وقوع مشابه در تمام مراحل رشد و در تمام ایستگاه‌ها میزان تبخیر و تعرق در زود کاشت کمتر از بهینه کاشت (میانگین ۳ درصد) و به مراتب کمتر از دیرکاشت (میانگین ۱۰ درصد) است. بنابراین به طور کلی اتخاذ زودکاشت موجب کاهش مصرف آب می‌گردد. به صورت میانگین مستقل از تاریخ کشت، در سال‌های بسیار پر تبخیر و تعرق حدود ۱۰ درصد نسبت به سال‌های متوسط افزایش می‌یابد که این که با توجه به میزان تبخیر و تعرق در مناطق شرقی سواحل دریای خزر می‌تواند به بیش از ۲۱۳۷ متر مکعب در هکتار برسد و بنابراین به نظر می‌رسد در صورت وجود پیش‌بینی‌های اقلیمی دال بر گرم بودن فصل برنجکاری بهتر است از کشت برنج در این مناطق اجتناب شود. با این حال، در صورت کاشت برنج در چنین شرایطی اتخاذ استراتژی زودکاشت در این مناطق می‌تواند تا ۸۰۰ متر مکعب در هکتار از نیاز آبیاری بکاهد.

که در آن‌ها ETo تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن ($mm.d^{-1}$)، Rn تابش خالص در سطح تبخیر و تعرق ($MJ.d^{-1}m^{-2}$)، G شار حرارتی خاک ($MJ.d^{-1}m^{-2}$)، T میانگین دمای هوا ($^{\circ}C$)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع، Δ شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت، (kPa) γ ثابت سایکرومتریک ($kPa\ ^{\circ}C^{-1}$)، U_2 باد در ارتفاع ۲ متری ($m.s^{-1}$)، ضریب تشت (بدون بعد) است.

داده‌های تبخیر و تعرق در دوره آماری ۳۰ ساله بدون توجه به سال وقوع به ترتیب صعودی ردیف گردید. سپس، احتمال وقوع در دوره‌های ۱۰ روزه به صورت میانگین بر اساس فرمول ویبول برآورد گردید:

$$P = \frac{m}{n+1} \quad \text{معادله (۲)}$$

در این معادله P ، احتمال وقوع، m شماره ردیف و n تعداد داده‌ها (ردیف) می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج نیاز آبی برآوردی محصول برنج استان‌های شمالی

در سطوح احتمالات و تاریخ‌های کشت متفاوت

در بررسی تبخیر و تعرق منطقه به طور کلی مناطق گیلان و غرب

جدول ۲- ضرایب گیاهی و طول دوره رشد گیاه برنج (رقم میان رس)

Table 2- Kc and growing season

ایستگاه Station	مرحله استقرار (ضریب گیاهی: ۰,۸۵) Initial stage Kc:0.85			مرحله توسعه گیاه (ضریب گیاهی: ۱,۱) Vegetative stage Kc: 1.1			مرحله میانی رشد (ضریب گیاهی: ۱,۳) Reproductive stage Kc: 1.3			مرحله پایانی رشد (ضریب گیاهی: ۱,۱) Ripening stage Kc: 1.1			کل فصل رشد (بدون انتساب دوره خزان) Whole growing season		
	زود کاشت Early cultiva ted	به‌موقع کشت On time cultiva ted	دیر کشت Late cultiva ted	زود کاشت Early cultiva ted	به‌موقع کشت On time cultivated	دیر کشت Late cultiva ted	زود کاشت Early cultiva ted	به‌موقع کشت On time cultivate d	دیر کشت Late cultiva ted	زود کاشت Early cultivat ed	به‌موقع کشت On time cultiva ted	دیر کشت Late cultiva ted	زود کاشت Early cultiva ted	به‌موقع کشت On time cultiva ted	دیر کشت Late cultiva ted
رشت Rasht	9	7	6	34	32	30	44	43	42	11	11	9	98	93	87
بندرآنزلی Bandar-Anzali	9	7	6	34	32	30	44	43	42	11	11	9	98	93	87
لاهیجان Lahijan	10	7	6	35	33	31	44	43	42	11	11	9	99	94	88
تالش Talesh	10	8	7	35	33	31	45	44	43	11	11	9	101	96	90
آمل Amol	9	7	6	32	30	28	44	43	42	10	10	8	95	90	84
بابلسر Babolsar	9	7	6	31	29	27	44	43	42	10	10	8	94	89	83
ساری Sari	9	7	6	32	30	28	44	43	42	10	10	8	95	90	84
گرگان Gorgan	9	7	6	35	33	31	45	44	43	10	10	8	99	94	88
گنبد کاووس Gonbad Kavous	9	7	6	35	33	31	44	43	42	10	10	8	98	93	87

(سال‌های متوسط متوسط، پر تبخیر و تعرق و بسیار پرتبخیر و تعرق) درصد دارای اختلاف قابل توجهی (بین ۳۰ تا ۴۰ درصد) است. لذا توصیه می‌گردد از این سطح احتمال در برآورد نیاز آبی گیاه، طراحی سامانه‌های آبرسانی و برنامه‌ریزی درازمدت خودداری گردد به عنوان مثال طراحی سیستم آبرسانی با این سطح احتمال موجب کاهش ظرفیت آبرسانی می‌شود.

نکته قابل توجه در استفاده از این اطلاعات این است که این مقادیر، مقادیر ناز خالص هستند و در هنگام استفاده از نیاز ناخالص باید توجه داشت که مواردی چون نفوذ عمقی و جانبی، و رواناب با طولانی شدن فصل کشت زیاد می‌شود و این مقدار اضافه ممکن است بیش از تفاوت تبخیر و تعرق باشد.

به دلیل تعدد ایستگاه‌ها و حجم جداول و نمودارها در ادامه سه ایستگاه رشت، آمل و گرگان به عنوان معرف مناطق عمده برنجکاری در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ایستگاه رشت

به‌طور کلی، در تاریخ‌های کشت مختلف برنج در ایستگاه رشت و در طول فصل اختلاف نسبتاً ثابتی در مقادیر تبخیر و تعرق دهه‌ای در سناریوهای متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق (در حدود ۵ میلی‌متر در هر دهه) مشاهده می‌شود. نتایج احتمالات وقوع تبخیر و تعرق گیاه برنج (ETc) در سه تاریخ کشت مختلف (زود کشت، به‌موقع و دیر کشت) نشان‌دهنده این است که در سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد (کم تبخیر و تعرق) نیاز آبی نسبت به احتمالات وقوع ۵۰، ۲۵ و ۱۰

جدول ۳- برآورد نیاز آبی گیاه برنج (رقم میان رس) کل فصل در تاریخ‌های کشت و احتمال وقوع متفاوت
Table 3- Estimation of water requirements of rice in different sowing date and probabilities

تاریخ کاشت Sowing date	سناریوهای تبخیر و تعرق ET scenarios	نیاز آبی کل فصل شهرستان (میلی‌متر) Water requirement in whole growing season (mm)								
		گنبد کاووس Gonbad Kavous	گرگان Gorgan	ساری Sari	بابلسر Babolsar	آمل Amol	لاهیجان Lahijan	رشت Rasht	بندر انزلی Bandar-Anzali	تالش Talesh
زودکشت (۲۰-۳۱ فروردین) Early cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	513.8	448.0	352.8	407.7	332.7	381.4	331.0	391.6	383.9
	متوسط Normal ET amount	624.3	583.7	493.0	496.9	458.6	449.3	464.1	484.9	434.3
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	691.4	675.8	551.7	536.8	519.0	499.7	515.3	533.1	476.7
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	784.9	788.4	602.2	577.8	572.4	574.4	564.4	590.7	555.5
به موقع کشت (۱۵-۲۵ اردیبهشت) On time cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	537.1	466.2	368.7	421.2	347.6	387.5	333.8	405.8	403.1
	متوسط Normal ET amount	641.4	598.8	506.9	510.2	470.3	458.2	472.9	502.9	454.6
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	705.0	692.0	560.5	548.3	529.6	510.9	524.8	550.0	496.9
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	795.7	796.9	605.4	585.8	578.9	587.2	568.6	605.5	572.7
دیر کشت (۱-۱۰ خرداد) Late cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	588.9	513.2	400.4	456.1	383.6	409.1	349.3	431.5	433.0
	متوسط Normal ET amount	698.6	655.0	548.2	558.8	514.0	492.5	505.3	549.6	494.7
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	768.8	758.4	609.2	600.7	580.1	549.8	568.0	602.3	541.7
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	865.2	868.7	662.3	644.5	635.8	639.7	619.0	664.3	627.8

تغییرپذیری نشان می‌دهد. این اختلاف در دوره پایانی برای تاریخ‌های زودکشت، موقع کشت و دیرکشت به ترتیب از ۳/۶ تا ۵/۹، ۲/۴ تا ۵/۱ و ۲/۰ تا ۴/۳ میلی‌متر می‌باشد و کاشت از زود به دیرکاشت باعث

در تاریخ کاشت به موقع، زودکاشت و دیرکشت نیاز آبی مرحله اولیه رشد به ترتیب از ۲/۵ تا ۴، ۱/۵ تا ۳/۵ و ۵/۵ تا ۵ میلی‌متر در روز در دوره از ۱۰ روزه در سال‌های متوسط تا بسیار پرتبخیر و تعرق

می‌گردد. با این وجود، و در مقیاس کل فصل دیرکاشت (۵۱۴۰ متر مکعب در هکتار)، به موقع کاشت (۴۷۰۲ متر مربع در هکتار) و زود کاشت (۴۵۸۵ متر مکعب در هکتار) به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین میزان میانگین تبخیر و تعرق هستند. در تاریخ کاشت‌های مختلف اختلاف مقادیر حداکثر میانگین نیاز آبی روزانه در دوره ۱۰ روزه در سال‌های متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق تقریباً یکسان و در حدود یک میلی‌متر است. به عبارت دیگر در شرایط به موقع کاشت، سال‌های پرتبخیر نیاز آبی شالیزار (۵۲۹٫۶ میلی‌متر) به میزان ۵۹۳ متر مکعب در هکتار بیش از سال‌های متوسط (۴۷۰٫۲ میلی‌متر) می‌باشد. این اختلاف در سال‌های بسیار پر تبخیر و تعرق (۵۷۸٫۹ میلی‌متر) و سال‌های متوسط به ۱۰۸۶ متر مکعب در هکتار نیز می‌رسد.

در مقایسه تاریخ‌های مختلف کاشت بیشترین اختلاف بین سال‌های متوسط و سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در وضعیت دیرکاشت (۱۲۱۷ متر مکعب در هکتار) رخ داده است که نشان دهند این واقعیت است که در سال‌های پرتبخیر و تعرق اتخاذ تاریخ دیرکاشت موجب افزایش قابل توجه در مصرف آب خواهد شد. اتخاذ استراتژی زودکاشت در سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق کاهش ۱۰ درصدی (۶۳۴ متر مکعب در هکتار) را در پی خواهد داشت (جدول ۴).

ایستگاه گرگان

در ایستگاه گرگان به عنوان معرف مناطق عمده برنجکاری در استان گلستان و بخش‌های شرقی استان مازندران، نیز در تاریخ‌های کشت مختلف برنج و در طول فصل مقادیر تبخیر و تعرق دهه‌ای در سناریوهای متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق اختلاف نسبتاً ثابت اما در حدود ۲۰ میلی‌متر در هر دهه دارند. نیاز آبی مرحله اولیه رشد در زودکشت، به موقع و دیرکشت از میانگین ۲/۲ تا ۴/۹، ۳/۴ تا ۶ و ۴/۵ تا ۷/۴ میلی‌متر در روز، در دوره ۱۰ روزه در سال‌های متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق تغییرپذیری نشان می‌دهد که در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بیش از مقادیر مناطق مرکزی و غربی سواحل دریای خزر است و با توجه به اینکه عمده سهم تبخیر و تعرق در این دوره به تبخیر اختصاص دارد نشان‌دهنده حجم بالای تبخیر و تعرق در این مرحله است. این مقادیر در دوره پایانی ۴/۸ تا ۸/۱ میلی‌متر برای زود کشت، ۴/۴ تا ۷/۴ میلی‌متر برای به موقع کشت و ۳/۹ تا ۶/۴ میلی‌متر برای دیر کشت می‌باشد و کاشت از زود به دیرکاشت باعث افزایش مصرف در دوره ابتدایی و کاهش مصرف در دوره انتهایی می‌گردد. در مقیاس کل فصل در سال‌های متوسط، دیرکاشت (۶۵۴۰ متر مکعب در هکتار)، به موقع کاشت (۵۹۸۷ متر مربع در هکتار) و زود کاشت (۵۸۳۰ متر مکعب در هکتار) به ترتیب دارای بیشترین تا کمترین میزان میانگین تبخیر و تعرق هستند که بطور متوسط ۲۰ درصد از عمده نواحی گیلان و مازندران است. در شرایط به موقع کاشت، سال-

افزایش مصرف در دوره ابتدایی و کاهش مصرف در دوره انتهایی می‌گردد. در دو وضعیت دیرکشت و زودکشت، اختلاف یکسانی در سطوح احتمالات در مرحله اولیه رشد مشاهده می‌گردد. با این وجود، میزان میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه در دوره ۱۰ روزه در تاریخ دیرکشت دارای مقادیر متناظر بالاتری نسبت به تاریخ زودکشت است، ولی برخلاف این دو تاریخ کاشت در کشت به موقع میزان اختلاف ناچیز ۰/۲ میلی‌متر در روز در دوره ۱۰ روزه در سال‌های متوسط و پرتبخیر و تعرق در مرحله اولیه رشد مشاهده می‌گردد. مقادیر حداکثر میانگین نیاز آبی روزانه در دوره ۱۰ روزه در تاریخ‌های کشت مختلف در سال‌های متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق تقریباً یکسان و حدود یک میلی‌متر است. به عبارت دیگر در شرایط به موقع کاشت، سال‌های پرتبخیر نیاز آبی شالیزار (۵۲۴٫۸ میلی‌متر) به میزان ۵۱۹ متر مکعب در هکتار بیش از سال‌های متوسط می‌باشد. این اختلاف برای سال‌های بسیار پر تبخیر و تعرق (۵۶۸٫۲ میلی‌متر) و سال‌های متوسط به ۹۵۷ متر مکعب در هکتار می‌رسد. در مقایسه تاریخ‌های مختلف کاشت کمترین اختلاف بین سال‌های متوسط و سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در وضعیت زودکاشت (۱۰۰۳ متر مکعب در هکتار) و بیشترین اختلاف در وضعیت دیرکاشت (۱۱۳۷ متر مکعب در هکتار) مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، اتخاذ استراتژی زودکاشت در سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق موجب کاهش ۵۴۵ متر مکعبی در هکتار می‌شود (جدول ۴، شکل ۲).

ایستگاه آمل

در ایستگاه آمل به عنوان معرف مناطق عمده برنجکاری در غرب و مرکز مازندران، به طور کلی، در تاریخ‌های کشت مختلف برنج و در طول فصل اختلاف نسبتاً ثابتی در مقادیر تبخیر و تعرق دهه‌ای در سناریوهای متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق (در حدود ۱۳ تا ۱۰ میلی‌متر در هر دهه) مشاهده می‌شود. نتایج احتمالات وقوع تبخیر و تعرق گیاه برنج (ETc) در سه تاریخ کشت مختلف نشان‌دهنده این است که در سطح احتمال وقوع ۷۵ درصد (کم تبخیر و تعرق) نیاز آبی نسبت به احتمالات وقوع ۵۰، ۲۵ و ۱۰ (سال‌های متوسط، پر تبخیر و تعرق و بسیار پرتبخیر و تعرق) درصد دارای اختلاف ۴۰ درصدی است. نیاز آبی مرحله اولیه رشد در زودکشت از میانگین ۱/۹ تا ۳/۸ میلی‌متر در روز، تاریخ کاشت به موقع از ۲/۵ تا ۴/۲ میلی‌متر در روز، و تاریخ دیرکشت از میانگین ۳/۴ تا ۵/۱ میلی‌متر در روز، در دوره ۱۰ روزه در سال‌های متوسط تا بسیار پر تبخیر و تعرق تغییرپذیری نشان می‌دهد. این اختلاف در دوره پایانی ۳/۶ تا ۶/۱ میلی‌متر برای زود کشت و ۳/۱ تا ۵/۴ میلی‌متر برای به موقع کشت و ۲/۷ تا ۴/۶ میلی‌متر برای دیر کشت می‌باشد و کاشت از زود به دیرکاشت باعث افزایش مصرف در دوره ابتدایی و کاهش مصرف در دوره انتهایی

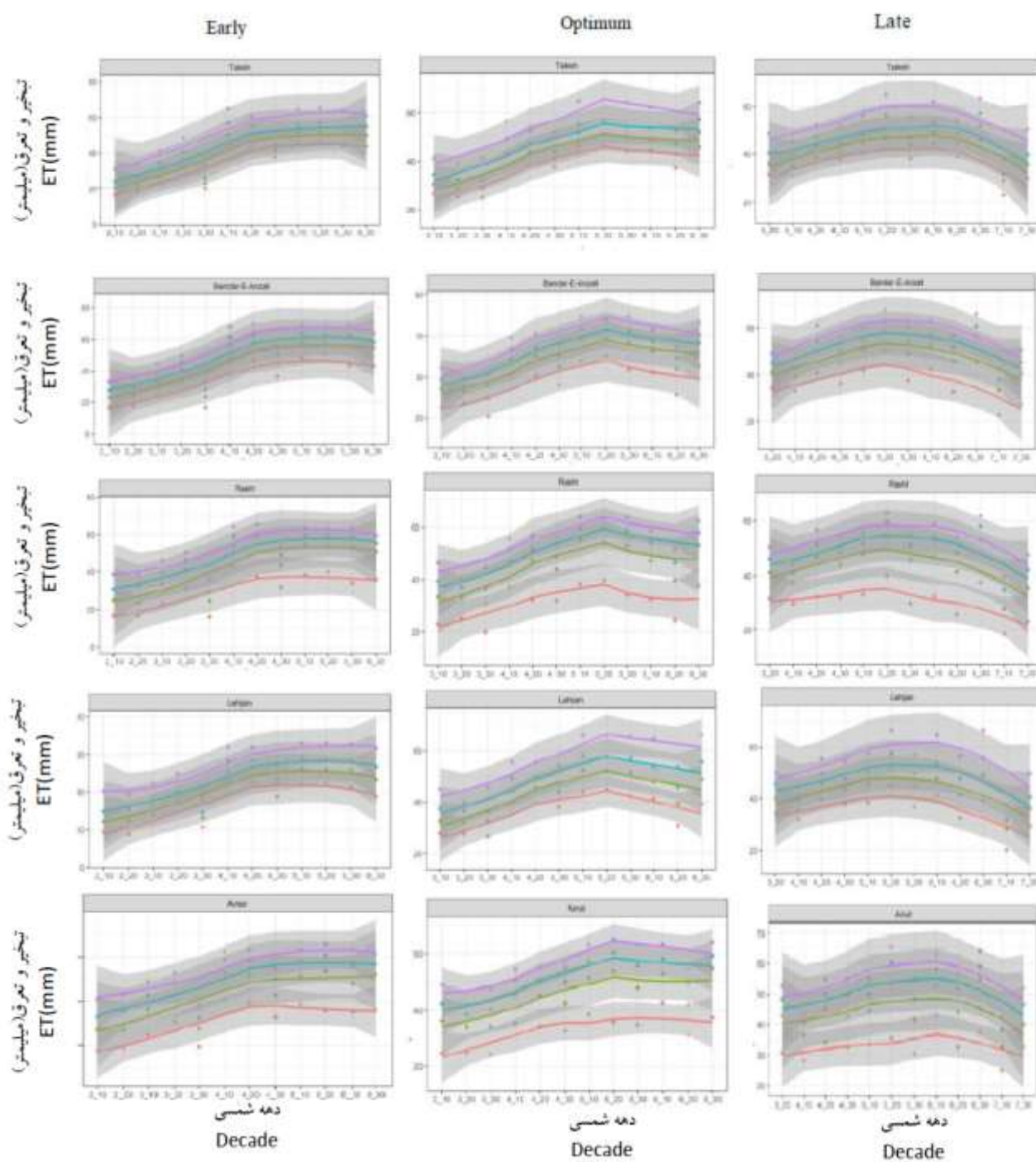
سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در وضعیت دیرکاشت (۲۱۳۷ متر مکعب در هکتار) و نشان می‌دهد که در سال‌های پرتبخیر و تعرق اتخاذ دیر کاشت موجب افزایش قابل توجه در مصرف آب شود (جدول ۴).

های پرتبخیر نیاز آبی شالیزار (۶۹۲ میلی‌متر) به میزان ۹۳۲ متر مکعب در هکتار بیش از سال‌های متوسط (۵۹۸،۷ میلی‌متر) می‌باشد. این اختلاف برای سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق (۷۹۶،۹ میلی‌متر) و سال‌های متوسط به ۱۹۸۱ متر مکعب در هکتار می‌رسد. در مقایسه تاریخ‌های مختلف کاشت بیشترین اختلاف بین سال‌های متوسط و

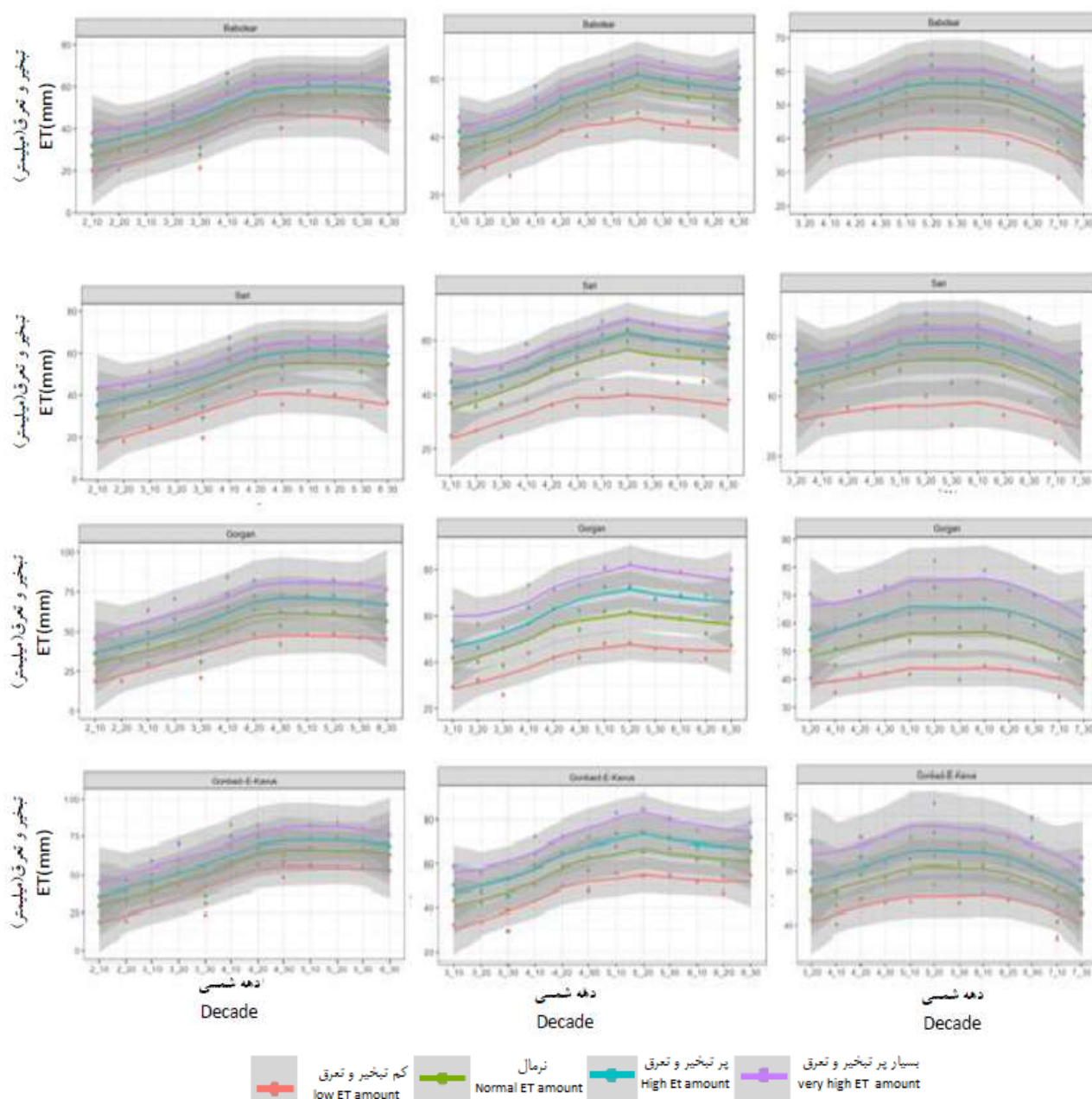
جدول ۴- برآورد نیاز آبی گیاه برنج طی فصل رشد در تاریخ‌های کشت و احتمال وقوع متفاوت در رشت، آمل و گرگان

Table 4- Estimation of water requirements of rice in different sowing date and probabilities in Rasht, Amol and Gorgan

نیاز آبی طی فصل رشد (میلی‌متر) Water requirement in different sowing date (mm)																
تاریخ کاشت Sowing date	سناریوهای تبخیر و تعرق ET scenarios	گرگان Gorgan					آمل Amol					رشت Rasht				
		پایانی Ripping stage	میانی Reproductive stage	توسعه Vegetative stage	اولیه Initial stage	کل فصل Whole growing season	پایانی Ripping stage	میانی Reproductive stage	توسعه Vegetative stage	اولیه Initial stage	کل فصل Whole growing season	پایانی Ripping stage	میانی Reproductive stage	توسعه Vegetative stage	اولیه Initial stage	کل فصل Whole growing season
زودکشت Early cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	48.3	257.7	119.7	22.2	448.0	35.8	189.2	88.2	19.4	332.7	36.0	192.2	87.0	15.9	331.0
	متوسط متوسط Normal ET amount	60.6	333.6	156.5	33.0	583.7	52.2	257.4	121.6	27.4	458.6	50.7	270.1	118.8	24.5	464.1
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	71.6	383.3	181.6	39.2	675.8	56.6	289.5	140.6	32.4	519.0	55.4	295.7	134.8	29.4	515.3
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	81.9	438.0	221.7	46.8	788.4	61.2	316.8	156.3	38.1	572.4	59.2	319.0	150.7	35.5	564.4
به موقع کشت On time cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	44.4	250.4	136.8	34.6	466.2	31.2	189.5	102.3	24.7	347.6	24.5	182.4	101.5	25.4	333.8
	متوسط متوسط Normal ET amount	56.0	322.0	177.7	43.1	598.8	42.3	260.1	133.7	34.2	470.3	39.7	262.0	138.2	33.0	472.9
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	64.4	375.9	202.2	49.5	692.0	49.5	290.6	151.0	38.5	529.6	46.5	289.5	151.8	37.0	524.8
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	73.5	430.0	233.0	60.4	796.9	54.4	318.7	163.8	42.1	578.9	51.6	310.5	166.2	40.3	568.6
دیر کشت Late cultivated	کم تبخیر و تعرق Low ET amount	39.3	270.5	158.6	44.8	513.2	27.3	205.0	117.7	33.5	383.6	20.1	179.6	114.3	35.3	349.3
	متوسط متوسط Normal ET amount	47.2	343.6	206.9	57.3	655.0	35.5	277.3	157.7	43.5	514.0	30.2	261.0	169.6	44.5	505.3
	پر تبخیر و تعرق High Et amount	55.4	401.4	237.1	64.6	758.4	41.9	311.8	178.3	48.1	580.1	37.9	296.5	184.9	48.8	568.0
	بسیار پر تبخیر و تعرق Very high ET amount	64.9	458.3	271.1	74.4	868.7	46.2	340.6	197.5	51.5	635.8	43.3	322.5	200.5	52.7	619.0



کم تبخیر و تعرق low ET amount Normal ET amount High Et amount بسیار پر تبخیر و تعرق very high ET amount



شکل ۲- مقادیر تبخیر و تعرق واقعی ۱۰ روزه گیاه برنج در سطوح احتمالات مختلف در سه تاریخ کشت متفاوت (استان‌های شمالی کشور)
Figure 2- Estimation of evapotranspiration of rice in different sowing date and probabilities in North of Iran

بحث و نتیجه‌گیری

تبخیر و تعرق و بسیار پر تبخیر و تعرق به دست آید. نتایج احتمالات وقوع تبخیر و تعرق واقعی گیاه برنج (ETC) در سه تاریخ کشت مختلف (زود کشت، به موقع کشت و دیر کشت) نشان‌دهنده این است که در مناطق عمده شالیکاری و در سال‌های کم تبخیر و تعرق نیاز آبی نسبت به سال‌های متوسط، پر تبخیر و تعرق و بسیار پر تبخیر و تعرق

در این پژوهش برآورد مقادیر تبخیر و تعرق گیاه برنج در تاریخ کشت‌های مختلف با احتمالات وقوع متفاوت جهت برآورد نیاز آبی از مرحله اول رشد تا مرحله پایانی برنج انجام گردید تا تخمینی از تغییرات تبخیر و تعرق در شرایط مختلف کم تبخیر و تعرق، متوسط، پر

بیشترین اختلاف بین سال‌های متوسط و سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در وضعیت دیرکاشت (۲۱۳۷ مترمکعب در هکتار) و نشان می‌دهد که در سال‌های پرتبخیر و تعرق اتخاذ دیر کاشت موجب افزایش قابل توجه در مصرف آب شود. بنابراین در تحلیل نیاز خالص، به نظر می‌رسد در صورت وجود پیش‌بینی‌های اقلیمی دال بر گرم بودن فصل برنجکاری بهتر است از کشت برنج در این مناطق اجتناب شود. با این حال در صورت کاشت برنج در چنین شرایطی اتخاذ استراتژی زود کاشت در این مناطق می‌تواند تا ۸۰۰ متر مکعب در هکتار از نیاز خالص آبیاری بکاهد اگرچه چنانچه نیاز ناخالص مد نظر باشد می‌بایست تأثیر تاریخ کاشت و طول دوره رشد علاوه بر تبخیر-تعرق بر سایر پارامترهای بیلان آب نیز مد نظر قرار گیرد. نتایج به دست آمده در این پژوهش دارای رونندی همسو با سایر مطالعات می‌باشد (۴، ۱۵ و ۱۰). نتایج مطالعه و بررسی‌های انجام شده، لزوم و اهمیت بررسی و برآورد مقادیر تبخیر و تعرق گیاه برنج را بر اساس احتمالات وقوع متفاوت به منظور برآورد نیاز آبی در مراحل مختلف رشد، در راستای برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر، مدیریت بهینه مزرعه در سال‌های گرم و خشک (با پتانسیل تبخیر و تعرقی حداکثر) را نمایان می‌سازد، این امر در برآورد نیاز آبی در دوره‌های فنولوژیکی حساس از اهمیت دوچندانی برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌گردد در سطوح گسترده‌تر و مناطق بیشتر کاشت برای این محصول اجرا و همچنین با توجه به واقع شدن ایران در منطقه خشک و نیمه خشک و اهمیت برآورد نیاز آبی و بهره‌وری بیشتر از منابع آبی برای محصولات استراتژیک هر منطقه انجام گردد.

دارای اختلاف قابل توجهی است. این اختلافات از شرق به غرب کاهش می‌یابد و در استان گلستان با اختلاف تقریبی ۳۰ درصد بیش از سایر مناطق به حداکثر می‌رسد. در ایستگاه رشت به عنوان ایستگاه معرف جلگه مرکزی گیلان (عمده مناطق شالیکاری در استان)، در شرایط به موقع کاشت، سال‌های پرتبخیر نیاز آبی شالیزار به میزان ۵۱۹ متر مکعب در هکتار بیش از سال‌های متوسط می‌باشد. این اختلاف برای سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق و سال‌های متوسط به ۹۵۷ متر مکعب در هکتار می‌رسد. در مقایسه تاریخ‌های مختلف کاشت کمترین اختلاف بین سال‌های متوسط و سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در وضعیت زودکاشت (۱۰۰۳ متر مکعب در هکتار) و بیشترین اختلاف در وضعیت دیرکاشت (۱۱۳۷ متر مکعب در هکتار) مشاهده می‌شود به عبارت دیگر اتخاذ استراتژی زودکاشت در سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق موجب کاهش در حدود ۵۴۵ متر مکعب در هکتار می‌شود.

بطور کلی، در تاریخ‌های کشت مختلف برنج در مناطق عمده برنجکاری منطقه در سال‌های متوسط تا بسیار پرتبخیر و تعرق از ابتدا دوره رشد تا مرحله پایانی اختلاف نسبتاً ثابتی که بنا بر منطقه در حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر در روز برای کل فصل مشاهده می‌شود. وضعیت زود کاشت در عمده مناطق غربی و مرکزی سواحل باعث کاهش ۱۰ درصدی مصرف آب نسبت به وضعیت دیرکاشت می‌شود. در مقیاس کل فصل در گرگان، تبخیر و تعرق در تاریخ‌های مختلف کشت بطور متوسط ۲۰ درصد (۱۳۰۰ متر مکعب) بیشتر از عمده نواحی گیلان و مازندران است. در شرایط به موقع کاشت، نیاز خالص آبیاری سال‌های بسیار پرتبخیر و تعرق در حدود ۲۰۰۰ متر مکعب در هکتار بیش از سال‌های متوسط است. در مقایسه تاریخ‌های مختلف کاشت در گرگان

منابع

- 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. Fao, Rome, 300(9), p.D05109.
- AsadiOskouei E., Yazdani M.R., and Alizadeh A. 2017. The effect of submergence depth on evaporation losses in paddy fields. Journal of Water and Soil Conservation 24(1): 221-235. (In Persian with English abstract)
- Asadi Oskouei E., Mousavi Baygi M., Yazdany M.R., Alizadeh A., and Zohd Ghodsi M.J. 2017. The effect of submergence depth on water and soil temperature in paddy field (Case study: Rasht). Journal of Agricultural Meteorology 5(1): 48-56. (In Persian with English abstract)
- Heydari M., Marofi M., Sabziparvar A.A., Mirmasoudi S.S., and Ghiyami F. 2009. Investigation of impact of plant water requirement calculation method, length of maximum water requirement period and probability level on optimal estimation of crop water requirement (Case Study: Hamedan), Water and Soil Conservation 16(3): 123-140. (In Persian with English abstract)
- Jensen M.E., Burman R.D., and Allen R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE.
- Jensen M.E. 1983. Design and Operation of Farm Irrigation System. The American Society of Agricultural Engineering, USA. 2950 Niles Road St. Joseph Michigan 1-11.
- Kar G., and Verma H.N. 2005. Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. Agricultural Water Management 72(1): 15-32 .
- Mehdizadeh S., Behmanesh J., and Nikbakht J. 2011. Estimation of Reference Evapotranspiration with Various Occurrence Probability Levels (Case Study: Urmia), Water and Soil Scienc 20(4): 171-183. (In Persian with English abstract)

9. Mohammad F.S. 1998. Calibration and use of evapotranspiration equations under arid climatic conditions. *Agricultural Engineering Journal* 7(3&4): 185-200.
10. Nikbakht J., Mohammadi K., and Ehteshami M. 2007. Estimation of actual evapotranspiration of the plant at different probability levels: A case study in Maragheh, East Azerbaijan. *Agricultural Sciences* 13(1): 95-106. (In Persian with English abstract)
11. Nikbakht J., and MirLatifi M. 2002. The effect of ETo calculation method, probability of occurrence and duration of maximum water consumption on evapotranspiration of reference plant potential. *Soil and Water Science* 16(2): 223-231. (In Persian with English abstract)
12. Nixon P.R., Lawless G.P., and Richardson G.V. 1972. Coastal California evapotranspiration frequencies. *Journal of the Irrigation and Drainage Division* 98(2): 185-191.
13. Razavipour T., and Yazdani M. 2000. Determination of Evapotranspiration, plant coefficient, and Pan coefficient of rice, Binam and Caspian cultivars using lysimeter and controlled plots in Rasht region. *Journal of Agroecology* 6(2): 238-249. (In Persian with English abstract)
14. Pruitt W.O., von Oettingen S., and Morgan D.L. 1972. Central California evapotranspiration frequencies. *Journal of the irrigation and drainage Division* 98(2): 177-184.
15. Sharifi Bonab S.S., Nazemi A.H., Ashraf Sadraddini A., Fakheri Fard A., and Salmasi F. 2016. Estimation of Irrigation Water Requirement using Probability Distribution Functions (PDF) Case study: (*Triticum aestivum* L.), *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 9(5): 720-730. (In Persian with English abstract)
16. Sharifan H., and Alizadeh A. 2008. Investigating the trend of changes in the frequency curves of evapotranspiration, *Journal of Water and Soil* 22(1): 7-20. (In Persian with English abstract)
17. Wright J.L., and Jensen M.E. 1972. Peak water requirements in Southern Idaho. *Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division* 98(2): 193-201.
18. Yoo S.H., Choi J.Y., and Jang M.W. 2008. Estimation of design water requirement using FAO Penman-Monteith and optimal probability distribution function in South Korea. *Agricultural Water Management* 95(7): 845-853.



The Effect of Different Probability Levels in Estimating the Net Water Requirement of Rice in the Northern Provinces of Iran

E. Asadi Oskoue¹ * - S. Kouzegaran² - M.R. Yazdani³ - A. Rahmani⁴

Received: 24-07-2021

Accepted: 22-10-2021

Introduction: Correct assessment of evapotranspiration fluctuations in different meteorological scenarios plays an important role in the optimal management of water resources. Probability analyzes with different probabilities of occurrence can increase flexibility in decision making and increase the reliability of decisions. Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important agricultural products in the world. Although rice is cultivated in a wide range of climatic and geographical conditions, it is vulnerable to changes in environmental conditions. Planting management, design of irrigation systems, and suitable irrigation cycle for optimal production are important issues for sustainable production.

Materials and Methods: The study area includes the northern region of Iran, i.e. the provinces of Gilan, Mazandaran and Golestan, which is the main rice-growing area in Iran. Changes in rice evapotranspiration in three different cultivation dates with four different occurrence probabilities of 75, 50, 25 and 10%, was calculated using the FAO Penman-Monteith equation and meteorological data with a statistical period of 30 years (2020- 1990). Also, the average rice crop coefficient at different stages of growth in 10-day periods was estimated based on the Weibull model. These probabilities represent the probable limits of the expected values of evapotranspiration in different scenarios of low, normal, high, and very high evapotranspiration years.

Results and Discussion: The results showed a relatively constant difference of 1 to 2 mm between different rice cultivation histories in the major rice cultivation areas of Gilan and Mazandaran in normal to very high evapotranspiration years. In the years of low evapotranspiration, the water requirement was significantly different from the normal, high and very high evapotranspiration years, which decreased from east to west. This difference was approximately 30% higher in Golestan province as compared with other areas. In the early planting situation relative to the late planting situation in the major western and central coastal areas, there was a 10% decrease in water consumption. At the scale of the whole growing season in Gorgan, evapotranspiration in different conditions of planting date was on average 20% (1300 cubic meters) more than the main regions of Gilan and Mazandaran. In case of timely planting, the net irrigation requirement in very high evapotranspiration years was about 2000 cubic meters per hectare more than the normal years. In years with high evapotranspiration, late planting increased the net irrigation requirement by more than 210 mm compared to different planting dates in Gorgan. According to the obtained results, the largest difference between evapotranspiration values during normal and very high evapotranspiration years was in the late planting situation. Therefore, it seems that late planting causes a significant increase in water consumption in the high evapotranspiration years. Consequently, it is better to avoid rice cultivation when the rice growing season is anticipated to be warm.

Conclusion: Evapotranspiration, as one of the main components of the hydrological cycle, had a significant role in proper irrigation planning and water resources management. The results underline the importance of estimating the rice evapotranspiration to avoid appreciable yield loss under extreme conditions.

Keywords: Evapotranspiration, Probabilistic analysis, Rice plant, Water requirement

1- Assistant Professor, Climatological Research Institut, ASMERC, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: e.asadi.o@gmail.com)

2- Ph.D. in Agrometeorology, Applied Meteorological Research Center, Mashhad, Iran

3- Assistant Professor, Rice Research Institute of Iran, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Rasht, Iran

4- Ph.D. Student of Soil Science, University of Tehran, Tehran, Iran

DOI: 10.22067/JSW.2021.71370.1064



مقاله پژوهشی

بررسی نقش فیلترهای ترکیبی شن-ژئوتکستایل-ژئولیت بر برخی ویژگی‌های پساب

حمید شیروانی ایچی^۱ - مهدی قبادی نیا^۲ - نگار نورمهنداد^{۳*} - سید حسن طباطبائی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

چکیده

امروزه کاربرد پساب در آبیاری و به‌ویژه سیستم‌های آبیاری قطره‌ای افزایش یافته است. در این پژوهش به منظور بررسی کارایی فیلترهای ترکیبی بر ویژگی‌های پساب و استفاده از آن‌ها در فیلتراسیون، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای پژوهش شامل فیلتر شنی یا تیمار شاهد (CTRL)، فیلتر ژئوتکستایل (G)، فیلتر شن-ژئولیت (SZ) و فیلتر ژئوتکستایل-ژئولیت (GZ) بود. پساب مورد استفاده در این پژوهش از فاضلاب دانشگاه تأمین شد. فشار، دبی سیستم، میزان نیترات، مواد معلق، سدیم، کلسیم، منیزیم، هدایت الکتریکی، پ-هاش پساب قبل و بعد از ورود به فیلترها در ساعات مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد، فیلتر شن-ژئولیت افت فشار اندک و تیمار ژئوتکستایل-ژئولیت نیز برای مدت زمان کوتاه قابلیت تأمین فشار را داشت. مقدار نیترات در پساب خروجی در همه فیلترها به‌جز شاهد به طور معنی‌داری کاهش یافت به‌طوری‌که مقدار نیترات ورودی تمامی تیمارها ۲۶ میلی‌گرم بر لیتر و میانگین نیترات خروجی در فیلتر شاهد حدود ۲۵ و در سایر فیلترها کمتر از ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر بود. مقدار میانگین مواد معلق فاضلاب ورودی حدود ۱۱۰ میلی‌گرم بر لیتر بود درحالی‌که مقدار میانگین مواد معلق پساب خروجی از فیلترها همگی به کمتر از ۷۲ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت. فیلترهای شن و شن-ژئولیت به ترتیب بیش‌تر از فیلترهای ژئوتکستایل و ژئوتکستایل-ژئولیت میزان مجموع کلسیم و منیزیم را در پساب افزایش دادند. بر اساس این پژوهش استفاده از شن-ژئولیت به لحاظ کاهش نیترات و بار معلق، افزایش کلسیم و منیزیم و کاهش pH و عدم افت فشار پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: پساب ورودی، گرفتگی، مواد معلق، نیترات

مقدمه

آبیاری قطره‌ای مدت‌هاست در خاورمیانه استفاده می‌شود و نه تنها در مورد کارایی آبیاری و کنترل شوری، بلکه از نظر کاهش خطرات اپیدمی مربوط به استفاده مجدد از پساب، مفید است. با این حال، برای جلوگیری از مسدود شدن قطره‌چکان، بهبود کیفیت پساب از نظر مواد جامد معلق ضروری است (۱۳). روش آبیاری قطره‌ای تنها روشی است که مشکلات خاص ناشی از کاربرد پساب را رفع می‌نماید (۱۶). همچنین کاربرد فیلتراسیون در آبیاری قطره‌ای باعث کاهش شاخص‌های آلودگی می‌شود. نتایج مطالعات به این نکته اشاره دارد

که کاربرد روش‌های قطره‌ای در کنترل آلودگی‌های زیست‌محیطی در مقایسه با روش آبیاری سطحی بسیار موثر است علت این امر این است که در این روش‌ها خاک همچون فیلتر عمل می‌کند و آلودگی بیولوژیکی کمتری وارد محیط خاک سطحی شده و در نتیجه نگرانی‌های ناشی از تماس مستقیم کارگران با خاک سطحی کاهش می‌یابد (۱۹). اما کاربرد بدون برنامه‌ریزی پساب می‌تواند تبعات زیست محیطی بسیار نامطلوبی را به‌وجود آورد. بنابراین پایش و تصفیه مواد مضر از فاضلاب‌ها قبل از استفاده به منظور آبیاری امری ضروری است تا از این طریق بتوان حفاظت از محیط زیست و بهداشت عمومی را ضمانت کرد. برای به حداقل رساندن اثرات منفی آبیاری با فاضلاب اقدامات احتیاطی، دستورالعمل‌های سختگیرانه و سیستم مناسب بازیافت فاضلاب مورد نیاز است (۲۰).

در حال حاضر اعتقاد بر این است که فرایند جذب روش ساده و موثری در تصفیه به شمار می‌رود. از جمله جاذب‌ها می‌توان کربن فعال، مواد معدنی، خاک رس و ژئولیت‌ها را نام برد. استفاده از ژئولیت‌های طبیعی و مصنوعی در فرایند تصفیه فاضلاب‌ها به عنوان

۱ و ۲ - به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، استادیار و دانشیار گروه

مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد، ایران

۳ - استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، ایران

* - نویسنده مسئول: (Email: negar_nourmahnad@yahoo.com)

DOI: 10.22067/JSW.2021.72031.1082

سطح جهان قرار گرفته است. کوتای و آیدلک (۹) در پژوهشی ژئوتکستایل یک لایه‌ای و دو لایه‌ای را به منظور فیلتراسیون به کار بردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از پوشش ژئوتکستایل دو لایه‌ای به طور معنی‌داری نسبت به پوشش تک لایه‌ای ظرفیت فیلتراسیون را افزایش می‌دهد. نجفی و طباطبائی (۱۵) کاربرد محفظه‌هایی از شن و ژئوتکستایل را در سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در کنترل گرفتگی قطره‌چکان‌ها پیشنهاد دادند و بیان کردند پوشش شن در اطراف قطره‌چکان‌های ناحیه‌ی ریشه و کاربرد طولانی مدت این سیستم برای گیاهان فصلی با ریشه‌های سطحی مناسب است. این فیلتر قابلیت هدایت الکتریکی را بهبود بخشیده و همچنین با تاثیر بر پارامترهای آلوده کننده خطرات زیست محیطی را کاهش می‌دهد.

با توجه به اینکه دانشگاه‌ها اغلب دارای حجم مناسبی از پساب خانگی است، هدف از این پژوهش بررسی کاهش بار آلودگی پساب جهت استفاده در سامانه آبیاری قطره‌ای در گذر از ترکیب فیلترهای مختلف شامل شنی، ژئوتکستایل و ژئولیت است.

مواد و روش‌ها

با توجه به کمبود آب، در مراکز دانشگاهی که دارای حجم مناسبی از پساب می‌باشند استفاده از پساب برای آبیاری فضاهای سبز می‌تواند یک جایگزین مناسب باشد. به دلیل نبود سیستم‌های تصفیه فاضلاب، تنها امکان یک تصفیه اولیه که جداسازی مواد معلق درشت است امکان‌پذیر می‌باشد. این پژوهش به منظور بررسی تغییرات ویژگی‌های مهم شیمیایی موجود در فاضلاب شهری دانشگاه پس از عبور از فیلترهای شنی، ژئوتکستایل و ژئولیت، در سیستم فیلتراسیون آبیاری قطره‌ای انجام شد. پژوهش حاضر در سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ در دانشگاه شهرکرد انجام شد. شهرکرد در طول جغرافیایی 51° و 50° عرض جغرافیایی 17° و 33° قرار دارد. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۲۰۴۹ متر می‌باشد. میانگین سالانه‌ی دمای هوا در شهرکرد ۱۱/۵ درجه سلسیوس می‌باشد و بارش سالیانه آن ۳۳۰ میلی‌متر است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۴). فاضلاب مورد استفاده در این طرح از منهول فاضلاب واقع در دانشگاه شهرکرد، به درون سیستم فیلتراسیون آماده شده شامل تیمارهای آزمایش پمپاژ می‌شد. میانگین مقادیر برخی پارامترهای فاضلاب ورودی به تیمارها، در جدول ۱ آورده شده است. پساب کاربردی بر اساس استاندارد محیط زیست ایران از نظر نیترات مشکلی نداشت. همچنین میزان $EC (dS/m)$ بود که طبق استاندارد فائو و باکس و ناکایاما (۳) برای استفاده از پساب در آبیاری قطره‌ای در شرایط کیفیت پساب متوسط، مجاز بود.

یک روش جایگزین معتبر در حال بررسی می‌باشد. به دلیل خواص منحصر به فرد ژئولیت از جمله گنجایش تبادل کاتیونی بالا، در دسترس بودن و هزینه‌های نسبتاً کم، به‌طور گسترده‌ای به عنوان جاذب در فرایندهای جداسازی و خالص سازی در دهه‌های گذشته استفاده شده است (۸، ۱۷ و ۲۲).

ژئولیت نوعی آلومینیوم کریستالی حاوی سیلیکات است که با تخصیص اتم‌های اکسیژن در چارچوب ساختار چهار ضلعی آلومینیومی و سیلیکات ساخته شده و در نتیجه یک ساختار چارچوبی باز از واحدهای سه بعدی- چهار بعدی ایجاد می‌کند (۱۰). یکی از خواص مهم ژئولیت‌ها پدیده تبادل یونی است که بدون تغییر ساختاری میسر می‌شود، زیرا اسکلت ساختاری ژئولیت‌ها شامل کانال‌ها و حفره‌هایی است که کاتیون‌ها و مولکول‌های آب در آن‌ها جای می‌گیرند و تحرک این کاتیون‌ها هیچ‌گونه تغییری را در شبکه ساختاری به وجود نمی‌آورد. باتوجه به فراوانی این کانی در ایران، قیمت بسیار پایین و بازدهی مناسب در حذف عناصر سنگین، استفاده از این جاذب برای تصفیه آب مفید به نظر می‌رسد (۱۸).

ماهارانا و سن (۱۰) نشان دادند از ژئولیت مغناطیسی می‌توان برای حذف فلزات سنگین از جمله مس و سرب و کروم، آنتی بیوتیک‌ها و رنگهائی مانند متیلن بلو از آب استفاده کرد. طاهری سودجانی و همکاران (۲۱) نشان دادند با کاهش اندازه ذرات و افزایش میزان کاربرد ژئولیت، جذب نیترات توسط خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت. ملکیان و همکاران (۱۲)، اثر دو نوع ژئولیت طبیعی و اصلاح شده را بر آبشویی نیترات و رشد گیاه بررسی کردند و نشان دادند که مقدار ۶۰ گرم ژئولیت به ازای هر کیلوگرم خاک، آبشویی نیترات را کاهش می‌دهد ولی اندازه ذرات ژئولیت در مقدار آبشویی چندان مؤثر نیست. ملکیان و همکاران (۱۲) عنوان کردند با افزایش مقدار ژئولیت میزان جذب نیترات توسط ژئولیت افزایش می‌یابد. حاج هاشم خانی (۷) عنوان کرد کاربرد ژئولیت به صورت لایه‌ای عملکرد بهتری داشته است. با اعمال روش لایه‌ای میزان کاهش نیترات نسبت به روش مخلوط ۷۱ درصد افزایش یافت. به نظر می‌رسد وجود لایه‌ی ژئولیت باعث کاهش سرعت عبور پساب شده و در نتیجه از آبشویی نیترات جلوگیری شده است. احسانگر و همکاران (۵) در پژوهشی نشان دادند که قرار گرفتن ژئولیت در لایه‌ی بالایی شن در حذف نیترات به صورت جزیی تاثیر بهتری داشته است که علت این‌طور بیان شده است که، با وجود اینکه شن بیش‌تر جنبه‌ی فیزیکی دارد اما قرار گرفتن آن در کنار ژئولیت باعث کاهش ضریب آبدزدی در کل ستون شده است و درصد کاهش نیترات پساب را افزایش داده است.

استفاده از ژئوستنتیک‌ها به عنوان یک ماده ساختمانی در ۵۰ ساله اخیر و همگام با پیشرفت صنعت پتروشیمی در رابطه با طرح‌های آب و خاک مطرح گردیده و مورد استقبال مهندسين و کارشناسان در

جدول ۱- میانگین برخی پارامترهای فاضلاب دانشگاه شهرکرد

Table 1- Average of some wastewater parameters of Shahrekord University

EC (dS/m) هدایت الکتریکی	pH	Ca+Mg (meq/L)	Na (meq/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	TSS (mg/L) کل مواد معلق
1.02	7.74	5.14	3.4	26	109.3

۱۲ اینچ و ارتفاع موثر ۴۵ سانتیمتر استفاده شد که به صورت موازی در کنار همدیگر قرار داده شدند. به علت اینکه قرار دادن ژئوتکستایل‌ها در مخزن فیلترهای شنی رایج باعث می‌شد پساب از کناره‌های آن عبور کند، در ۲ تیمار دارای ژئوتکستایل، از دو فیلتر ابداعی استفاده شد که بعد از فیلتر شن قرار می‌گرفت (شکل ۱). ساختار این فیلترهای ژئوتکستایلی شامل یک لوله‌ی ۳ اینچ بود که در میانه‌ی راه آن یک اتصال فلنجی ۳ اینچ قرار داشت و ژئوتکستایل‌ها در بین فلنج‌ها قرار می‌گرفت و با چسب آب‌بندی می‌شد. به منظور اندازه‌گیری فشارهای ورودی و خروجی از فشارسنج‌های روغنی استفاده شد. بدین منظور یک فشارسنج قبل از فیلترها، فشار مشترک پساب ورودی را اندازه‌گیری می‌نمود و چهار فشار سنج هم بعد از هر یک از تیمارها فشارهای خروجی را بعد از افت فشار ناشی از عبور پساب از هر تیمار اندازه‌گیری می‌گرفت. قبل از هر فیلتر و بعد از آن یک شیر جهت تنظیم ورودی و خروجی‌ها وجود داشت.

روش پر کردن و ترتیب تیمارها (فیلترهای شنی)

شکل ۱ به صورت شماتیک نحوه‌ی پر شدن تیمارها با استفاده از مواد فیلترکننده‌ی پساب را نشان می‌دهد. بر اساس پژوهش حاج هاشم خانی (۷) و احسانگر و همکاران (۵) ژئولیت به صورت لایه‌ای استفاده شد و بالای شن و ژئوتکستایل قرار گرفت.

تغییرات فشار در فیلترها

یکی از پارامترهای بسیار مهم و تاثیرگذار در روش‌های آبیاری تحت فشار، از جمله آبیاری قطره‌ای، مبحث مقدار فشار سیستم و افت می‌باشد. معمولاً اختلاف فشار در دو سوی فیلتر شنی در حالتی که تمیز باشد ۲ تا ۳/۵ متر است. هر زمان که اختلاف فشار بین ورودی و خروجی صافی شنی حدود ۳/۵ متر بیشتر از اختلاف فشار در حالت معمولی گردد، یعنی به ۵/۵ تا ۷ متر برسد باید فیلترها را تمیز کرد و گرنه دبی مورد نیاز سیستم تامین نمی‌گردد. گاهی توصیه می‌شود که حتی اگر اختلاف فشار افزایش نیابد روزی یکبار صافی‌ها شستشوی معکوس شوند (۲). برای اندازه‌گیری فشار از فشارسنج‌های پیش‌بینی شده‌ی قبل و بعد از فیلترها استفاده شد و در طول مدت زمان کار سیستم (۹ ساعت) قرائت فشارها با فواصل نیم ساعت و گاهی یک ساعت انجام شد.

نیترات با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر، مواد معلق به کمک

اما ذرات معلق (۱۰۹/۶ mg/L) طبق اکثر استانداردها بیش از حد مجاز برای آبیاری بود. حداقل و حداکثر مقدار pH به ترتیب ۷/۲ و ۸/۰۳ بود که از مقدار بیشینه، تمام استانداردها کمتر بود. SAR اندازه‌گیری شده پساب ورودی به فیلترها ۲/۱۴ بود که بر اساس استانداردها از نظر کاربرد در آبیاری مجاز بود (۱۴).

طرح آماری و تیمارها

در این پژوهش برای سیستم تصفیه فیلترهای شنی در آبیاری قطره‌ای، آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. فاکتورها عبارت بودند از: فاکتور اول، نوع فیلتر پایه در دو سطح شامل: ۱- ژئوتکستایل و ۲- شن و فاکتور دوم، مکمل ژئولیتی در کنار فیلتر پایه در دو سطح شامل: ۱- کاربرد ژئولیت و ۲- بدون کاربرد ژئولیت. تیمارهای پژوهش شامل فیلتر شنی (تیمار شاهد- CTRL)، فیلتر ژئوتکستایل (G)، فیلتر شنی-ژئولیت (SZ) و فیلتر ژئوتکستایل-ژئولیت (GZ) بود.

مواد استفاده شده در فیلترها

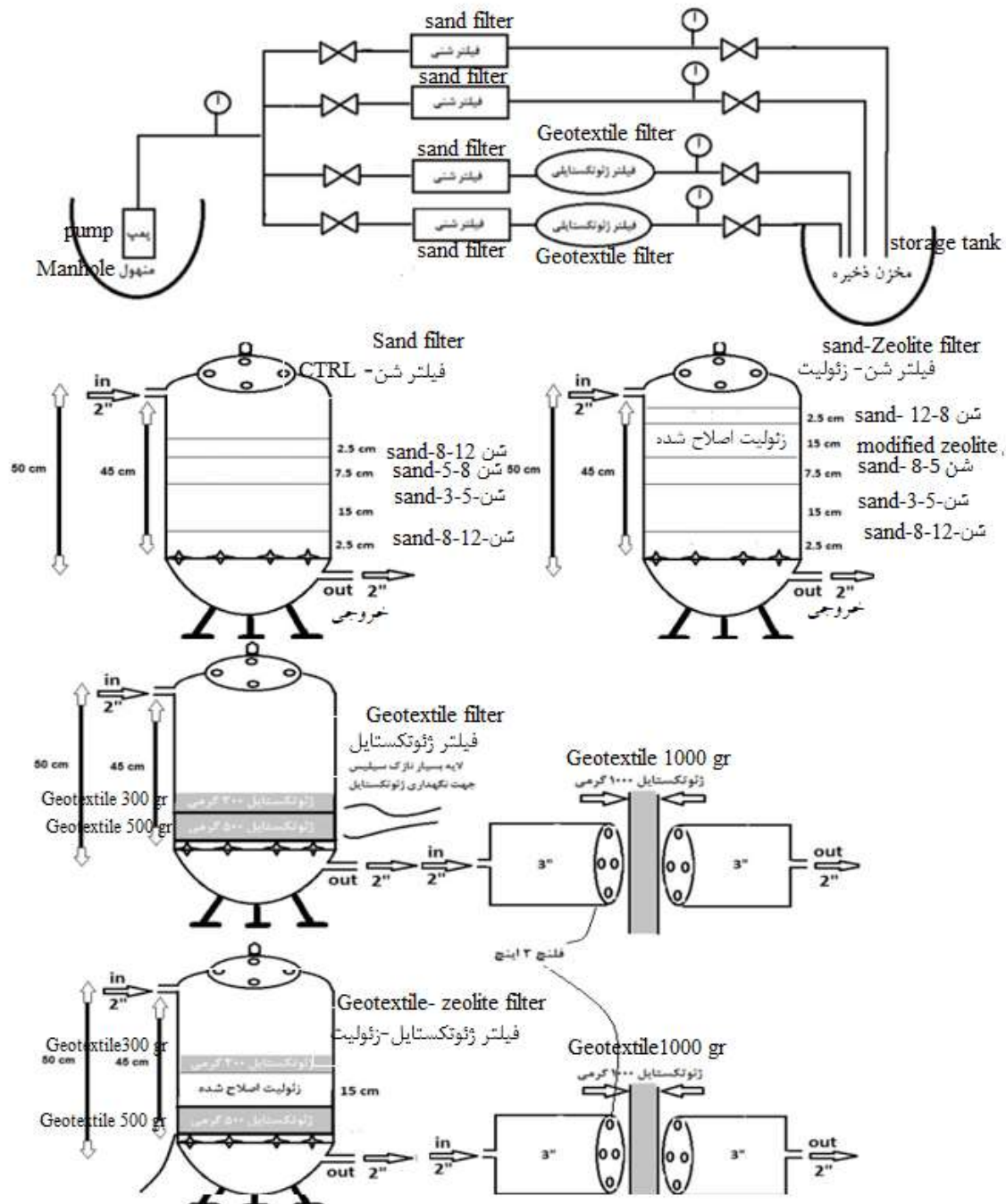
شن مورد استفاده در این پژوهش، از نوع شن‌های سیلیسی معمول مورد استفاده در فیلتر شنی بود که در سه اندازه‌ی ۵-۳، ۸-۵ و ۱۲-۸ میلی‌متری استفاده شد. به منظور زدودن هر نوع آلودگی و ذرات خاک و افزایش دقت کار در اندازه‌گیری مواد معلق پساب، شن‌ها قبل از استفاده چندین بار با آب معمولی شستشو داده شد. ژئوتکستایل‌های استفاده شده در این پژوهش سه نوع دارای وزن‌های ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ گرم در هر متر مکعب بود که از شرکت بهسازنسج کرمان تهیه شدند. ژئولیت استفاده شده در این طرح از نوع کلینوپتیلولایت، محصول شرکت افرند توسکا بود که با نام تجاری آنزیمیت عرضه می‌شود. به منظور کاهش بار سدیمی ژئولیت، از اسید کلریدریک جهت اصلاح و فعال‌سازی استفاده شد. انتخاب غلظت اسید بر اساس خروج سدیم از ساختار ژئولیت و جایگزینی یون هیدروژن به جای آن جهت ایجاد ساختاری متخلخل‌تر با سطح ویژه‌ی بالاتر برای ژئولیت، به منظور جایگزینی یون نیترات بود. بر این اساس در نهایت از غلظت نیم مولار جهت اصلاح ژئولیت استفاده شد.

سیستم تصفیه

در این پژوهش از چهار مخزن مربوط به فیلتر شنی رایج با قطر

شد. به منظور آنالیز پارامترها و مقایسه میانگین داده‌ها از نرم‌افزار SAS و آزمون دانکن استفاده شد. همچنین ترسیم نمودارهای لازم با استفاده از نرم‌افزار EXCEL انجام شد.

فیلتر و کاغذ صافی، سدیم توسط فلیتومتتر، کلسیم و منیزیم با استفاده از تیتراسیون با EDTA و EC و pH به ترتیب توسط هدایت‌سنج و pH متر در پساب ورودی و خروجی فیلترها اندازه‌گیری



شکل ۱- شماتیک تیمارها

Figure 1- Schematic of treatments

نتایج و بحث

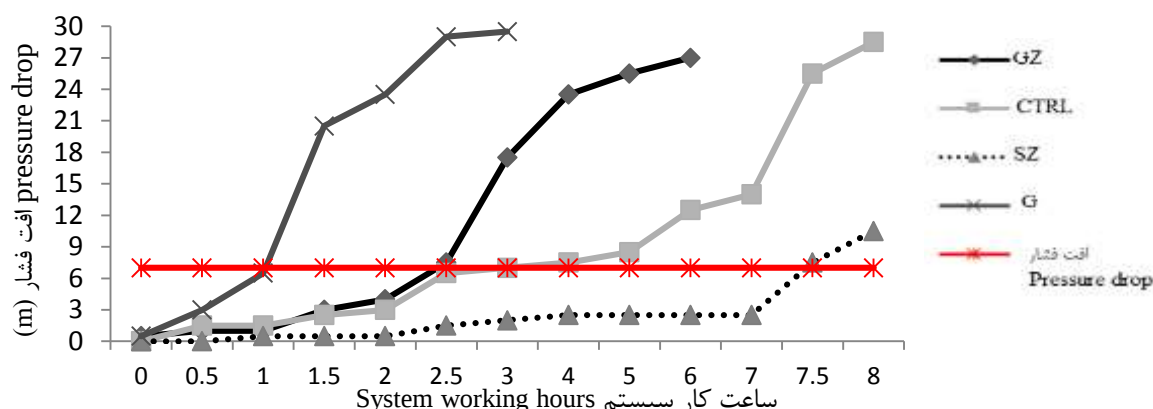
بررسی تغییرات فشار و دبی در فیلترها

همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است تمامی فیلترها دارای افت‌های قابل توجهی بوده‌اند. مقادیر افت هر فیلتر، با افت مجاز فیلتر شنی در سیستم تصفیه‌ی آبیاری قطره‌ای که ماکزیمم آن ۷ متر می‌باشد (۲) مقایسه شده است. افت فشار فیلتر شنی معمولی در طول مدت زمان آزمایش، تا ساعت پنجم کار سیستم، با افت فشار مجاز برابر و یا از آن کمتر بود، ولی از ساعت پنجم به بعد دچار گرفتگی شده و افت آن‌ها از مقدار مجاز تجاوز کرد. در سیستم‌های تصفیه‌ی آبیاری قطره‌ای که با آب معمولی آبیاری می‌شوند هم همواره اگر غلظت مواد معلق موجود در آب آبیاری زیاد باشد چشمه‌های فیلتر خیلی سریع مسدود می‌شود، به همین دلیل در چنین حالت‌هایی قبل از صافی شنی معمولاً از حوضچه‌های ته نشینی و هیدروسیکون‌ها استفاده می‌شود. همچنین گاهی برای جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات به آب مقداری کلر اضافه می‌کنند (۲). با اضافه شدن ژئولیت به فیلتر شنی، مدت زمان رسیدن به حداکثر افت فشار مجاز حدود ۲/۵ ساعت به تاخیر افتاده است. در تیمار ژئوتکستایل تنها تا ساعت اول افت فشار کمتر از حد مجاز بوده است و بعد از آن به شدت افت افزایش یافته است به‌طوری که از ساعت سوم به بعد فیلتر کاملاً گرفته است و عملاً جریانی از آن عبور نکرده است. در تیمار مخلوط ژئوتکستایل و ژئولیت، حضور ژئولیت باعث شده است مقداری از مواد معلق پساب قبل از رسیدن به ژئوتکستایل گرفته شود. بنابراین زمان رسیدن به ماکزیمم مقدار افت مجاز ۱/۵ ساعت به تاخیر افتاده است و تا ساعت ۲/۵ بعد از شروع کار سیستم افت فشار مجاز بوده است ولی از این ساعت به بعد افت از مقدار مجاز تجاوز کرده است و بالاخره در ساعت ششم این فیلتر نیز کاملاً دچار گرفتگی شده است. بنابراین با توجه به مطالب عنوان شده، به نظر می‌رسد کاربرد شن و ژئوتکستایل

به تنهایی مناسب نیست و با کاربرد آن سیستم از لحاظ فشار دچار گرفتگی می‌شود. تیمار SZ عملکرد خوبی از این نظر داشت و تیمار GZ نیز با به کار بردن تمهیدات تصفیه‌ای خاص قبل از این فیلتر، پتانسیل استفاده را از لحاظ تامین فشار لازم برای مدت زمان کوتاه دارد.

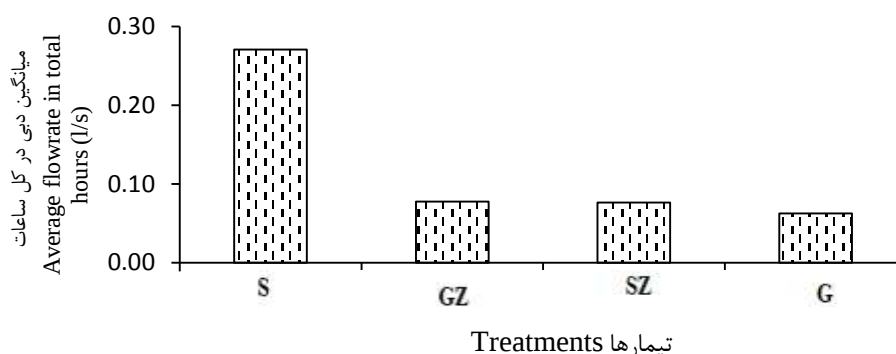
تغییرات دبی فیلترها

از آن جایی که میزان دبی یک سیستم تصفیه بسیار مهم است و بایستی حداقل دبی مورد نیاز توسط سیستم تامین گردد، در طول آزمایش‌ها دبی‌های خروجی هر فیلتر با فواصل یک ساعته به روش حجمی اندازه‌گیری شد. نمودار نشان داده شده در شکل ۳، میانگین دبی هر فیلتر در کل ساعت‌های کار آن فیلتر را نشان می‌دهد. به طور کلی با توجه به دبی خروجی فیلترها و مساحت تحت آبیاری هر سیستم و با توجه به این نکته که معمولاً در آبیاری قطره‌ای هیدرومدول ۰/۵ l/s/ha می‌باشد، بایستی تعداد فیلتر مورد نیاز سیستم آبیاری تعیین شود. ضمناً با توجه به اینکه دبی این فیلترها ثابت نبود و در طول ساعات کار سیستم مدام در حال تغییر بود و همچنین با توجه به اینکه بعضی از این فیلترها بعد از چند ساعت از کار افتاد، نیاز به یک استخر جهت جمع‌آوری پساب خروجی احساس می‌شود به‌طوری که میزان پساب موجود در استخر توانایی تامین دبی مورد نیاز سیستم را داشته باشد و پساب از داخل آن به سیستم آبیاری پمپاژ مجدد شود. به نظر می‌رسد بتوان با انتخاب فیلترهایی با سطح مقطع بزرگ‌تر، به ویژه در مورد ژئوتکستایل که سطح مقطع آن تنها سه اینچ مربع بود، از گرفتگی زود هنگام فیلترها جلوگیری نمود و دبی آن‌ها را افزایش داد.



شکل ۲- مقایسه‌ی افت فشار فیلترها با افت فشار مجاز در طول ساعات کار سیستم

Figure 2- Comparison of pressure drop of filters with allowable pressure drop during system operating hours



شکل ۳- دبی فیلترها در کل ساعات‌های کار سیستم

Figure 3- Average flow rate of filters in total operating hours of the system

نیترا

بررسی تاثیر فیلترها در کاهش نیترا فاضلاب نشان داد هر چهار فیلتر به کار رفته قابلیت حذف نیترا را دارند ولی کارایی آن‌ها با همدیگر تفاوت دارد. نتایج تجزیه واریانس در جدول ۲ نشان از تاثیر معنادار فیلترهای پایه‌ی شن و ژئوتکستایل بر مقدار نیترا پساب خروجی، در ساعات صفر تا سه از شروع آزمایش دارد. با گذشت زمان تاثیر این فیلترها معنی‌دار نبوده است. علت این امر عدم حضور فیلتر ژئوتکستایل از ساعت سوم به بعد است. بنابراین در ساعات‌های سوم به بعد تنها فیلتر پایه‌ی حاضر فیلتر شنی بوده است. با توجه به ماهیت شن به عنوان یک فیلتر فیزیکی، نتایج به دست آمده برای آن زیاد دور از انتظار نیست. اما نتایج نشان می‌دهد اضافه شدن ژئولیت اصلاح شده به فیلترهای پایه باعث شده است که در سطح احتمال یک درصد در همه‌ی ساعات‌ها تاثیر معناداری بر مقدار نیترا داشته باشد. اسید کلریدریک با حذف ناخالصی‌های موجود در ساختار ژئولیت، باعث افزایش قابل توجه سطح ویژه‌ی ژئولیت می‌شود که می‌تواند باعث افزایش بازده جذب سطحی آن شود. نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۳ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که در همه‌ی ساعات‌ها مقدار نیترا پساب خروجی تیمار شن با مقدار آن در پساب ورودی اختلاف معنی‌داری ندارد اما مقدار این پارامتر در تیمارهای دیگر با فاضلاب ورودی اختلاف معنی‌دار دارد و نیترا نسبت به مقدار اولیه به‌طور معناداری در سطح احتمال پنج درصد کاهش یافته است. احسانگر و همکاران (۵) در پژوهشی تحت عنوان بررسی امکان جذب نیترا فاضلاب شهری اهواز به وسیله‌ی ستون‌های ژئولیت، کربن فعال و شن نشان دادند شن بیش‌تر جنبه‌ی فیزیکی داشته است و در حذف نیترا به صورت جزئی تاثیرگذار بوده است. در ساعت

صفر، مقدار نیترا از ۲۵ به ۷/۶ در فیلتر ژئوتکستایل - ژئولیت (GZ) رسیده است، یعنی در تیمار GZ بیش‌ترین کاهش نیترا وجود داشته است، هرچند که فیلتر SZ نیز در ساعات مختلف تفاوت معنی‌داری با فیلتر GZ ندارد. تیمار ژئوتکستایل از لحاظ کاهش نیترا در سه ساعت اولیه‌ی کار سیستم با نتایج دو فیلتر SZ و GZ تفاوت معنی‌داری داشته است. همه‌ی نتایج نشان از تاثیرگذاری زیاد ژئولیت بر روی پارامتر نیترا در این تیمارها دارد. ژئولیت به علت داشتن خاصیت تبادل یونی بالا، با آزاد کردن برخی یون‌ها و جذب یون نیترا و قرار دادن آن در حفرات و کانال‌های ساختمان خود باعث کاهش نیترا پساب خروجی از تیمارها گشته است.

در شکل ۴ میانگین درصد تغییرات نیترا فاضلاب در کل ساعات‌های کار سیستم دیده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تیمار شن (شاهد) قابلیت زیادی در حذف نیترا ندارد، اما با اضافه شدن ژئولیت به آن در فیلتر SZ قدرت کاهش نیترا آن به حدود ۶۰ درصد رسیده است. احسانگر و همکاران (۵) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و عنوان کردند که تاثیر تیمار ژئولیت روی نیترا پساب با تیمارهای SZ تفاوت زیادی نداشته است و ژئولیت اصلاح شده با اسید کلریدریک یک نرمال حدود ۵۳٪ نیترا موجود در پساب را کاهش داده است. حاج‌هاشم خانی (۷) نیز عنوان کرد ژئولیت اصلاح شده با اسید کلریدریک و نمک کلسیم کلرید، میزان نیترا زه‌آب خروجی را تا حدود ۶۵ درصد کاهش می‌دهد. طاهری سودجانی و همکاران (۲۱) نیز به نتایج مشابهی در مورد کارایی ژئولیت در کاهش نیترا پساب دست یافته بودند. در فیلتر GZ اضافه شدن ژئولیت به فیلتر ژئوتکستایل باعث شد که قدرت تصفیه‌ی نیترا آن ۳۱ درصد افزایش یابد و به حدود ۶۶ درصد برسد.

جدول ۲- تجزیه واریانس پارامترهای اندازه گیری شده در ساعات مختلف
Table 2- Variance analysis of measured parameters at different hours

	Hours ساعات	DF	1	2	3	4	DF	5	6	7	DF	8	9
نیترات Nitrate	B	1	70.1**	65.3*	48*	60.7**	1	4.1 ^{ns}	2.6 ^{ns}	6 ^{ns}	1	-	-
	C	1	444.1**	481.3**	320.3**	420.1**	1	308.1**	416.6**	368.16**	1	280.1**	266.6**
	B*C	1	44.1**	48 ^{ns}	21.3 ^{ns}	30.1**	1	-	-	-	1	-	-
	E	10	3	12.6	5.6	1.7	8	2	1.1	13.4	6	1.1	7.5
	CV		10.5	20.2	15.6	7.5	-	7.8	5.6	18.9	-	5.2	13.9
TSS	B	1	3333.3*	3008.3*	1200*	2408.3*	1	2016.6**	2016.6**	1666.6*	1	-	-
	C	1	2700*	2408.3*	1633.3*	1408.3*	1	1066.6**	816.6**	816.6 ^{ns}	1	600 ^{ns}	600**
	B*C	1	3.33 ^{ns}	75 ^{ns}	0.0 ^{ns}	8.3 ^{ns}	1	-	-	-	1	-	-
	E	10	446.6	333.3	246.6	286.6	8	50	50	300	6	188.8	33.3
	CV		36.8	29.4	27.07	27.6	-	10.6	9.98	26.9	-	19.3	8.24
Na	B	1	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.002 ^{ns}	1	0.02 ^{ns}	0.00006 ^{ns}		1	-	0.006 ^{ns}
	C	1	2.6**	2.77 ^{ns}	1.71 ^{ns}	2.11**	1	1.1 ^{ns}	1.21*	0.46*	1	0.3*	1.08*
	B*C	1	0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.001 ^{ns}	1	-	-		1	-	-
	E	10	0.01	0.73	0.69	0.01	8	0.49	0.11	0.08	6	0.03	0.1
	CV		3.8	23.1	23.2	3.6	-	18.2	7.7	8.7	-	6.8	7.3
Ca+Mg	B	1	0.8**	0.85**	1.47**	1.68**	1	1.5**	0.96**	0.006 ^{ns}	1	-	-
	C	1	14.7**	14.52**	15.78**	18**	1	12.9*	8.4**	0.06 ^{ns}	1	15.3 ^{ns}	12.32 ^{ns}
	B*C	1	0.07 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.007 ^{ns}	1	-	-	-	1	-	-
	E	10	0.07	0.07	0.04	0.06	8	0.18	0.08	1.76	6	0.05	0.04
	CV		4.58	4.44	3.31	3.74	-	6.01	4.41	19.3	-	3.38	3.12
pH	B	1	0.001 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.003 ^{ns}	1	0.004 ^{ns}	0.001 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	1	-	-
	C	1	0.17**	0.18*	0.18*	0.26**	1	0.18**	0.2*	0.21**	1	0.23**	0.21*
	B*C	1	0.0001 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	0 ^{ns}	0.001 ^{ns}	1	-	-	-	1		-
	E	10	0.004	0.03	0.02	0.02	8	0.009	0.01	0.006	6	0.01	0.01
	CV		0.93	2.5	2.09	2.05	-	1.25	1.74	1.02	-	1.43	1.71
EC	B	1	0.0001 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0 ^{ns}	1	0 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	•	1	-	-
	C	1	0.03 ^{ns}	0.04 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.04 ^{ns}	1	0.03 ^{ns}	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1	0.01 ^{ns}	0.01 ^{ns}
	B*C	1	0.00003 ^{ns}	0.000008 ^{ns}	0.1 ^{ns}	0.00003 ^{ns}	1	-	-	-	1	0.01	0.004
	E	10	0.007	0.05	0.00003	0.02	8	0.02	0.03	0.04	6		
	CV		8.87	17.5	7.75	12.9	-	12.23	19.23	20.5	-	12.7	6.9

درجه DF معنی دار نبودن اثر فاکتور در سطح پنج درصد و "-" بیانگر عدم کارایی فیلتر در آن ساعت می باشد. ns** معنی داری اثر فاکتور در سطح یک و پنج درصد است.

ضریب تغییرات است. CV خطا و E فیلتر پایه در مکمل، B*C مکمل، C فیلتر پایه، B آزادی،

ns, *and **: Non significant, significant at a probability level of one percent, significant at a probability level of five percent respectively. "- "shows that filter don't work.

DF: Degree of freedom, B: Basic filter, C: Complementary, B*C: Basic filter* Complementary, E: Erroe, CV: Coefficient of variation

جدول ۳- مقایسه میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف

Table 3- Comparison of the mean of the measured parameters in different hours

	Hours	0	1	2	3	4	5	6	7	8
نیترات (mg/L)	Inlet ورودی	25 ^a	26.6 ^a	23 ^a	26 ^a	26.6 ^a	30 ^a	27.6 ^a	25 ^a	24 ^a
	S	24.6 ^a	26 ^a	21 ^a	25 ^a	25.3 ^a	29 ^a	27.6 ^a	24 ^a	24 ^a
	SZ	8.6 ^c	9.3 ^c	8.6 ^c	10 ^c	11 ^b	12 ^b	12 ^b	11 ^b	10 ^b
	GZ	7.6 ^c	8.6 ^c	7.3 ^c	8.6 ^c	9.3 ^b	11 ^b	10 ^b	-	-
	G	16 ^b	17.3 ^b	15 ^b	17.3 ^b	-	-	-	-	-
TSS (mg/L)	Inlet ورودی	113.3 ^a	120 ^a	110 ^a	116.6 ^a	110 ^a	113.3 ^a	103.3 ^a	100 ^a	96.6 ^a
	S	43.3 ^{bc}	46.6 ^c	43.3 ^{bc}	50 ^{bc}	46.6 ^c	53.3 ^c	46.6 ^{bc}	46.6 ^b	46.6 ^c
	SZ	76.6 ^{ab}	80 ^b	66.6 ^b	73.3 ^b	73.3 ^b	76.6 ^b	70 ^b	66.6 ^b	66.6 ^b
	GZ	40 ^b	43.3 ^c	46.6 ^{bc}	43.3 ^{bc}	36.6 ^c	40 ^d	36.6 ^c	-	-
	G	13.3 ^c	20 ^c	23.3 ^c	23.3 ^c	-	-	-	-	-
Na (meq/l)	Inlet ورودی	3.41 ^b	3.77 ^a	3.2 ^b	3.31 ^a	3.9 ^b	3.5 ^a	4.06 ^b	3.14 ^b	2.4 ^b
	S	3.23 ^b	3.50 ^a	3.1 ^b	3.21 ^a	3.82 ^b	3.40 ^a	4.05 ^b	3.21 ^{ab}	2.42 ^b
	SZ	4.24 ^a	4.64 ^a	4.02 ^a	4.03 ^a	4.72 ^a	4.28 ^a	4.9 ^a	3.76 ^a	2.87 ^a
	GZ	4.23 ^a	4.61 ^a	4.01 ^a	3.99 ^a	4.73 ^a	4.17 ^a	4.08 ^a	-	-
	G	3.3 ^b	3.74 ^b	3.20 ^b	3.30 ^a	-	-	-	-	-
Ca+Mg (meq/l)	Inlet ورودی	4.4 ^d	4.8 ^d	5.1 ^e	5.2 ^d	5.3 ^c	4.9 ^d	5.2 ^a	5.4 ^c	5.7 ^b
	S	5.3 ^c	5.8 ^c	6.1 ^c	6.3 ^c	6 ^c	5.7 ^c	7.2 ^a	6 ^b	6.2 ^b
	SZ	7.6 ^a	8.06 ^a	8.6 ^a	8.8 ^a	8.9 ^a	8.1 ^a	7.4 ^a	8.8 ^a	9.4 ^a
	GZ	7b	7.4b	7.6b	8b	7.9b	7.3 ^b	7.5 ^a	-	-
	G	4.8 ^{cd}	5.3 ^{cd}	5.6 ^d	5.6 ^d	-	-	-	-	-
pH	Inlet ورودی	7.20 ^a	7.81 ^a	7.59 ^a	7.73 ^a	8.03 ^a	7.79 ^a	8.04 ^a	7.75 ^a	7.71 ^a
	S	7.23 ^a	7.83 ^a	7.60 ^a	7.74 ^a	8.04 ^a	7.73 ^a	7.98 ^a	7.70 ^a	7.60 ^a
	SZ	6.90 ^b	7.58 ^a	7.35 ^a	7.42 ^b	7.60 ^b	7.30 ^b	7.60 ^b	7.30 ^b	7.22 ^b
	GZ	6.90 ^b	7.60 ^a	7.37 ^a	7.47 ^{ab}	7.70 ^b	7.40 ^b	7.62 ^b	-	-
	G	7.23 ^a	7.84 ^a	7.62 ^a	7.75 ^a	-	-	-	-	-
EC (dS/m)	Inlet ورودی	0.91 ^a	1.27 ^a	0.87 ^a	1.14 ^a	1.30 ^a	0.89 ^a	0.97 ^a	0.87 ^a	0.88 ^a
	S	1.03 ^a	1.33 ^a	0.91 ^a	1.19 ^a	1.35 ^a	0.93 ^a	1.01 ^a	0.91 ^a	0.91 ^a
	SZ	1.14 ^a	1.46 ^a	0.99 ^a	1.31 ^a	1.49 ^a	1.01 ^a	1.11 ^a	1 ^a	1 ^a
	GZ	1.13 ^a	1.44 ^a	0.98 ^a	1.31 ^a	1.49 ^a	1.01 ^a	1.09 ^a	-	-
	G	1.03 ^a	1.32 ^a	0.9 ^a	1.19 ^a	-	-	-	-	-

"-" در جدول بیانگر عدم کارایی فیلتر در آن ساعت می باشد. میانگین‌ها با حروف مشابه در هر ستون فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح ۵ درصد آماری هستند (آزمون دانکن).
 "shows that filter don't work. Means with similar letters in each column have no significant difference at the statistical level of 5% (Duncan test)." -

کل ذرات معلق^۱

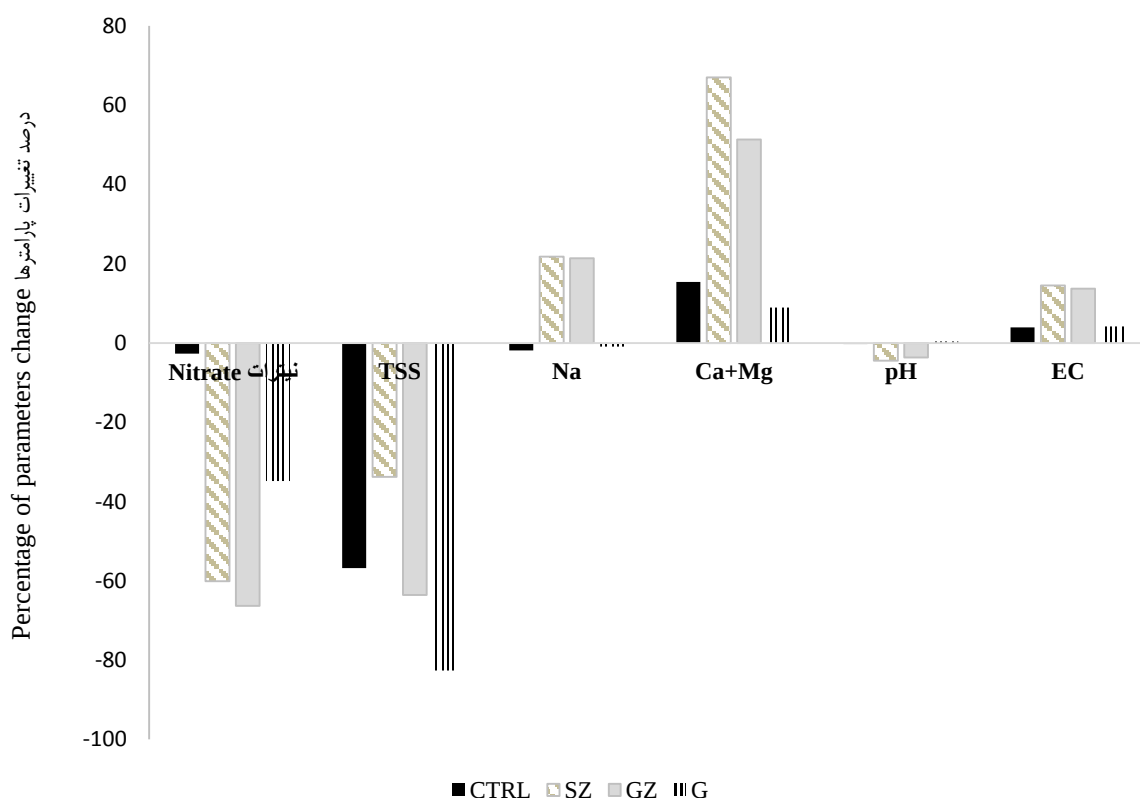
نتایج تجزیه واریانس پارامتر کل ذرات معلق (TSS) در جدول ۲ نشان می‌دهد که شن و ژئوتکستایل به عنوان فیلترهای فیزیکی به کار رفته بر مقدار TSS تاثیر معناداری در سطح احتمال پنج درصد در ساعات صفر تا سه داشت و در ساعات دیگر تاثیر این فیلترها در سطح احتمال یک درصد معنادار بوده است. نتایج تاثیر ترکیب فیلترهای پایه‌ی فیزیکی با فیلتر شیمیایی ژئولیت بر پارامتر بار معلق فاضلاب نیز در سطح احتمال یک درصد معنا دار بوده است. بنابراین می‌توان

شکل (۵-الف) به مقایسه‌ی میانگین مقدار نیترات پس‌اب خروجی از فیلترها در کل ساعات کار سیستم با میانگین مقدار ورودی آن پرداخته است. به جز شن که مقدار میانگین کل ساعت‌های آن حدود ۲۵ میلی‌گرم بر لیتر است و اختلاف زیادی با مقدار میانگین ورودی ندارد، در بقیه‌ی فیلترها مقدار میانگین از ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر کمتر است. در ساختار ژئولیت اصلاح شده با اسید، نقش اصلی در افزایش ظرفیت جذبی نیترات را یون‌های هیدروژن به عنوان یک یون قابل تعویض ایفا می‌کنند (۱۱).

کاهش TSS بین تیمار GZ و ژئوتکستایل، به جز در ساعت صفر، و همچنین بین این دو فیلتر با فیلتر شن در تمامی ساعات اختلاف معنی‌داری نیست. پس در صورت محدودیت در استفاده از هر کدام از این سه فیلتر به دلایل خاص، می‌توان دیگری را جهت تصفیه‌ی TSS استفاده نمود. در شکل ۴ که نمودار درصد تغییرات TSS پساب در ساعات‌های مختلف کار سیستم را نشان می‌دهد، مشخص است که اضافه شدن ژئولیت به هر دو فیلتر پایه‌ی ژئوتکستایل و شن موجب کاهش قدرت آن‌ها در تصفیه‌ی بار معلق فاضلاب شده است که علت آن می‌تواند شسته شدن ذرات ژئولیت توسط پساب و اضافه شدن ذراتی بسیار ریز به فاضلاب باشد که ژئوتکستایل بیش‌تر از شن توانسته آن‌ها را جدا سازد. شکل (۵-ب) نشان می‌دهد اختلاف زیادی بین مقدار میانگین بار معلق فاضلاب ورودی که حدود ۱۱۰ میلی‌گرم بر لیتر است با مقدار میانگین بار معلق پساب خروجی از فیلترها که همگی کمتر از ۷۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند وجود دارد.

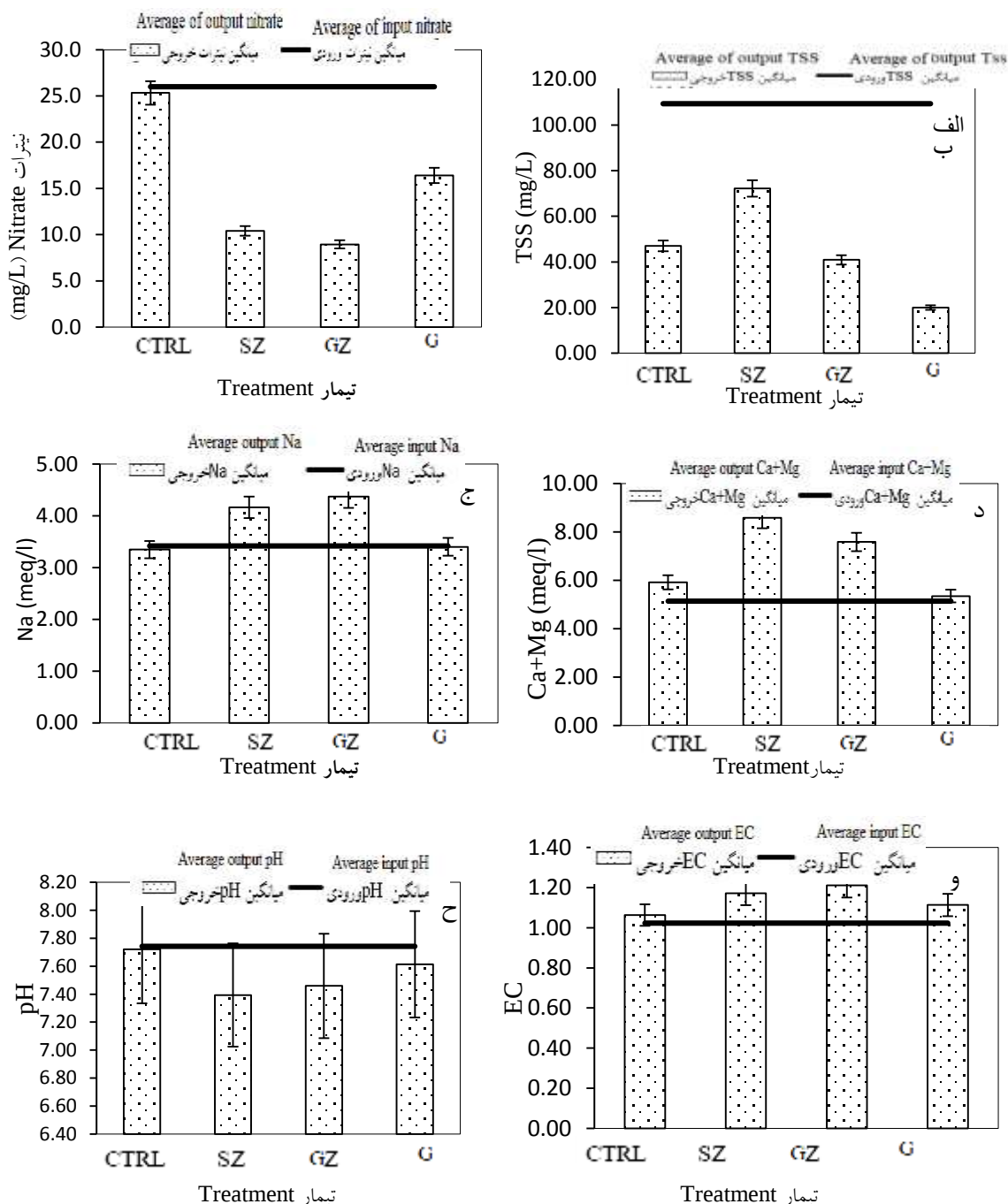
گفت به‌طور کلی فیلترها عملکرد موفقی در کاهش بار معلق فاضلاب داشته‌اند. همان‌طور که نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۳ نشان می‌دهد، هرچند که نتایج فیلترهای شن و SZ تنها در نیمی از ساعات‌ها با هم اختلاف معنی‌دار دارند ولی در کل اضافه شدن ژئولیت به شن سبب کاهش قدرت تصفیه‌ی بار معلق فاضلاب در شن شده است.

بیش‌ترین کاهش بار معلق فاضلاب متعلق به فیلتر ژئوتکستایل است. به عنوان مثال در ساعت صفر، مقدار TSS از ۱۱۳ به ۱۳/۳ میلی‌گرم در لیتر در فیلتر ژئوتکستایل رسیده است که بیش‌ترین کاهش TSS در بین تمامی فیلترها و در تمامی ساعات‌ها می‌باشد. در فیلتر ژئوتکستایل که بیش‌ترین درصد کاهش بار معلق را از خود نشان داده است، تا ساعت سوم که در سیستم حضور داشته است، در ساعات مختلف تفاوت معنی‌داری بین میزان کاهش TSS وجود ندارد. نکته‌ی مهمی که وجود دارد این است که، هر چند اضافه شدن ژئولیت به فیلتر ژئوتکستایلی در فیلتر GZ سبب کاهش قدرت تصفیه‌ی TSS آن شده است ولی در ساعات مختلف، بین درصد



شکل ۴- میانگین درصد تغییرات نیترات فاضلاب در کل ساعات‌های کار سیستم

Figure 4- Average of changes in wastewater nitrate in total operating hours of the system (%)



شکل ۵- میانگین ویژگی‌های فاضلاب ورودی و پساب خروجی فیلترها در کل ساعات‌های کار سیستم

Figure 5- Average characteristics of input and output wastewater of filters in all operating hours of the system

سدیم

مقایسه میانگین‌های پارامتر سدیم نشان می‌دهد که در تمام ساعات‌ها سدیم نسبت به مقدار اولیه در فیلترهای شن و ژئوتکستایل کاهش یافته ولی در هیچ یک از ساعات‌ها مقدار سدیم در این دو فیلتر، تفاوتش با مقدار اولیه و با یکدیگر معنادار نبوده است. پس مشخص است که پدیده‌ی تبادل یونی در ژئولیت و آزادسازی یون سدیم برای جذب یون‌های دیگر، دلیل افزایش سدیم در پساب خروجی این دو

در مورد پارامتر سدیم نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که شن و ژئوتکستایل بر مقدار سدیم تاثیر معناداری در سطح احتمال پنج درصد نداشته ولی ترکیب با آن‌ها با ژئولیت اصلاح شده در سطح احتمال یک درصد معنادار بوده است. در جدول ۳ نتایج

تغییرات pH

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده شد فیلترهای شن و ژئوتکستایل بر مقدار pH تاثیر معناداری نداشتند. اضافه شدن ژئولیت به فیلترهای فیزیکی در تیمارهای GZ و SZ سبب شده است که اختلاف مقدار پارامتر pH در این دو فیلتر با مقدار pH فاضلاب ورودی، در سطح احتمال یک درصد معنا دار شود. شکل ۵ نمودار میانگین درصد تغییرات pH فاضلاب در کل ساعات‌های کار سیستم را نشان می‌دهد. بیش‌ترین درصد تغییرات مربوط به تیمار SZ بوده است. که حدود ۴/۵ درصد میزان pH فاضلاب ورودی را کاهش داده است. بعد از آن نیز تیمار GZ با حدود ۴ درصد کاهش میزان pH فاضلاب ورودی در رتبه‌ی دوم قرار دارد. شکل (۵-ج) با انجام مقایسه‌ای در کل ساعات‌های کار سیستم نشان می‌دهد میانگین pH پساب خروجی همه‌ی فیلترها از میانگین ورودی آن‌ها کمتر است.

قابلیت هدایت الکتریکی (EC)

با وجود افزایش پارامتر قابلیت هدایت الکتریکی در فاضلاب خروجی از همه‌ی فیلترها، هیچ‌کدام از تیمارها تاثیر معناداری بر مقدار EC نداشته‌اند (جدول ۲ و ۳). در شکل ۴ مشاهده شد که میانگین درصد تغییرات EC در کل ساعات‌ها در تیمارهای شن و ژئوتکستایل حدود ۴ درصد و در تیمارهای GZ و SZ حدود ۱۴ درصد، به صورت افزایشی بوده است. در تمامی فیلترها مقدار میانگین EC پساب خروجی از مقدار میانگین آن در ورودی، در کل ساعات‌ها بیش‌تر است که این امر در شکل (۵-و) به خوبی مشهود است. عکاشه (۱) و کریستن و همکاران (۴) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند. عکاشه (۱) بیان کرد نمک‌ها می‌توانند از ساختار ژئولیت جذب یا دفع شوند، بنابراین دفع نمک‌ها از تیمارهای دارای ژئولیت یکی از عواملی است که باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی زه‌آب خروجی گردیده است.

نتیجه‌گیری

بر اساس این پژوهش فیلتر شن و ژئوتکستایل به تنهایی سبب افت فشار می‌شود. اما فیلتر شن-ژئولیت عملکرد خوبی از این نظر داشت و فیلتر ژئوتکستایل-ژئولیت نیز با به کار بردن تمهیدات تصفیه-ای خاص قبل از آن، پتانسیل استفاده را از لحاظ تامین فشار لازم برای مدت زمان کوتاه دارد. کلیه تیمارها به ویژه تیمارهای دارای ژئولیت به میزان قابل توجهی نترات را کاهش دادند و می‌توان از این فیلترها در کاهش نترات پساب در مواردی که میزان نترات بیش‌تر از حد مجاز است استفاده کرد. فیلتر ژئوتکستایل در همه‌ی ساعات‌ها درصد حذف مواد معلق آن بیش‌تر بود. اضافه شدن ژئولیت به هر دو

فیلتر بوده است. درصد تغییرات سدیم در کل ساعات‌ها به صورت میانگین بیانگر نزدیکی این درصد تغییرات در دو تیمار SZ و GZ، است که آن را می‌توان از یکسان بودن تاثیر ژئولیت اضافه شده بر این دو تیمار دانست (شکل ۴). در شکل (۵-ج)، به مقایسه‌ی میانگین سدیم فاضلاب ورودی و پساب خروجی فیلترها در کل ساعات‌های کار سیستم پرداخته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیمارهای دارای ژئولیت سدیم بیشتری داشتند. حاج هاشم خانی (۷) نشان داد که در تیمارهایی که دارای ژئولیت طبیعی بودند میانگین درصد تغییرات سدیم زه‌آب خروجی مثبت بود و مقدار آن حدود ۷۰ درصد بود و در تیمارهایی که دارای ژئولیت اصلاح شده بودند، میانگین درصد تغییرات سدیم زه‌آب خروجی منفی بود و مقدار آن حدود ۵ درصد بود. وی عنوان کرد که دلیل این امر جایگزینی کاتیون به جای کلسیم و منیزیم در ساختار ژئولیت اصلاح شده است.

مجموع کلسیم و منیزیم

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که فیلترهای پایه بر مقدار $Ca+Mg$ فاضلاب ورودی تاثیر معناداری در سطح احتمال پنج درصد در ساعات صفر تا پنج داشته است. همه‌ی تیمارهای پژوهش مقدار $Ca+Mg$ پساب را افزایش داده‌اند. نتایج مقایسه میانگین‌ها در جدول ۳ نشان می‌دهد که در تیمار ژئوتکستایل در ساعات‌های حضور در سیستم، کلسیم نسبت به مقدار اولیه‌ی فاضلاب ورودی اختلاف معناداری پیدا نکرده است. اما در تیمار شن با اینکه یک فیلتر فیزیکی است در اکثر ساعات‌ها این اختلاف معنی‌دار بوده است. خروجی تیمارهای SZ و GZ نیز از لحاظ مقدار $Ca+Mg$ با فاضلاب ورودی تفاوت معنی‌داری داشتند. افزایش کلسیم و منیزیم در تیمارهای دارای ژئولیت به این دلیل می‌تواند باشد که در فرآیند اصلاح ژئولیت، کلرید کلسیم نیز استفاده شده باشد.

تفاوت‌های معنی‌دار تیمارهای SZ و S با هم و GZ و G با هم، نشان از تاثیر زیاد ژئولیت بر افزایش این پارامتر در پساب دارد. با توجه به نتایج فیلتر شن به نظر می‌رسد وجود ناخالصی‌هایی (احتمالاً کربنات کلسیم) که در شن به کار برده شده باعث شده است با آزادسازی یون کلسیم مقدار مجموع کلسیم و منیزیم افزایش یابد. در شکل ۴ میانگین درصد تغییرات مجموع کلسیم و منیزیم فاضلاب نشان می‌دهد که تیمارهای S و SZ به ترتیب بیش‌تر از تیمارهای G و GZ میزان مجموع کلسیم و منیزیم را در پساب افزایش داده‌اند. مطابق شکل (۵-د) میزان میانگین مجموع $Ca+Mg$ پساب خروجی در کل ساعات‌های کار سیستم، در همه‌ی فیلترها از مقدار میانگین ورودی بیش‌تر است. حاج هاشم خانی (۷) نیز عنوان کرد ژئولیت اصلاح شده با اسید کلریدریک و نمک کلسیم کلرید، میزان کلسیم و منیزیم خروجی را تا حدود ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهد.

افزایش EC زه آب خروجی در تیمارهای SZ و GZ گردید. به طور کلی می توان گفت استفاده از فیلتر شن - ژئولیت پیشنهاد مناسبی به جهت کاهش بار معلق و نیترات موجود در پساب و عدم افت فشار می باشد.

فیلتر پایه ی ژئوتکستایل و شن موجب کاهش قدرت آن ها در تصفیه ی مواد معلق شد. بنابراین فیلتر ژئوتکستایل از لحاظ این پارامتر پتانسیل کاربرد در کنار فیلتر شنی معمولی را دارد. تیمار SZ بیش از سایر تیمارها (حدود ۴/۵ درصد) میزان pH فاضلاب ورودی را کاهش داد. همچنین دفع نمک ها از تیمارهای دارای ژئولیت باعث

منابع

1. Akkashe L. 2007. Application of natural zeolite in order to absorb heavy elements in the leachate of Isfahan Organic Fertilizer Factory. Master thesis, Islamic Azad University, Khorasan Branch. Isfahan, I.R. Iran.
2. Alizade A. 1997. Principles and operations of drip irrigation (first edition). Imam Reza University Press. (In Persian)
3. Bucks D.A., and Nakayama F.S. 1980. Injection of fertilizer and other chemicals for drip irrigation. Technical conference Proceedings-Irrigation Association. Houston, Texas. USA. Silver Spring, Maryland. 166-180
4. Christen E.W., Quayle W.C., Marcoux M.A., Arienzo M., and Jayawardane N.S. 2010. Winery wastewater treatment using the land filter technique. Journal of Environmental Management 91: 1665-1673.
5. Ehsangar M., Charm M., and Farokhiyan Firozabadi A. 2013. Investigation of the possibility of adsorption of nitrate in Ahvaz municipal wastewater by columns of zeolite, activated carbon and sand. Proceedings of the Iranian National Conference on Environmental Research, 31 October. Shahid Mofateh College of Hamadan. (In Persian)
6. Gilbert R.G., Nakayama F.S., and Bucks D.A. 1979. Trickle irrigation, Prevention of clogging. Transactions of the ASAE 22: 514-519.
7. Hajhashemkhani M. 2013. Investigation of the effect of modified microzeolite in combination with soil on some hydrodynamic and chemical parameters of soil in effluent application conditions. Master thesis, Shahrekord University, Iran. (In Persian)
8. Ibrahim H.S., Jamil T.S., and Hegazy E.Z. 2010. Application of zeolite prepared from Egyptian kaolin for the removal of heavy metals: II. Isotherm models. Journal of Hazardous Materials 182: 842-847.
9. Kutay M.E., and Aydılek A.H. 2005. Filtration Performance of tow-layer geotextile systems. Geotechnical Testing Journal 28(1): 79-91.
10. Maharana M., and Sen S. 2021. Magnetic zeolite: A green reusable adsorbent in wastewater treatment. Materials Today: Proceedings.
11. Maleki A. 2012. Potential of Acid Modified Zeolite for Cadmium Adsorption in Aqueous Environment. Journal of Mazandaran University Medical Science 21(86): 74-85. (In Persian with English abstract)
12. Malekian R., Abedi-Kuopai J., and Eslamian S.S. 2011. Influences of clinoptilolite and surfactant-modified Clinoptilolite zeolite on nitrate leaching and plant growth. Journal of Hazardous Materials 185: 970-976.
13. Mohajeri S., and Horlemann L. (Eds.). 2017. Reviving the Dying Giant: Integrated Water Resource Management in the Zayandeh Rud Catchment, Iran. Springer.
14. Mohammadi P., Siyahi M.K., Naseri M., Liaghat A.M., Adl M., Ehteshami M., Ashrafi A., Ghodosi F., Zarankabi M.R. A review of standards and experiences of using wastewater for irrigation. 2010. Iranian National Committee on Irrigation and Drainage.
15. Najafi P., and Tabatabaei S.H. 2009. Application of sand and geotextile envelope in subsurface drip irrigation. ICPTT: 1-6. Advances and Experiences with Pipelines and Trenchless Technology for Water, Sewer, Gas, and Oil Applications 2026-2031.
16. Pescod MB. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO, Irrigation and Drainage Paper 47. p 113.
17. Rabbani M.S., Kazemian H., Ghannadi Maragheh M., and Mallah M.H. 2002. Characterization of a natural analcime from Ardebil (Germi) region of Iran and evaluation of its ion-exchange properties in comparison with synthetic analcime, Second FEZA Conference, 1-5 September, Taormina, Giardini Naxos, Italy.
18. Soleimani M., Ansarie A., Haj Abassie M., and Abedi J. 2008. Investigation of Nitrate and Ammonium Removal from Groundwater by Mineral Filters. Journal of Water and Wastewater 19(3): 18-26. (In Persian with English abstract)
19. Tabatabaei S.H., and Najafi P. 2009. Effects of irrigation with treated municipal wastewater on soil properties in arid and semi - arid regions. Irrigation and Drainage 58: 551-560
20. Tabatabaei S.H., Nourmahnad N., Kermani S.G., Tabatabaei S.A., Najafi P., and Heidarpour M. 2020. Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions-A review. International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture 9(2): 193-220.
21. Taheri-Sodejani H., Ghobadinia M., Tabatabaei S.H., and Kazemian H. 2015. Using natural zeolite for contamination reduction of agricultural soil irrigated with treated urban wastewater. Desalination and Water

Treatment 54(10): 2723-2730.

22. Wang S., and Peng Y. 2010. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. Chemical Engineering Journal 156: 11-24.



Investigation of the Role of Sand- Geotextile-Zeolite Composite Filters on some Wastewater Properties

H. Shirvani Ichi¹- M. Ghobadina²- N. Nourmahnad^{3*}- S.H. Tabatabaei⁴

Received: 08-09-2021

Accepted: 04-10-2021

Introduction: Nowadays, the use of effluent in irrigation and especially drip irrigation systems has increased. The findings uncovered that drip irrigation is assumed as the only method which is capable of overcoming specific problems caused by wastewater usage. In this study, the efficiency of sand and geotextile filters with zeolite on wastewater properties and their application in the filtration of the drip irrigation system was investigated.

Materials and Methods: This study was conducted to investigate the changes in important chemical properties in the municipal wastewater of a university after passing through sand filters, geotextiles, and zeolites in the drip irrigation filtration system. A factorial experiment was performed in a completely randomized design with three replications. Treatments included sand filter (control-CTRL treatment), geotextile filter (G), sand filter with zeolite (SZ), and geotextile filter with zeolite (GZ). The sand used in this study was the usual silica sand which was in three sizes of 3-5, 5-8, and 8-12 mm. In order to remove any contamination and soil particles and increase the accuracy of the measurement of suspended solids in the effluent, the sands were washed several times with water before usage. The geotextiles used in this study had three types with weights of 300, 500, and 1000 grams per cubic meter. The zeolite used in this study was clinoptilolite modified with hydrochloric acid. The wastewater used in this study was obtained from the effluent of Shahrekord University. System flow rate, Pressure, nitrate, suspended solids, sodium, calcium, magnesium, electrical conductivity, effluent pH were measured before and after entering the filters at different hours. Statistical analysis was done by SAS software and the Duncan test was used to compare the means of the data.

Results and Discussion: The results showed that the sand-zeolite treatment had a good performance in terms of pressure and the geotextile-zeolite treatment was able to provide pressure for a short time. The amount of nitrate in the wastewater of the sand filter was not significantly different from the amount of inlet, but in other filters was significantly reduced. The amount of nitrate input of all treatments was 26 mg/l. The average output nitrate in the sand filter was about 25 and in the other filters was less than 20 mg/l. The average amount of suspended solids in the effluent was about 110 mg/l, while the average amount of suspended solids in the wastewater was reduced to less than 72 mg/l. The sand and sand-zeolite treatments increased the total amount of calcium and magnesium in the wastewater more than geotextile and geotextile-zeolite treatments, respectively. The average Ca + Mg of effluent in the total operating hours of the system was higher than the average input in all filters. The percentage of EC changes in total hours increased about 4% in sand and geotextile treatments and 14% in geotextile- zeolite and sand -zeolite filters. The highest percentage of pH changes was related to sand-zeolite filter, which reduced the pH of incoming wastewater by about 4.5%. After that, geotextile- zeolite filter reduced the pH of the incoming wastewater by 4%. The average pH of the effluent of all filters is lower than the average of their inlet.

Conclusion: Sand and geotextile filters alone cause pressure drop and dropper clogging. However, the sand-zeolite treatment has performed well in this regard. The geotextile-zeolite treatment has the potential to be used in terms of supplying the necessary pressure for a short period by applying special treatment measures before this filter. These conclusions are only in terms of pressure drop due to the ability of filters in practical use and do not refer to their ability to filter the parameters and provide the desired flow. All treatments, especially zeolite treatments, significantly reduced nitrate, and these filters can be used to reduce effluent nitrate in cases where the amount of nitrate is more than allowed. However, since the sand filter had no effect on nitrate reduction, the effluent must be treated for nitrate before using sand filters. The geotextile filter had a higher percentage of suspended solids removal at all hours. The addition of zeolites to both geotextile and sand base filters reduced

1, 2 and 4- Former M.Sc. Student, Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.

3- Assistant Professor, Department of Agriculture, Payame Noor University, Iran

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

DOI: 10.22067/JSW.2021.72031.1082

their ability to treat suspended solids. Therefore, geotextile filters can be a good alternative to ordinary sand filters in terms of this parameter. All treatments increased Ca + Mg relative to the input. The sand- zeolite treatment reduced the pH of the incoming wastewater more than other treatments (about 4.5%). Also, desalination of salts from zeolite treatments increased the EC of effluent in the sand-zeolite and Geotextile-zeolite treatments. According to this study, the use of sand-zeolite in terms of reducing nitrate and suspended solid, increasing calcium and magnesium, and reducing pH and no pressure drop is recommended.

Keywords: Clogging, Inlet wastewater, Nitrate, Total suspended solid



مقاله پژوهشی

اثر تغذیه زیستی و پرایمینگ بذر بر رشد و عملکرد ژنوتیپ‌های نخود کابلی
(*Cicer arietinum* L.)

حسین ایوبی^۱ - جعفر نباتی^{۲*} - احمد نظامی^۳ - محمد کافی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۲

چکیده

به منظور مطالعه اثر تغذیه زیستی و پرایمینگ بذر بر رشد و عملکرد ژنوتیپ‌های امیدبخش نخود کابلی (ILC8617، MCC741، MCC463، ILC72، FLIP02-51C) آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار در دانشگاه فردوسی مشهد در سال زراعی ۱۳۹۷-۹۸ اجرا گردید. عوامل آزمایش شامل تیمارهای تغذیه‌ای به عنوان کرت‌های اصلی و ژنوتیپ‌های نخود به عنوان کرت‌های فرعی بود. تیمارهای تغذیه‌ای شامل: ۱- پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم (P+BF) ۲- کاربرد باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم (BF) ۳- کاربرد باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم همراه با محلول‌پاشی اسیدآمین، پتاسیم و سیلیسیم (BF+F) ۴- پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم همراه با محلول‌پاشی اسیدآمین، پتاسیم و سیلیسیم (P+BF+F) و ۵- شاهد (بدون تغذیه) بودند. نتایج نشان داد که بیشترین مقدار کلروفیل a در BF در ژنوتیپ MCC463 حاصل شد که نسبت به شاهد ۳/۱ برابر افزایش داشت. بیشترین مقدار کلروفیل b در BF+F در ژنوتیپ FLIP02-51 به دست آمد. بیشترین شاخص سطح سبز در ژنوتیپ MCC741 در P+BF حاصل گردید. بیشترین زیست‌توده تولیدی در BF+F در ژنوتیپ ILC8617 مشاهده شد که ۲۴ درصد در مقایسه با شاهد بیشتر بود. بیشترین عملکرد دانه در ژنوتیپ MCC741 در BF با ۱۵۹۰ کیلوگرم در هکتار حاصل شد که نسبت به شاهد افزایش ۲ برابری داشت. به طور کلی می‌توان عنوان کرد که استفاده از کودهای زیستی سبب بهبود اغلب صفات گیاه نخود در شرایط مزرعه شد.

واژه‌های کلیدی: اسیدآمین، پرایمینگ، سیلیکون، کودهای زیستی، محلول‌پاشی

مقدمه

حبوبات از جمله گیاهانی هستند که مقدار زیادی پروتئین، کربوهیدرات، مواد معدنی، آهن، کلسیم، پتاسیم، منیزیم و ویتامین‌ها خصوصاً ویتامین‌های گروه B دارند. محتوای بالای اسیدآمین لیزین موجود در حبوبات، کمبود میزان لیزین غلات را جبران کرده و محتوای بالای متیونین غلات، کمبود این اسیدآمین ضروری را در حبوبات برطرف می‌کند (۳۶). در بین حبوبات در ایران نخود (*Cicer arietinum* L.) از نظر سطح زیر کشت و تولید از اهمیت بالایی برخوردار است و سطح زیر کشت این گیاه حدود ۵۶۱ هزار هکتار برآورد شده است که معادل ۷/۸ درصد از کل سطح محصولات زراعی و حدود ۶۵ درصد از سطح زیر کشت حبوبات است (۱۲). عوامل زیادی از جمله عدم تأمین بهینه عناصر غذایی در مزارع در پایین بودن عملکرد نخود مؤثر می‌باشد.

مصرف بیش‌ازحد کودها و نهاده‌های شیمیایی موجب خسارت‌های جبران‌ناپذیری در زمینه سلامت انسان، منابع آبی و

حبوبات گیاهانی از خانواده فاباسه (Fabaceae) هستند، که دارای ۱۶۰۰۰ تا ۱۹۰۰۰ گونه و تقریباً ۷۵۰ جنس هستند، تلاش برای منابع جایگزین و ارزان پروتئین برای تغذیه انسان منجر به انجام پژوهش‌های متعددی روی گیاهان این خانواده شده است (۴). حبوبات در تغذیه انسان می‌توانند مکمل غذایی خوبی برای انسان محسوب شوند و از نظر مصرف غذایی بعد از غلات حائز رتبه دوم هستند (۱۴).

۱، ۳ و ۴- به ترتیب کارشناسی ارشد و استادان گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار پژوهشکده علوم گیاهی، دانشگاه فردوسی مشهد

(*)- نویسنده مسئول: (Email: jafarnabati@ferdowsi.um.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.70395.1054

ریزباکتری‌های محرک رشد است. ریزباکتری‌های محرک رشد دارای خصوصیات هستند که می‌توانند با تأثیر بر گیاه از طریق بهبود شرایط تغذیه‌ای آن سبب افزایش مقاومت نسبت به عوامل نامساعد محیطی در زراعت شود (۷)؛ بنابراین این مطالعه باهدف ارزیابی واکنش‌های فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی ژنوتیپ‌های نخود کابلی نسبت به پرایمینگ بذر و سطوح مختلف کودهای زیستی انجام شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. عوامل آزمایش شامل پنج تیمار تغذیه‌ای به‌عنوان کرت‌های اصلی و پنج ژنوتیپ نخود کابلی (MCC463، MCC741، ILC8617، ILC72 و FLIP02-51C) به‌عنوان کرت‌های فرعی بودند. ژنوتیپ‌های مورد استفاده از مطالعات مقدماتی تحمل به سرما انتخاب شدند. تیمارهای تغذیه‌ای شامل: ۱- پرایمینگ بذر با استفاده از باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن (نیتروباکتر دایان)، باکتری حل‌کننده فسفات (فسفوپاورباکتر دایان) و باکتری حل‌کننده پتاسیم (پتاپاورباکتر دایان) قبل از کاشت (P+BF)، ۲- کاربرد از باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم قبل از کاشت (BF)، ۳- پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم قبل از کاشت به همراه محلول‌پاشی اسیدآمینه (آمینوآفر دایان)، پتاسیم (پتاس وافر دایان) و سیلیسیم (سیلیکون دایان) در مراحل رشد (P+BF+F)، ۴- کاربرد از باکتری‌های آزادی تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری حل‌کننده فسفات و باکتری حل‌کننده پتاسیم قبل از کاشت به همراه محلول‌پاشی اسیدآمینه، پتاسیم و سیلیسیم در مراحل رشد (BF+F) و ۵- شاهد (بدون تغذیه). باکتری‌های آزاد زی تثبیت‌کننده نیتروژن مجموعه‌ای از سویه‌های *Azospirillum sp.*، *Bacillus Azotobacter sp.*، *Bacillus sp.* باکتری‌های حل‌کننده فسفات مجموعه‌ای از سویه‌های *Bacillus sp.* و *Pseudomonas sp.*؛ و باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم مجموعه‌ای از سویه‌های *Bacillus sp.* و *Pseudomonas* بودند که بومی ایران بوده و توسط شرکت دانش بنیان خوشه پروران زیست فناوری (دایان) از نقاط مختلف جمع‌آوری و تکثیر شدند. باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن، باکتری‌های حل‌کننده فسفات و باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم قبل از کاشت در کرت‌های موردنظر به مقدار ۵ لیتر در هکتار با تراکم جمعیت باکتری 10^7 سلول در میلی‌لیتر مایع تلقیح روی سطح خاک پاشیده شده و با خاک مخلوط گردید. محلول‌پاشی با اسیدآمینه (یک در هزار) در دو مرحله قبل از گلدهی و در مرحله ۵۰

محیط‌زیست شده است (۲۰). استفاده از مقادیر بالای کود شیمیایی موجب افزایش بی‌رویه رشد رویشی گیاه بدون افزایش عملکرد گیاه می‌شود که موجب افزایش هزینه تولید شد و علاوه‌برآن افزایش تجمع نیتروژن و دیگر عناصر می‌گردد که کیفیت محصول و بازارپسندی آن را کم می‌کند (۲۲). مطالعات فراوانی در زمینه کاهش مصرف کودهای شیمیایی و جایگزین کردن آن‌ها با انواع کودهای آلی و زیستی انجام شده است (۲).

کودهای زیستی حاوی تعداد کافی از یک یا چندگونه از باکتری‌های سودمند خاک‌زی هستند. این باکتری‌ها به طور طبیعی در خاک‌های کشاورزی وجود دارند اما به دلیل تنش‌های محیطی بلندمدت، استفاده بی‌رویه از کودها و سموم شیمیایی و عدم حضور گیاه میزبان مناسب به مدت طولانی جمعیت آن‌ها کم شده است. اضافه کردن این باکتری‌ها به خاک، قبل و یا در طول دوره رشد، موجب افزایش رشد و تولید محصولات کشاورزی می‌شود (۷). مطالعه کودهای زیستی حاوی باکتری‌های تثبیت‌کننده نیتروژن نشان داده است که این باکتری‌ها، گیاه را در جذب عناصر بیشتر یاری می‌کنند که در نتیجه آن رشد اندام هوایی و انشعابات جانبی گیاه نخود افزایش پیدا می‌کند (۲۹). همچنین عنوان شده است که میکروارگانیسم‌های موجود در کودهای زیستی می‌توانند با افزایش طول دوره پرشدن دانه و مقدار مواد فتوسنتزی ذخیره‌شده، افزایش وزن دانه نخود را توجیه کنند (۱). کودهای زیستی تأثیر مثبتی بر روابط آبی گیاه، چرخه مواد غذایی و قابل‌دسترس ساختن و افزایش جذب عناصر غذایی دارند (۲۳).

استفاده تلفیقی از کودهای زیستی به دلیل افزایش جذب عناصر غذایی، فتوسنتز و رشد ریشه، موجب کاهش ریزش گل‌های بارور و افزایش تعداد شاخه‌های جانبی و درنتیجه افزایش تعداد غلاف و تعداد دانه در هر بوته نخود شد (۱۷). بهبود رشد گیاه نخود در اثر آغشته کردن بذر با کودهای زیستی می‌تواند ناشی از تأثیر این میکروارگانیسم‌ها بر فعالیت‌های فیزیولوژیک و متابولیک گیاه و نیز تثبیت نیتروژن باشد. از طرف دیگر، یکی از راه‌های سریع برای مقابله با تنش‌های محیطی، استفاده از روش‌های غنی کردن و پیش تیمار بذور است که آن‌ها را در مقابله با تنش، مقاوم می‌سازد، یکی از متداول‌ترین این روش‌ها پرایمینگ بذر است. مطالعات فراوانی در مورد تأثیرات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی پرایمینگ روی بذرهای مختلف حبوبات از جمله یونجه (*Medicago sativa*)، لوبیا چشم‌بلبلی (*Vigna radiate L.*)، نخود و عدس (*Lens culinaris*) انجام شده و نتایج حاکی از بهبود فرایند جوانه‌زنی و ایجاد مقاومت تحت شرایط تنش بود (۸، ۱۱، ۱۵ و ۲۶).

از آنجاکه آب قابل‌دسترس، عامل اصلی محدودکننده رشد در زراعت نخود می‌باشد، لذا یکی از راهکارهای تسریع در رشد و نمو و فرار گیاه از تنش‌های انتهایی فصل بهبود تغذیه، به‌ویژه استفاده از

تعداد دانه در غلاف و وزن صد دانه با استفاده از ۳ بوته که به‌طور تصادفی از کرت برداشت شدند، تعیین شدند. همچنین به منظور تعیین زیست‌توده و عملکرد دانه، پس از حذف اثرات حاشیه‌ای بوته‌های ۲ ردیف وسط هر کرت برداشت و پس از خشک شدن در هوای آزاد، وزن آن‌ها تعیین شد. شاخص برداشت با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد.

$$\text{معادله (۳)} \quad 100 \times (\text{زیست‌توده} / \text{وزن دانه}) = \text{شاخص برداشت}$$

تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab16 صورت پذیرفت و مقایسه میانگین صفات با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد انجام پذیرفت.

نتایج و بحث

اثر تیمارهای تغذیه‌ای، ژنوتیپ‌های نخود کابلی و برهمکنش آن‌ها بر ویژگی‌های مورد مطالعه در رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی برهمکنش اثر تیمارهای تغذیه بر مقدار کلروفیل a در ژنوتیپ ILC72 نشان داد که بیشترین مقدار این ویژگی در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی و پرایمینگ بذر حاصل شد (جدول ۳). بیشترین مقدار کلروفیل a در ژنوتیپ MCC463 در تیمار استفاده از کودهای زیستی حاصل شد که در مقایسه با تیمار شاهد ۳ برابر بیشتر بود (جدول ۳). غلظت کلروفیل a در ژنوتیپ MCC741 بین تیمارهای مختلف اختلاف بارزی مشاهده نشد. با این وجود تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی نسبت به سایر تیمارها برتر بود (جدول ۳). در ژنوتیپ ILC8617 غلظت کلروفیل a در تمامی تیمارها نسبت به شاهد برتر بودند و تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی بیشترین مقدار این ویژگی را دارا بود و نسبت به شاهد ۵۴ درصد تفاوت داشت (جدول ۳). در ژنوتیپ FLIP02-51 نیز تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی بیشترین غلظت کلروفیل a را دارا بود (جدول ۳). در میان تمام تیمارهای مورد بررسی تیمار کاربرد باکتری‌های در ژنوتیپ MCC463 دارای بیشترین میزان کلروفیل a بود (جدول ۳).

درصد گلدهی انجام شد و محلول‌پاشی با پتاسیم (یک در هزار) و سیلیکون (۱/۵ در هزار) در مرحله ۵۰ درصد گلدهی انجام شد. مواد مورد استفاده این پژوهش از شرکت دانش‌بنیان خوشه پروران زیست فناوری (دایان) تهیه گردید. جهت پرایمینگ بذر از ترکیب اسید سالیسیلیک (آبنوش بذر دایان) به مدت پنج ساعت استفاده شد.

قبل از آماده‌سازی زمین، از خاک مزرعه جهت تعیین میزان عناصر موجود شامل نیتروژن، فسفر و پتاسیم نمونه‌برداری شد (جدول ۱). در اوایل اسفندماه ۱۳۹۷ عملیات آماده‌سازی زمین انجام شد. سپس باکتری‌ها در سطح محلول‌پاشی و با خاک مخلوط گردید. در ادامه جوی و پشته‌ها به فاصله ۵۰ سانتی‌متر ایجاد شد و بذرها با تراکم ۳۰ بوته در مترمربع در عمق دو سانتی‌متری کشت گردید. هر کرت شامل چهار ردیف ۳ متری بود و بین دو تکرار نیز ۲ متر فاصله لحاظ شد. بلافاصله پس از کاشت و همچنین در مرحله گلدهی یک آبیاری تکمیلی آبیاری انجام شد. جهت ممانعت از اثر علف‌کش بر کودهای زیستی، کنترل علف‌های هرز به‌صورت دستی انجام شد.

در مرحله ۵۰ درصد گلدهی میزان رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی اندازه‌گیری گردید. به منظور اندازه‌گیری رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی از روش سوکران و همکاران (۳۲) استفاده شد. برای این منظور ۱۰۰ میلی گرم برگ تازه از برگ‌های جوان کاملاً توسعه‌یافته استفاده و رنگ دانه‌ها با استفاده از اتانول ۹۶ درصد استخراج شدند. میزان جذب با استفاده از اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۴۸ و ۶۶۴ نانومتر انجام شد. بر اساس معادله‌های (۱ و ۲) غلظت کلروفیل‌های a و b محاسبه گردید. به منظور اندازه‌گیری غلظت رنگ‌دانه‌ها از جمع غلظت کلروفیل برگ استفاده شد. همچنین نسبت کلروفیل a به b نیز محاسبه گردید.

$$\text{معادله (۱)} \quad \text{Chla} = 13.36 \times A_{664} - 5.19 \times A_{648}$$

$$\text{معادله (۲)} \quad \text{Chlb} = 27.43 A_{648} - 8.12 A_{664}$$

در مرحله گلدهی، سطح سبز گیاه توسط دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل Delta-T، کشور انگلستان) با استفاده از ۵ بوته تعیین شد. در انتهای فصل رشد قبل از برداشت، صفات مورفولوژیک نظیر ارتفاع بوته، ارتفاع اولین غلاف و تعداد شاخه‌های فرعی ثبت شدند. اجزای عملکرد شامل تعداد غلاف در بوته، درصد غلاف بارور،

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متری)

Table 1- Selected physicochemical properties of the study soil (0-30 cm)

بافت	Electrical conductivity	pH	Available potassium	Available phosphorus	Total nitrogen	Organic carbon
Texture	هدایت الکتریکی		پتاسیم قابل دسترس	فسفر قابل دسترس	نیتروژن کل	کربن آلی
	(dS.m ⁻¹)		(mg.kg ⁻¹)	(mg.kg ⁻¹)	(%)	(%)
Laom	1.2	7.41	120	12	0.08	0.51

جدول ۲- منابع تغییر، درجه آزادی و سطح احتمال اثر برنامه‌های تغذیه‌ای بر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی ژنوتیپ‌های نخود کابلی
Table 2- Source of variation, degree of freedom and probability levels of effect of nutrition programs on photosynthesis pigment in chickpea genotypes

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل a/b Chlorophyll a/b	کل رنگ‌دانه‌ها Total pigments
Block بلوک	2	0.89 ^{ns}	0.267 ^{ns}	0.039 [*]	0.141 ^{ns}
Nutrition program (N) برنامه غذایی	4	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}
Error a خطای فرعی	8				
Genotype (G) ژنوتیپ	4	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.0013 ^{**}
N×G	16	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}
Error خطا	40				
CV% ضریب تغییرات		14.63	16.32	4.81	16.80

ns: به ترتیب غیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، *، ** معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. CV: ضریب تغییرات

Ns: no Significant at probability level of 5%, * and **: Significant at probability level of 5 and 1%, CV: Coefficient of Variation.

جدول ۳- تأثیر برنامه غذایی بر رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در ژنوتیپ‌های نخود کابلی
Table 3- Effect of nutrition programs on photosynthesis pigment in chickpea genotypes

صفات Parameters	برنامه غذایی Nutrition program	ILC72	MCC463	MCC741	ILC8617	FLIP02-51
کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gFW ⁻¹)	Control	0.181 ^{b-f}	0.164 ^{c-f}	0.153 ^{d-f}	0.127 ^f	0.181 ^{b-f}
	BF	0.182 ^{b-f}	0.502 ^a	0.154 ^{d-f}	0.163 ^{c-f}	0.172 ^{c-f}
	P+BF	0.205 ^{b-e}	0.196 ^{b-e}	0.164 ^{c-f}	0.180 ^{b-f}	0.219 ^{b-d}
	BF+F	0.145 ^{ef}	0.182 ^{b-f}	0.163 ^{c-f}	0.196 ^{b-e}	0.243 ^b
	P+BF+F	0.230 ^{bc}	0.142 ^{ef}	0.144 ^{ef}	0.162 ^{d-f}	0.166 ^{c-f}
کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gFW ⁻¹)	Control	0.413 ^{b-d}	0.457 ^{b-d}	0.349 ^{b-d}	0.296 ^d	0.445 ^{b-d}
	BF	0.462 ^{b-d}	0.540 ^{a-c}	0.375 ^{b-d}	0.445 ^{b-d}	0.422 ^{b-d}
	P+BF	0.530 ^{a-c}	0.526 ^{a-c}	0.390 ^{b-d}	0.450 ^{b-d}	0.536 ^{a-c}
	BF+F	0.356 ^{b-d}	0.383 ^{b-d}	0.371 ^{b-d}	0.495 ^{a-d}	0.700 ^a
	P+BF+F	0.552 ^{ab}	0.332 ^{cd}	0.349 ^{b-d}	0.373 ^{b-d}	0.426 ^{b-d}
کلروفیل a/b Chlorophyll a/b	Control	0.439 ^{bc}	0.360 ^{de}	0.440 ^{bc}	0.429 ^{bc}	0.410 ^{b-e}
	BF	0.403 ^{b-e}	0.923 ^a	0.411 ^{b-e}	0.354 ^e	0.402 ^{b-e}
	P+BF	0.389 ^{c-e}	0.421 ^{bc}	0.421 ^{bc}	0.403 ^{b-e}	0.401 ^{b-e}
	BF+F	0.411 ^{b-e}	0.420 ^{bc}	0.457 ^b	0.399 ^{b-e}	0.453 ^b
	P+BF+F	0.423 ^{bc}	0.431 ^{bc}	0.413 ^{b-e}	0.417 ^{b-d}	0.390 ^{c-e}
کل رنگ‌دانه‌ها Total pigments (mg.gFW ⁻¹)	Control	0.594 ^{b-d}	0.621 ^{b-d}	0.503 ^{b-d}	0.423 ^d	0.626 ^{b-d}
	BF	0.639 ^{b-d}	0.754 ^{a-c}	0.528 ^{b-d}	0.608 ^{b-d}	0.601 ^{b-d}
	P+BF	0.735 ^{a-c}	0.676 ^{b-d}	0.554 ^{b-d}	0.631 ^{b-d}	0.755 ^{a-c}
	BF+F	0.502 ^{b-d}	0.549 ^{b-d}	0.534 ^{b-d}	0.691 ^{b-d}	1.002 ^a
	P+BF+F	0.784 ^{ab}	0.475 ^{cd}	0.493 ^{b-d}	0.535 ^{b-d}	0.592 ^{b-d}

پرایمینگ (P)، کود زیستی (BF) و محلول‌پاشی (F). میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر صفت در سطح احتمال پنج درصد بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) تفاوت معنی‌داری ندارند. MCC: کلکسیون نخود مشهد (بانک بذر نخود پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد).

Priming (P), Biofertilizer (BF), Folaria application (F). Means with at least one similar letter are not significantly different ($P \leq 0.05$) based on last significant difference test (LSD). MCC: Mashhad Chickpea Collection.

حاصل شد که نسبت به تیمار شاهد ۳۲ درصد بیشتر بود، از طرفی در سایر تیمارها تفاوت معنی‌دار نبود (جدول ۳). در ژنوتیپ MCC463 غلظت کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در تیمار کاربرد باکتری‌ها به‌تنهایی ۲۱ درصد نسبت به شاهد بیشتر بود و تیمار کاربرد باکتری‌ها و محلول‌پاشی و تیمار پرایمینگ بذر و کاربرد باکتری‌های همراه با محلول‌پاشی مقدار کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی کمتری نسبت به شاهد داشتند (جدول ۳). در ژنوتیپ MCC741 تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای مختلف از نظر مقدار کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی مشاهده نشد (جدول ۳). بررسی نتایج به‌دست‌آمده در ژنوتیپ ILC8617 نشان داد غلظت کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در همه تیمارهای تغذیه‌ای نسبت به شاهد روند افزایشی داشت که بیشترین افزایش در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی مشاهده شد که حدود ۶۳ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت (جدول ۳). در ژنوتیپ FLIP02-51 غلظت کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی نسبت به تمام تیمارهای تغذیه‌ای در همه ژنوتیپ‌ها بیشتر بود و نسبت به شاهد در همین ژنوتیپ ۶۰ درصد افزایش نشان داد (جدول ۳).

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به نظر می‌رسد تیمار کاربرد باکتری‌ها و تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با پرایمینگ در ژنوتیپ‌های نخود کابلی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته همراه با تیمارهای باکتری همراه با محلول‌پاشی و تیمار باکتری همراه با محلول‌پاشی و پرایمینگ بذر تأثیر بهتری در تولید رنگیزه‌های فتوسنتزی دارد هرچند که در بعضی از ژنوتیپ‌ها نتایج متفاوت به دست آمد که به نظر می‌رسد تفاوتی که از نظر ژنتیکی در ژنوتیپ‌های مختلف وجود دارد. یکی از دلایل بالا بودن میزان کلروفیل در تیمارهای تلقیح شده را می‌توان تولید سیدروسفوره‌های تولید شده توسط باکتری‌های زیستی دانست. نتیجه مشابهی توسط پژوهشگران گزارش شده است که در آن تلقیح سویه‌های باکتری آزوسپریلیوم باعث افزایش هدایت روزنه‌ای و میزان کلروفیل کل شد، چرا که نیتروژن در ساختمان کلروفیل شرکت می‌کند و غلظت کلروفیل بستگی به مقدار نیتروژن دریافتی دارد (۳). در تیمارهای دارای باکتری، شاخص کلروفیل به‌طور معنی‌داری نسبت به گیاهان بدون باکتری افزایش یافت که با گزارش دیگر پژوهشگران مطابقت داشت (۲۷). آنان گزارش کردند که در گیاهان سبز اغلب میان سطح آهن و مقدار کلروفیل همبستگی مثبتی وجود دارد و گیاهانی که به‌خوبی از آهن برخوردارند دارای کلروفیل بیشتری هستند. همچنین پژوهشگران بیان کردند که محتوای کلروفیل و کاروتنوئیدهای گیاهان، تحت تنش‌های زیستی کاهش پیدا می‌کند (۲۵). اثرات مثبت اسید سالیسیلیک به افزایش آسیمیلاسیون و درصد فتوسنتز و افزایش جذب مواد معدنی توسط گیاهان تنش دیده تحت تیمار اسید

غلظت کلروفیل b در ژنوتیپ ILC72 در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی و پرایمینگ بذر بیشتر از سایر تیمارها بود و نسبت به شاهد ۳۴ درصد غلظت بیشتری داشت. در ژنوتیپ MCC463 تیمار کاربرد باکتری‌های و پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌ها از نظر غلظت کلروفیل b از سایر تیمارها برتر بودند به‌طوری‌که نسبت به شاهد به ترتیب ۱۸ و ۱۵ درصد کلروفیل b بیشتری داشتند. در ژنوتیپ MCC741 بین تیمارها تفاوت معنی‌داری از نظر غلظت کلروفیل b مشاهده نشد (جدول ۳). غلظت کلروفیل b در ژنوتیپ‌های ILC8617 و FLIP02-51 در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی بیشتر از سایر تیمارها بود به‌طوری‌که نسبت به شاهد به ترتیب ۶۷ و ۵۷ درصد کلروفیل b بیشتری داشتند و از طرفی در ژنوتیپ FLIP02-51 در این تیمار نسبت کل تیمارهای مورد مطالعه در این آزمایش غلظت کلروفیل b بیشتری داشت (جدول ۳).

با توجه به اینکه روند تغییرات غلظت کلروفیل a و b که در بعضی از ژنوتیپ‌ها افزایشی و در بعضی دیگر کاهش‌ی بود به نظر می‌رسد تأثیر پرایمینگ بذر و کودهای زیستی با توجه به نوع ژنوتیپ می‌تواند متفاوت باشد. نیتروژن یکی از عناصر اصلی در تغذیه گیاهان است (۲۸). به نظر می‌رسد در تیمارهای تغذیه‌ای کود زیستی با تثبیت بیولوژیکی نیتروژن در طی مرحله رویش گیاه منجر به افزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی شده و نهایتاً باعث افزایش معنی‌داری کلروفیل a و b در تیمارهای یاد شده گردید و از آنجایی که نیتروژن در ساختار کلروفیل دخالت دارد؛ بنابراین هر چه غلظت نیتروژن در برگ‌ها افزایش یابد میزان تثبیت کربن نیز بیشتر می‌شود. زیرا نیتروژن علاوه بر آن که به‌صورت پروتئین در گیاه وجود دارد عنصر اصلی تشکیل‌دهنده کلروفیل در گیاه است و عامل اصلی در تثبیت کربن محسوب می‌شود (۳۷). احتمالاً فراهم بودن نیتروژن در تیمارهای کودهای زیستی که پتانسیل تثبیت نیتروژن قابل‌دسترس بیشتری داشته‌اند دلیل افزایش غلظت کلروفیل برگ باشد.

برهمکنش اثر تیمارهای تغذیه‌ای بر نسبت کلروفیل a/b نشان داد که در میان ژنوتیپ‌ها، MCC463 در تیمار کاربرد باکتری‌ها بیشترین نسبت کلروفیل a/b را دارا بود به‌طوری‌که این ویژگی نسبت به تیمار شاهد خود ۲/۶ برابر بیشتر بود. از طرف دیگر در ژنوتیپ ILC8617 در تیمار کاربرد باکتری‌ها نسبت به شاهد کاهش معنی‌داری در نسبت مشاهده کلروفیل a/b شد و در سایر ژنوتیپ‌ها از این نظر تفاوت معنی‌داری بین تیمارها مشاهده نشد (جدول ۳).

اثر برنامه غذایی، ژنوتیپ‌ها و برهمکنش این دو عامل بر غلظت کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی برهمکنش تیمارهای مختلف تغذیه بر مقدار کل رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی در ژنوتیپ ILC72 نشان داد که بیشترین مقدار این ویژگی در تیمار پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌ها و محلول‌پاشی

کمترین ارتفاع بوته ۳ سانتی متر اختلاف ارتفاع مشاهده شد (شکل ۱). افزایش ارتفاع نخود از طریق زیاد شدن فاصله اولین گره بارور از سطح خاک امکان پذیر می شود (۲۱). در پژوهش مشابهی کاربرد کود زیستی نیتروکسین موجب افزایش ارتفاع بوته در گیاه کنجد (*Sesamum indicum*) شد (۱۸).

شاخص سطح سبز تحت تأثیر معنی دار برهمکنش برنامه های تغذیه ای و ژنوتیپ های نخود کابلی مورد مطالعه قرار گرفت (جدول ۴). میزان شاخص سطح سبز در تمام ژنوتیپ ها به جز ژنوتیپ ILC8617 در تیمار کاربرد باکتری ها و پرایمینگ بذر بیشتر از سایر تیمارها بود. در ژنوتیپ ILC8617 تیمار کاربرد باکتری ها همراه با محلول پاشی بیشترین شاخص سطح سبز را دارا بودند با این وجود تفاوت معنی دار با تیمار کاربرد باکتری ها و پرایمینگ بذر از این نظر نداشت (جدول ۶).

سالیسیلیک نسبت داده شده است (۳۳). در پژوهشی دیگر (۵) استفاده از تیمار سالیسیلیک، موجب افزایش توان آنتی اکسیدانی بابونه (*Matricaria achamomilla*) از جمله کاروتنوئیدها موجب کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و مقدار H_2O_2 و حفاظت بیشتر از غشاهای سلولی و فتوسنتزی و رنگیزه های فتوسنتزی شده و از کاتابولیسم کلروفیل جلوگیری می کند.

برنامه های تغذیه ای و ژنوتیپ ها تفاوت معنی داری از نظر ارتفاع بوته داشتند ولی برهمکنش آن ها معنی دار نبود (جدول ۴). ژنوتیپ MCC741 دارای بیشترین ارتفاع بوته بود ولی با سه ژنوتیپ FLIP02-51، ILC8617 و MCC463 تفاوت معنی داری نداشت، کمترین ارتفاع بوته در ژنوتیپ ILC72 مشاهده شد که نسبت به بیشترین ارتفاع بوته ۴ سانتی متر تفاوت وجود داشت (شکل ۱). در میان برنامه های تغذیه ای تیمار کاربرد کودهای زیستی همراه با پرایمینگ بذر و تیمار شاهد بیشترین ارتفاع بوته را دارا بودند که با

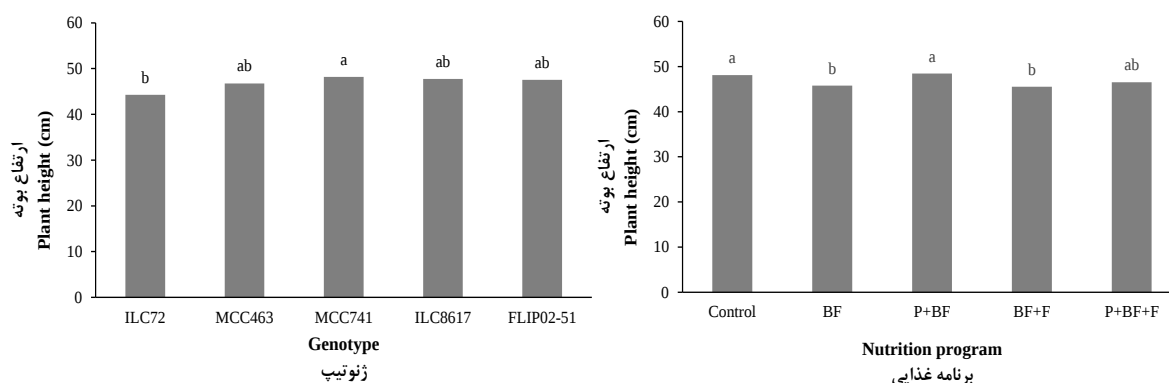
جدول ۴- منابع تغییر، درجه آزادی و سطح احتمال اثر برنامه تغذیه ای بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ های نخود کابلی

Table 4- Source of variation, degree of freedom and probability levels of effect of nutrition programs on measured traits of Kabuli chickpea genotypes

S.O.V منابع تغییرات	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	شاخص سطح سبز GAI	ارتفاع اولین غلاف Lowest pod height	تعداد شاخه Branch no.	تعداد غلاف در بوته Pod no. plant ⁻¹
Block بلوک	2	0.168 ^{ns}	0.168 ^{ns}	0.877 ^{ns}	0.150 ^{ns}	0.651 ^{ns}
Nutrition program (N) برنامه غذایی	4	0.080*	0.019*	0.245 ^{ns}	0.678 ^{ns}	0.014*
Error a خطای فرعی	8					
Genotype (G) ژنوتیپ	4	0.167*	0.001**	0.249 ^{ns}	0.014 ^{ns}	0.014*
N×G	16	0.161 ^{ns}	0.001**	0.565 ^{ns}	0.994 ^{ns}	0.053*
Error خطا	40					
CV% ضریب تغییرات		8.52	28.62	20.27	20.47	26.85

ns, *, ** به ترتیب غیر معنی دار در سطح احتمال پنج درصد، معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. CV: ضریب تغییرات

Ns: no significant at probability level of 5%, * and **: significant at probability level of 5 and 1%, CV: Coefficient of Variation.



شکل ۱- اثر ژنوتیپ و برنامه های تغذیه ای بر ارتفاع بوته در نخود کابلی

Figure 1- Effect of genotype and nutrition program on plant height in chickpea Kabuli genotypes

پرایمینگ (P)، کود زیستی (BF)، محلول پاشی (F)، MCC: کلکسیون نخود مشهد (بانک بذر نخود پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد).

Priming (P), Biofertilizer (BF), Folaria application (F). MCC: Mashhad Chickpea Collection.

همراه با محلول‌پاشی مشاهده شد که نسبت به شاهد به ترتیب ۸۸ و ۳۰ درصد غلاف بیشتری تولید کردند. در دو ژنوتیپ MCC741 و ILC8617 تیمار کاربرد باکتری‌ها نسبت به سایر تیمارها برتر بودند و نسبت به شاهد به ترتیب ۵۸ و ۸۹ درصد غلاف بیشتری تولید کردند (جدول ۶).

تعداد غلاف در بوته یکی از اجزای مهم عملکرد می‌باشد، زیرا غلاف از یک طرف در برگ‌برنده تعداد دانه بوده و از طرف دیگر تأمین‌کننده مواد فتوسنتزی مورد نیاز برای دانه‌ها می‌باشد. به‌طوری‌که تعداد غلاف بیشتر اغلب منجر به افزایش عملکرد نهایی در حبوبات می‌شود. در این پژوهش، ژنوتیپ‌های MCC463 و FLIP02-51 در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی و ژنوتیپ‌های MCC741 و ILC8617 در تیمار کاربرد باکتری‌ها در مقایسه با سایر تیمارها تعداد غلاف در بوته بیشتری تولید کردند. مصرف تلفیقی کودهای زیستی همراه با محلول‌پاشی می‌تواند به‌واسطه تأمین عناصر غذایی زمینه لازم برای رشد بهتر ریشه و جذب آب را فراهم کند و این امر موجب افزایش رشد رویشی و واحدهای زایشی گردد. استفاده از کودهای زیستی نیتروکسین، بیوسفر (مجموعه‌ای از باکتری‌های حل‌کننده فسفات) و بیوسولفور (حاوی باکتری‌هایی از جنس تیوباسیلوس) سبب افزایش معنی‌دار تعداد کپسول در بوته کنگد گردید (۱۳). همچنین محلول‌پاشی لوبیا با سالیسیک اسید موجب افزایش ۴۸/۸ درصدی تعداد غلاف در بوته شد (۱۰).

صفت شاخص سطح سبز در بوته بیشتر تحت تأثیر سطوح کودهای زیستی باکتری‌ها و پرایمینگ بذر قرار گرفت و به نظر می‌رسد که این جزء در مقایسه با اجزای دیگر از انعطاف‌پذیری بالاتری در برابر نوسانات شرایط محیطی برخوردار باشد. در این راستا گزارش شده است که تلقیح گیاه با باکتری محرک رشد، سبب بهبود رشد گیاه می‌شود (۱۶). محلول‌پاشی توسط جلبک دریایی بر کلزا (*Brassica anapus*) باعث افزایش رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی و افزایش فسفر و پتاسیم محتوای برگ در نتیجه افزایش سطح سبز گیاهان شد (۳۰). به نظر می‌رسد تیمارهای کاربرد باکتری همراه با پرایمینگ و محلول‌پاشی با اسیدآمینه از طریق پیامدهای مثبت فیزیولوژیکی از جمله افزایش متابولیسم درون سلول‌ها و همچنین افزایش میزان کلروفیل در برگ‌ها، سبب ماندگاری بیشتر برگ‌ها شده و در نتیجه بر میزان سطح سبز گیاه نخود تأثیر گذاشته است. برنامه‌های تغذیه‌ای تأثیر معنی‌داری بر ارتفاع اولین غلاف از سطح خاک و تعداد شاخه در بوته در ژنوتیپ‌های نخود کابلی مورد مطالعه نداشتند (جدول ۴).

تعداد غلاف در بوته تحت تأثیر معنی‌دار برهمکنش برنامه‌های تغذیه‌ای و ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۵). در ژنوتیپ ILC72 تعداد غلاف در بوته در تیمار شاهد نسبت به تیمارهای تغذیه‌ای بیشتر بود اما تفاوت معنی‌داری با آن‌ها نداشت. در ژنوتیپ‌های MCC463 و FLIP02-51 بیشترین تعداد غلاف در بوته در تیمار کاربرد باکتری‌ها

جدول ۵- منابع تغییر، درجه آزادی و سطح احتمال اثر برنامه تغذیه‌ای بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های نخود کابلی

Table 5- Source of variation, degree of freedom and probability levels of effect of nutrition programs on measured traits of Kabuli chickpea genotypes

شاخص برداشت	عملکرد دانه	زیست‌توده	وزن صد دانه	تعداد دانه در غلاف	درجه آزادی	S.O.V منابع تغییرات
Harvest Index	Grain yield	Biological yield	100- grain weight	Grain. Pod ⁻¹	df	
0.574 ^{ns}	0.457 ^{ns}	0.045 ^{ns}	0.425 ^{ns}	0.343 ^{ns}	2	Block بلوک
0.113 ^{ns}	0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.523 ^{ns}	0.206 ^{ns}	4	Nutrition program (N) برنامه غذایی
					8	Error a خطای فرعی
0.001 ^{**}	0.003 [*]	0.007 [*]	0.882 ^{ns}	0.201 ^{ns}	4	Genotype (G) ژنوتیپ
0.001 ^{**}	0.001 ^{**}	0.005 [*]	0.407 ^{ns}	0.209 ^{ns}	16	N×G
					40	Error خطا
12.29	18.10	12.46	22.79	25.49		CV% ضریب تغییرات

ns, *, ** به ترتیب غیر معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد. CV: ضریب تغییرات

Ns: no significant at probability level of 5%, * and **: significant at probability level of 5 and 1%, CV: Coefficient of Variation.

جدول ۶- تأثیر برنامه غذایی بر صفات مورد بررسی در ژنوتیپ‌های نخود کابلی

Table 6- Effect of nutrition programs on measured traits in chickpea Kabuli genotypes

صفات Parameters	برنامه غذایی Nutrition program	ILC72	MCC463	MCC741	ILC8617	FLIP02-51
شاخص سطح سبز Green area index	Control	1.187 ^{e-g}	1.107 ^{fg}	1.440 ^{d-g}	1.180 ^{e-g}	1.343 ^{d-g}
	BF	1.790 ^{c-f}	1.593 ^{d-g}	1.563 ^{d-g}	2.870 ^{ab}	1.357 ^{d-g}
	P+BF	2.100 ^{b-d}	2.037 ^{b-e}	3.077 ^a	1.363 ^{d-g}	2.170 ^{b-d}
	BF+F	0.867 ^g	1.907 ^{c-f}	2.587 ^{a-c}	1.633 ^{d-g}	1.467 ^{d-g}
	P+BF+F	1.430 ^{d-g}	1.447 ^{d-g}	1.427 ^{d-g}	0.837 ^g	1.163 ^{e-g}
تعداد غلاف در بوته Pod No. Plant ⁻¹	Control	36.33 ^{a-c}	18.66 ^c	23.00 ^{bc}	25.00 ^{bc}	31.66 ^{a-c}
	BF	30.00 ^{a-c}	31.00 ^{a-c}	36.33 ^{a-c}	47.33 ^a	26.33 ^{bc}
	P+BF	28.33 ^{a-c}	18.33 ^c	25.00 ^{bc}	34.00 ^{a-c}	29.33 ^{a-c}
	BF+F	27.33 ^{a-c}	35.00 ^{a-c}	23.33 ^{bc}	37.00 ^{a-c}	41.00 ^{ab}
	P+BF+F	25.33 ^{bc}	26.00 ^{bc}	25.00 ^{bc}	32.33 ^{a-c}	21.33 ^{bc}
عملکرد دانه Grain yield (g.m ⁻²)	Control	91 ^{de}	122 ^{a-e}	78 ^e	122 ^{a-e}	137 ^{a-d}
	BF	122 ^{a-e}	110 ^{a-e}	159 ^a	116 ^{a-e}	154 ^{ab}
	P+BF	102 ^{b-e}	75 ^e	107 ^{a-e}	156 ^{ab}	117 ^{a-e}
	BF+F	85 ^{de}	74 ^e	95 ^{c-e}	149 ^{a-c}	95 ^{c-e}
	P+BF+F	123 ^{a-e}	127 ^{a-e}	99 ^{c-e}	117 ^{a-e}	107 ^{a-e}
زیست‌توده Biological yield (g.m ⁻²)	Control	241 ^{h-j}	286 ^{d-g}	269 ^{e-i}	307 ^{b-e}	318 ^{b-d}
	BF	285 ^{d-h}	238 ^{ij}	327 ^{b-d}	302 ^{b-e}	332 ^{bc}
	P+BF	302 ^{b-e}	251 ^{f-j}	291 ^{c-f}	346 ^{ab}	335 ^{bc}
	BF+F	184 ^k	245 ^{g-j}	240 ^{h-j}	383 ^a	263 ^{e-j}
	P+BF+F	222 ^{jk}	266 ^{e-j}	228 ^{h-k}	325 ^{b-d}	290 ^{c-g}
شاخص برداشت Harvest Index (%)	Control	38.33 ^{a-c}	43.00 ^{a-c}	28.66 ^c	39.33 ^{a-c}	43.00 ^{a-c}
	BF	44.00 ^{a-c}	46.66 ^{a-c}	47.66 ^{ab}	38.33 ^{a-c}	46.00 ^{a-c}
	P+BF	33.66 ^{bc}	30.00 ^{bc}	37.00 ^{bc}	45.00 ^{a-c}	34.66 ^{bc}
	BF+F	46.33 ^{a-c}	31.33 ^{bc}	39.33 ^{a-c}	39.00 ^{a-c}	36.33 ^{bc}
	P+BF+F	55.66 ^a	48.33 ^{ab}	43.00 ^{a-c}	36.00 ^{bc}	37.00 ^{bc}

پرایمینگ (P)، کود زیستی (BF) و محلول‌پاشی (F). میانگین‌های دارای حروف مشابه در هر صفت در سطح احتمال ۵ درصد بر اساس آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) تفاوت معنی‌داری ندارند. MCC: کلکسیون نخود مشهد (بانک بذر نخود پژوهشکده علوم گیاهی دانشگاه فردوسی مشهد).

Priming (P), Biofertilizer (BF), Folaria application (F). Means with at least one similar letter are not significantly different ($P \leq 0.05$) based on last significant difference test (LSD). MCC: Mashhad Chickpea Collection.

باکتری‌های به‌تنهایی بالاترین مقدار زیست‌توده را تولید کردند و به ترتیب نسبت به شاهد ۵ و ۴ درصد نسبت به شاهد برتر بودند (جدول ۶).

از آنجاکه کاربرد کودهای زیستی امکان دسترسی به عناصر غذایی برای گیاه را فراهم می‌کند این عناصر به رشد سریع گیاه کمک خواهند کرد. گیاهان قادرند از اسیدهای آمینه به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند (۶). این ترکیب‌ها در وضعیت آزاد همچون ذرات باردار عمل کرده و وقتی وارد سلول گیاهی می‌شوند، به‌واسطه خلوص بالا وارد فرآیندهای متابولیکی می‌شوند (۳۴). تأثیر مثبت کاربرد اسیدهای آمینه به‌عنوان تنظیم‌کننده‌های رشد بر تولید گیاهان توسط پژوهشگران گزارش شده است (۹ و ۱۹). از نتایج حاضر می‌توان چنین استنباط کرد که پرایمینگ بذر، کاربرد کودهای زیستی و محلول‌پاشی با تسریع در سبز شدن، افزایش تثبیت نیتروژن و حلالیت فسفر و پتاسیم خاک و بهبود فرآیندهای رشد در گیاه با ترکیب‌های ضد تنش باعث افزایش زیست‌توده گیاه در نخود شده است. عملکرد دانه نخود به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی در این مطالعه تحت

برنامه‌های تغذیه‌ای تأثیر معنی‌داری بر تعداد دانه در غلاف و همچنین وزن صد دانه در ژنوتیپ‌های نخود کابلی مورد مطالعه نداشتند (جدول ۵).

برهمکنش تیمارهای تغذیه‌ای و ژنوتیپ‌ها از نظر زیست‌توده معنی‌دار بود (جدول ۵). در ژنوتیپ ILC72 بیشترین میزان زیست‌توده در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با پرایمینگ بذر حاصل شد که نسبت به شاهد ۲۵ درصد افزایش نشان داد. در این ژنوتیپ سایر تیمارهای تغذیه‌ای به‌جز تیمار کاربرد باکتری‌های همراه با محلول‌پاشی از شاهد برتر بودند. در ژنوتیپ MCC463 هیچ یک از تیمارهای تغذیه‌ای نتوانستند موجب افزایش میزان زیست‌توده گردند. در ژنوتیپ MCC741 تیمار کاربرد باکتری‌ها از نظر میزان زیست‌توده از سایر تیمارها برتر بود و نسبت به شاهد ۲۲ درصد زیست‌توده بیشتری تولید کرد. میزان زیست‌توده در ژنوتیپ ILC8617 در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی از سایر تیمارها بیشتر بود و نسبت به شاهد ۲۵ درصد زیست‌توده بیشتری داشت. در ژنوتیپ FLIP02-51 تیمارهای کاربرد باکتری‌ها همراه با پرایمینگ بذر و کاربرد

تیمارهای نیز شاخص برداشت بالاتری در این ژنوتیپ برخوردار بود. کاربرد باکتری‌ها به تنهایی موجب افزایش شاخص برداشت نسبت به سایر تیمارها در ژنوتیپ FLIP02-51 شد که این برتری نسبت به شاهد ۳ درصد بود (جدول ۶).

تغییرات در شاخص برداشت گیاهان دانه‌ای، نشان‌دهنده تغییر در الگوی توزیع مواد فتوسنتزی بین اندام‌های رویشی و زایشی است (۳۵). بالاتر بودن شاخص برداشت حاکی از آن است که مواد فتوسنتزی انتقال یافته به دانه‌ها نسبت به مواد فتوسنتزی باقی‌مانده در برگ‌ها و ساقه بیشتر است (۲۱). بنابراین برتری بعضی از ژنوتیپ‌ها از نظر شاخص برداشت در این آزمایش می‌تواند نشان‌دهنده کارایی بیشتر یک ژنوتیپ از لحاظ ژنتیکی نسبت به ژنوتیپ دیگر در انتقال مواد پرورده به دانه‌ها باشد. با توجه به افزایش عملکرد دانه و افزایش عملکرد بیولوژیک در تیمارهای تغذیه زیستی افزایش شاخص برداشت در این تیمارها منطقی به نظر می‌رسد و از تفسیر نتایج این پژوهش، چنین استنباط می‌شود که عناصر تغذیه زیستی می‌تواند در افزایش عملکرد و ارتقای سطح تولید نخود مؤثر باشد. به نظر می‌رسد که تولید ماده خشک کمتر و درعین حال کاهش ناچیز عملکرد دانه در ترکیب تأثیر ژنوتیپ به همراه عناصر تغذیه‌ای زیستی سبب افزایش عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک و به دنبال آن افزایش شاخص برداشت این تیمارها شده است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی نتایج نشان داد که تیمارهای تغذیه‌ای بر میزان رشد و عملکرد ژنوتیپ‌های مورد مطالعه مؤثر است و هر ژنوتیپ واکنش متفاوتی به تیمارهای تغذیه‌ای نشان داد. با این وجود از نظر عملکرد دو ژنوتیپ ILC72 و MCC463 واکنش بهتری به تیمار پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌ها و محلول‌پاشی و ژنوتیپ‌های ILC8617 و FLIP02-51 در تیمار کاربرد باکتری‌ها به‌تنهایی و ژنوتیپ ILC8617 در تیمار پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌ها از عملکرد بالاتری نسبت به سایر تیمارها برخوردار بودند. به نظر می‌رسد علی‌رغم تأثیر مثبت کودهای زیستی تا حدی خصوصیات ژنتیکی و نوع ژنوتیپ در رشد و عملکرد گیاه تأثیرگذار بوده؛ بنابراین با توجه به رفتار متفاوت ژنوتیپ‌ها برای بهره‌گیری حداکثر از عناصر تغذیه‌ای و دستیابی به عملکرد بالا انتخاب مناسب ژنوتیپ متناسب با هر منطقه ضروری می‌باشد. در کل با توجه به عملکردهای برداشت شده می‌توان از این پژوهش چنین نتیجه گرفت که مصرف عناصر تغذیه‌ای زیستی موجب بهبود رشد و به تبع آن افزایش عملکرد گیاه نخود و همچنین از طرفی دیگر سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی رایج گردیده و در نتیجه آن سبب کاهش هزینه‌ها، حفظ سلامت خاک و تولیدات کشاورزی و همچنین کاهش آلودگی

تأثیر برهمکنش معنی‌دار تیمارهای تغذیه‌ای و ژنوتیپ قرار گرفت (جدول ۵). در دو ژنوتیپ ILC72 و MCC463 تیمار پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌های و محلول‌پاشی بیشترین عملکرد دانه را به خود اختصاص داد به‌طوری‌که در این دو ژنوتیپ عملکرد دانه نسبت به شاهد به ترتیب ۳۵ و ۴ درصد (۳۲۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار) افزایش عملکرد مشاهده شد. در ژنوتیپ MCC741 تیمار کاربرد باکتری‌ها به‌تنهایی موجب افزایش ۲ برابری (۸۱۰ کیلوگرم در هکتار) عملکرد دانه نسبت به شاهد شد. عملکرد دانه در ژنوتیپ ILC8617 در تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با پرایمینگ بذر نسبت به سایر تیمارها در این ژنوتیپ بیشتر بود و نسبت به شاهد ۲۸ درصد (۳۴۰ کیلوگرم در هکتار) افزایش نشان داد در این ژنوتیپ تیمار کاربرد باکتری‌ها همراه با محلول‌پاشی نیز از برتری قابل‌توجهی نسبت به شاهد (۲۲ درصد، ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار) برخوردار بود. در ژنوتیپ FLIP02-51 تیمار کاربرد باکتری‌ها موجب افزایش ۱۲ درصدی (۱۷۰ کیلوگرم در هکتار) نسبت به شاهد گردید (جدول ۶).

در مطالعه ارزیابی بخشی از مجموعه ژرم پلاسما نخود بانک بذر دانشگاه فردوسی مشهد، تفاوت‌های قابل‌ملاحظه‌ای از نظر خصوصیات زراعی، مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی گزارش شده است (۲۴). در مطالعه حاضر باوجود تنوع ژنتیکی بین ژنوتیپ‌ها به نظر می‌رسد بیشتر ژنوتیپ‌ها واکنش قابل‌قبولی به برنامه‌های تغذیه‌ای نشان دادند. بهبود شرایط تغذیه برای گیاه موجب افزایش ظرفیت فتوسنتزی و تخصیص بهتر فرآورده‌های فتوسنتزی در جهت افزایش عملکرد می‌شود. در سایر پژوهش‌ها نیز کاربرد کودهای زیستی (ریزوبیوم همراه با میکوریزای آربسکولار) برای گیاه نخود، به‌واسطه افزایش وزن خشک گره در مقایسه با کاربرد تنه‌ای ریزوبیوم توانست منجر به افزایش عملکرد گردد (۳۱). باکتری‌های محرک رشد علاوه بر بهبود شرایط تغذیه با تولید مقادیر قابل‌ملاحظه‌ای از هورمون‌های تحریک‌کننده رشد به‌ویژه انواع اکسین، جیبرلین و سیتوکینین رشد و نمو و عملکرد گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهند (۳۸).

شاخص برداشت تحت تأثیر معنی‌دار برهمکنش تیمارهای تغذیه و ژنوتیپ‌های نخود کابلی قرار گرفت (جدول ۵). در دو ژنوتیپ ILC72 و MCC463 تیمار پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌های و محلول‌پاشی بیشترین شاخص برداشت را نشان داد که نسبت به شاهد به ترتیب ۱۷ و ۵ درصد شاخص برداشت بیشتری داشتند (جدول ۶). تیمار کاربرد باکتری‌ها به‌تنهایی در ژنوتیپ MCC741 بالاترین شاخص برداشت را نسبت به سایر تیمارها دارا بود و این برتری نسبت به شاهد ۱۹ درصد بود در این ژنوتیپ تمامی تیمارهای کودی شاخص برداشت بیشتری نسبت به شاهد دارا بودند. در ژنوتیپ ILC8617 پرایمینگ بذر همراه با کاربرد باکتری‌ها موجب افزایش ۶ درصدی شاخص برداشت نسبت به شاهد بود و از سایر

زیست محیطی ناشی از مصرف کودهای شیمیایی گردیده است بنابراین می تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی رایج باشد.

منابع

1. Akbari P., Ghalavand A., and Modarres Sanavi S.A.M. 2009. Effects of different nutrition systems (organic, chemical and integrated) and biofertilizer on yield and other growth traits of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Sustainable Agricultural Science 19(1): 85-96. (In Persian with English abstract)
2. Asadi R.H., Khavazi K., Asgharzadeh A., Rejali F., and Afshari M. 2012. Biofertilizers in Iran: Opportunities and challenges. Iranian Journal of Soil Research 26(1): 77-87. (In Persian with English abstract)
3. Biswas J.C., Ladha J.K., Dazzo F.B., Yanni Y.G., and Rolfe B.G. 2000. Rhizobial inoculation influences seedling vigor and yield of rice. Agronomy Journal 92(5): 880-886.
4. Chau C.F., and Cheung P.C.K. 1998. Functional properties of flours prepared from three Chinese indigenous legume seeds. Food Chemistry 61(4): 429-433.
5. Costa M.L., Civello P.M., Chaves A.R., and Martínez G.A. 2005. Effect of ethephon and 6-benzylaminopurine on chlorophyll degrading enzymes and a peroxidase-linked chlorophyll bleaching during post-harvest senescence of broccoli (*Brassica oleracea* L.) at 20 C. Postharvest Biology and Technology 35(2): 191-199.
6. El-Naggar A., de Neergaard A., El-Araby A., and Høgh-Jensen H. 2009. Simultaneous uptake of multiple amino acids by wheat. Journal of Plant Nutrition 32(5): 725-740.
7. 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.
8. Ghassemi-Golezani K., Aliloo A.A., Valizadeh M., and Moghaddam M. 2008. Effects of hydro and osmo-priming on seed germination and field emergence of lentil (*Lens culinaris* Medik.). Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca 36(1): 29-33.
9. Hassanpanah D., Gurbanov E., Gadimov A., and Shahriari R. 2008. Shortening transplantation periods of potato plantlets by use of potassium humate and kadostim and their effects on mini-tuber production. Pakistan Journal of Biological Sciences 11(10): 1370-1374.
10. Hegazi A.M., and El-Shraiy A.M. 2007. Impact of salicylic acid and paclobutrazol exogenous application on the growth, yield and nodule formation of common bean. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 1(4): 834-840.
11. Hu J., Xie X.J., Wang Z.F., and Song W.J. 2006. Sand priming improves alfalfa germination under high-salt concentration stress. Seed Science and Technology 34(1): 199-204.
12. Iran Agriculture Statistics. 2018. Volume I: Crops. Ministry of Jihad-e-Agriculture Iran. (In Persian)
13. Jahan M., Aryaee M., Amiri M., and Ehyae H. 2013. The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on quantitative and qualitative characteristics of *Sesamum indicum* L. with application of cover crops of *Lathyrus* sp. and Persian clover (*Trifolium resopinatum* L.). Journal of Agroecology 5(1): 1-15. (In Persian with English abstract)
14. Kaur M., and Singh N. 2005. Studies on functional, thermal and pasting properties of flours from different chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. Food Chemistry 91(3): 403-411.
15. Kaur S., Gupta A.K., and Kaur N. 2006. Effect of hydro-and osmopriming of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seeds on enzymes of sucrose and nitrogen metabolism in nodules. Plant Growth Regulation 49(2): 177-182.
16. Kaymak H.Ç., Güvenç İ., Yarali F., and Dönmez M.F. 2009. The effects of bio-priming with PGPR on germination of radish (*Raphanus sativus* L.) seeds under saline conditions. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 33(2): 173-179.
17. Khaleghnezhad V.A.H.I.D.E.H., and Jabbari F. 2014. Effect of seed inoculation with Rhizobium and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) on yield and yield components of chickpea in irrigated and rainfed conditions. Journal of Crops Improvement 16(4): 957-972. (In Persian with English abstract)
18. Kumar S., Pandey P., and Maheshwari D.K. 2009. Reduction in dose of chemical fertilizers and growth enhancement of sesame (*Sesamum indicum* L.) with application of rhizospheric competent *Pseudomonas aeruginosa* LES4. European Journal of Soil Biology 45(4): 334-340.
19. Liu X.Q., Ko K.Y., Kim S.H., and Lee K.S. 2007. Effect of amino acid fertilization on nitrate assimilation of leafy radish and soil chemical properties in high nitrate soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 39(1-2): 269-281.
20. Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A.J., Jenkins A., Ferrier R.C., Li H., Luo W., and Wang T. 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. Environment International 77: 5-15.
21. Majnoon Hosseini N., Mohammadi H., Poustini K., and Zeinaly Khanghah H. 2003. Effect of plant density on agronomic characteristics, chlorophyll content and stem remobilization percentage in chickpea cultivars (*Cicer*

- arietinum L.). Iranian Journal Agriculture Science 34(4): 1011-1019. (In Persian with English abstract)
22. Malboubi M.A., and Habibpour Mehraban F. 2018. Agricultural biotechnology and food safety. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 3(1): 103-112.
23. Mohammadi K., and Sohrabi Y. 2012. Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: a review. Journal Agriculture Biological Science 7(5): 307-316.
24. Nezami A., Poramir F., Momeni S., Porsa H., Ganjeali A., and Bagheri A. 2012. Evaluation of a subset of chickpea germplasm collection of Ferdowsi University of Mashhad Seed Bank II. Kabuli type chickpeas. Iranian Journal of Pulses Research 3(1): 17-30. (In Persian with English abstract)
25. Parida A.K., and Das A.B. 2005. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. Ecotoxicology and Environmental Safety 60(3): 324-349.
26. Posmyk M.M., and Janas K.M. 2007. Effects of seed hydropriming in presence of exogenous proline on chilling injury limitation in *Vigna radiata* L. seedlings. Acta Physiologiae Plantarum 29(6): 509-517.
27. Salardini A.A., and Mojtahedi M. 1988. Principles of plant nutrition. Tehran University Center Press. Iran. (In Persian)
28. 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 Crops Research 113(2): 170-177.
29. Selosse M.A., Baudoin E., and Vandenkoornhuysse P. 2004. Symbiotic microorganisms, a key for ecological success and protection of plants. Comptes Rendus Biologies 327(7): 639-648.
30. Shehata S.M., Abdel-Azem H.S., Abou El-Yazied A., and El-Gizawy A.M. 2011. Effect of foliar spraying with amino acids and seaweed extract on growth chemical constituents, yield and its quality of celeriac plant. European Journal of Scientific Research 58(2): 257-265.
31. Solaiman A.R.M., Rabbani M.G., and Molla M.N. 2005. Effects of inoculation of Rhizobium and arbuscular mycorrhiza, poultry litter, nitrogen, and phosphorus on growth and yield in chickpea. Korean Journal of Crop Science 50(4): 256-261.
32. Şükran D.E.R.E., GÜNEŞ T., and Sivaci R. 1998. Spectrophotometric determination of chlorophyll-A, B and total carotenoid contents of some algae species using different solvents. Turkish Journal of Botany 22(1): 13-18.
33. Szepesi Á. 2005. Role of salicylic acid pre-treatment on the acclimation of tomato plants to salt-and osmotic stress. Acta Biologica Szegediensis 49(1-2): 123-125.
34. Thornton B., and Robinson D. 2005. Uptake and assimilation of nitrogen from solutions containing multiple N sources. Plant, Cell and Environment 28(6): 813-821.
35. Unkovich M., Baldock J., and Forbes M. 2010. Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: examples from Australian agriculture. Advances in Agronomy 105: 173-219.
36. Vadivel V., and Janardhanan K. 2001. Nutritional and anti-nutritional attributes of the under-utilized legume, *Cassia floribunda* Cav. Food Chemistry 73(2): 209-215.
37. Walker A.J. 2001. The effects of soil fertilizer, nitrogen and moisture on yield, oil and protein of flaxseed. Field Crop Research 932: 101-114.
38. Zahir Z.A., Ghani U., Naveed M., Nadeem S.M., and Asghar H.N. 2009. Comparative effectiveness of *Pseudomonas* and *Serratia* sp. containing ACC-deaminase for improving growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) under salt-stressed conditions. Archives of Microbiology 191(5): 415-424.



Effect of Bio-Nutrition and Seed Priming on Growth and Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Kaboli Type

H. Auobi¹- J. Nabati^{2*}- A. Nezami³- M. Kafi⁴

Received: 08-06-2021

Accepted: 04-10-2021

Introduction: The excessive use of chemical fertilizers devastates soil fertility and causes different types of environmental pollution. Therefore, using adequate eco-friendly fertilizers in agriculture enhances productivity but has no adverse effect on nature. Recently, there has been reported that beneficial soil microbes produce some volatile organic compounds, which are beneficial to plants. The amendment of these microbes with locally available organic materials and nanoparticles is currently used to formulate biofertilizers for increasing plant productivity. These bacteria are naturally present in soils, but their population decreases for a long time because of long-term environmental stress, improper use of chemical agents, and the absence of a suitable host plant. Adding these bacteria to the soil, before or during the growing season, increases the growth and production of agricultural products. Since available water is the main growth limiting factor in chickpea cultivation, it is useful to improve nutrition, especially using plant growth-promoting rhizobacteria, for accelerating the growth and development of plants at the end of the season.

Materials and Methods: In order to evaluate the effect of bio-nutrition and seed priming on growth and yield of chickpea genotypes (MCC463, MCC741, ILC8617, ILC72, FLIP02-51C) an experiment was carried in split plots based on Randomized Complete Block Design with three replications in 2019. Experimental factors included nutritional treatments as the main plots and chickpea genotypes as the subplots. Nutritional treatments were 1- seed priming with the use of free-living nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and potassium solubilizing bacteria (P + BF), 2- free-living nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and potassium solubilizing bacteria before sowing (BF), 3- seed priming with the application of free-living nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and potassium solubilizing bacteria with foliar application of amino acid, potassium and silicon during growth stages (P + BF + F), 4- application of free-living nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and potassium solubilizing bacteria before planting with foliar application of amino acid, potassium and silicon during growth stages (BF + F), and 5- control (without biological and chemical fertilizers). Free-living nitrogen fixing bacteria, phosphorus solubilizing bacteria and potassium solubilizing bacteria were sprayed five liters per hectare on the soil surface before planting with 10^7 CFU per ml and mixed with soil. Foliar application with amino acid (1:1000) was done in two stages (before flowering and 50% flowering stage), and foliar application with potassium (1:1000) and silicon (1.5:1000) was carried out in the 50% flowering stage.

Results and Discussion: Results showed that the highest concentration of chlorophyll a was obtained for BF and MCC463 with an increase of 3.1 times greater than control. The highest concentration of chlorophyll b was obtained for BF + F and FLIP02-51. The highest green area index was recorded for MCC741 in P + BF. The highest number of pods per plant in MCC463 and FLIP02-51 was observed in BF + F, with 88 and 30% more than the control, respectively. The highest biomass produced was obtained for ILC8617 and BF + F, by 24% higher than the control. ILC72 and MCC463 showed the highest grain yield in P + BF + F treatment, which increased grain yield by 35% and 4% (320 and 50 kg/ha), respectively, with respect to control. MCC741 under BF treatment showed a doubled (810 kg/ha) grain yield relative to control. The highest grain yield for P + BF was found in ILC8617 and increased by 28% (340 kg/ha) as compared to control. In this genotype, grain yield in BF + F was also significantly greater than that in the control by 22%, (270 kg/ha). FLIP02-51 grain yield in BF increased by 12% (170 kg/ha) as compared with the control.

Conclusion: In terms of seed yield, ILC72 and MCC463 were more responsive to P + BF + F and ILC8617 and FLIP02-51 in the BF and ILC8617 in P + BF with respect to other treatments. It seems that despite the

1, 3 and 4- M.S in Agronomy and Professors, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

2- Assistant Professor, Research Center for Plant Sciences, Ferdowsi University of Mashhad

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

DOI: 10.22067/JSW.2021.70395.1054

positive effect of biofertilizer, genetic characteristics of genotypes are influential in plant growth and yield; therefore, it is necessary to select the appropriate genotype for each region so as to make the most utilization of the nutrients and achieve high yield.

Keywords: Amino acids, Biofertilizer, Foliar application, Priming, Silicone



مقاله پژوهشی

بکارگیری مدل آگرواکولوژیکی فائو برای مکان‌یابی مناطق مستعد کشت پسته در استان آذربایجان شرقی

اصغر فرج نیا^{۱*} - کامران مروج^۲ - پریسا علمداری^۳ - مهدی اصلاحی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

چکیده

مدل آگرواکولوژیکی فائو تعیین توان بالقوه و تخصیص کاربری‌های متناسب با توان سرزمین است که می‌تواند بین توان طبیعی محیط، نیاز جوامع، کاربری‌ها و فعالیت‌های انسان رابطه‌ای منطقی و سازگاری پایداری بوجود آورد. این پژوهش به منظور مکان‌یابی مناطق مستعد کاشت پسته با روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با در نظر گرفتن نیازهای آگرواکولوژیکی این محصول در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی صورت گرفت. داده‌های مورد استفاده شامل اطلاعات مربوط به زمین، خاک و داده‌های اقلیمی با طول دوره آماری مشترک ۳۰ ساله از ایستگاه‌های سینوپتیک استخراج شدند. داده‌ها در قالب بانک اطلاعاتی جمع‌آوری و پس از پردازش به صورت لایه‌های رقومی در محیط سامانه آرک‌جی‌ای اس ذخیره شد. برای تحلیل فضایی، اطلاعات به نرم‌افزار اکسپرت چویس وارد و خوشه‌بندی، ارزش‌گذاری معیارها و تلفیق اطلاعات انجام و در نهایت لایه نهایی به صورت نقشه ارائه شد. بیشترین وزن زیر معیارها بترتیب به شیب زمین، میانگین دمای حداقل سردترین ماه سال و شوری خاک و کمترین وزن به میانگین دما در مرحله گرده‌افشانی تعلق گرفت. نتایج نشان داد ۳۸۸۷ کیلومتر مربع یا ۸/۵ درصد از سطح استان با محدودیت کم برای کشت این محصول در کلاس نسبتاً مناسب قرار دارند. این اراضی عمدتاً منطبق بر اراضی کشاورزی غرب استان است. ۶۲۵۰ کیلومتر مربع (۱۳/۶ درصد) از اراضی در کلاس تناسب بحرانی و ۳۵۶۳ کیلومتر مربع (۷۷/۹ درصد) اراضی در کلاس نامناسب قرار دارند به استثنای دشت میانه بقیه اراضی مستعد کاشت پسته در شرق استان و در حاشیه دریاچه ارومیه قرار دارند. الباقی مناطق استان برای کاشت این محصول در کلاس‌های تناسب بحرانی و نامناسب قرار دارند. محدودیت‌های شاخص این مناطق برای کشت پسته محدودیت‌های دمای، رطوبت نسبی بالا در مرحله گرده‌افشانی، شوری خاک و شیب‌دار بودن اراضی است.

واژه‌های کلیدی: استان آذربایجان شرقی، تحلیل سلسله مراتبی، تناسب اراضی، درخت پسته، مدل آگرواکولوژیکی

مقدمه

فعالیت‌های انسان رابطه‌ای منطقی و سازگاری پایداری به وجود آورد. هر کشوری باید بالاترین سطح، اولویت خود را به ارزیابی منابع اقلیم، زمین و آب معطوف دارد (۱۲). از ابزارهای موثر برای مکان‌یابی در کشاورزی یا شناخت توانمندی‌های اراضی و اختصاص آنها به بهترین و سودآورترین بهره‌وری، مدل آگرواکولوژیکی فائو^۵ می‌باشد. سازمان خواربار جهانی در سال ۱۹۷۸ برای بهینه‌سازی استفاده از زمین، این مدل را تحت عنوان AEZ (پهنه‌بندی آگرواکولوژیکی کشاورزی) ارائه و پس از تحقیقات و آزمایشات فراوان آن را برای کلیه کشورها توصیه نمود (۱۲). پهنه‌بندی آگرواکولوژیکی یک نوع طبقه‌بندی کمی و

الگوسازی مکانی یا مکان‌یابی عبارت است از تعیین توان بالقوه و تخصیص کاربری‌های متناسب با توان سرزمین و روشی است که می‌تواند بین توان طبیعی محیط، نیاز جوامع، کاربری‌ها و

۱- مربی پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، دانشجوی سابق دکتری مدیریت منابع خاک، گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

(*)- نویسنده مسئول: (Email: farajnia1966@yahoo.com)

۲ و ۳- استادیاران گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۴- کارشناس اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، تبریز

DOI: 10.22067/JSW.2021.71439.1066

کیفی با مقیاس بزرگ تا متوسط است که برای شناسایی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های منابع مرتبط به کار برده می‌شود (۱۴). در این روش با تقسیم کردن یک منطقه جغرافیایی به واحدهای همگن با حداکثر شباهت از نظر اقلیم و خصوصیات زمین، عملکرد پتانسیل محصول در هر پهنه بوسیله یک مدل شبیه‌سازی پیش‌بینی شده و با انتقال نتایج به محیط GIS نقشه عملکرد پتانسیل در مقیاس منطقه‌ای تهیه می‌شود (۱۴). با استفاده از این روش می‌توان مناطق مناسب کشت گیاهان مختلف را شناسایی نمود. به این ترتیب عملاً کشت محصولات کشاورزی بر اساس نیازهای واقعی آنها در عرصه‌های زراعی جانمایی شده و نظام‌های پایدار زراعی طرح‌ریزی می‌شوند.

پسته با نام علمی *Pistachio vera* L. از خانواده *Anacardiaceae* گیاهان نیمه گرمسیری است که از دیرباز در نقاط مرکزی ایران مورد کشت و پرورش قرار می‌گیرد. پسته گیاهی است دو پایه یعنی گل‌های نر و ماده جدا از یکدیگر و روی درخت مجزا قرار دارند (۲۸). ریشه این درخت تا عمق بیش از دو متر داخل خاک فرو می‌رود از این رو قابلیت سازش با دوره‌های طولانی خشکسالی را دارد (۱۳). عرض جغرافیایی مناسب برای کاشت پسته ۲۴ تا ۴۲ درجه شمالی می‌باشد. در ایران بیشترین مساحت پسته کاشته شده در عرض جغرافیایی ۲۷ تا ۳۷ می‌باشد (۲۰). ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا ارتفاعی مناسب برای کاشت پسته است، اما در ایران در مناطقی نظیر سرخس و گنبد که ارتفاعی بین ۲۶۰-۴۰۰ متر از سطح دریا دارند کاشت این محصول موفق آمیز بوده است (۱۷). پسته در زمستان تا دمای ۲۰- و در تابستان تا ۴۲ درجه سانتی‌گراد را به راحتی تحمل می‌کند و محصول خوبی می‌دهد (۲۸). پسته نسبت به سرمای دیررس بهار حساس است. همچنین گرمای زودرس بهار نیز موجب از بین رفتن گل‌ها و میوه‌ها در ابتدای فصل و گرمای بیش از حد در زمان مغز بستن و رشد میوه، باعث سقط جنین و افزایش درصد پوکی میوه می‌شوند (۱۷). صفر گیاهی پسته ۴/۵ درجه سانتی‌گراد است (۲۰). بسته به نوع رقم نیاز سرمایی پسته ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت زیر ۷ درجه سانتی‌گراد است (۱۳). رطوبت مطلوب پسته در فصل تابستان ۳۵٪ است هرچه این رطوبت کمتر باشد برای پسته ایده‌آل‌تر است. رطوبت بالای ۶۰٪ در بهار می‌تواند گرده افشانی را مختل کند (۳۱). پسته در خاک‌های لومی عمیق و یکنواخت و یا خاک‌های حاوی رس و شن سرشار از هوموس یا اشکال دیگر از مواد آلی بخوبی رشد می‌کند. با داشتن ریشه عمیق هنگام تهیه زمین بایستی با ابزارآلات لازم هرگونه سخت کفه را از بین برد تا مانع رشد و توسعه ریشه گیاه نباشد (۱۰). افزایش شوری تا ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر در خاک، تاثیر معنی‌داری در عملکرد پسته ندارد اما با افزایش شوری، عملکرد پسته کاهش می‌یابد و زمانی که شوری خاک به ۲۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌رسد، عملکرد به صفر تنزل می‌یابد (۲۸ و ۳۷).

عوامل موثر بر تناسب اراضی برای کاشت پسته متعدد هستند اما

این عوامل دارای اهمیت یکسانی نمی‌باشند، لذا لازم است تا اهمیت نسبی معیارها مشخص شود. بدین منظور لازم است از روش‌های تحلیل چند معیاره^۱ (MCDA) استفاده شود. روش‌های ارزیابی چند معیاره مشتمل بر ارزش‌گذاری، امتیازدهی معیارها بر اساس اهمیت‌شان در تصمیم‌گیری است. برای دادن امتیاز یا وزن‌دهی به معیارها روش‌های مختلفی وجود دارد که روش تحلیل سلسله مراتبی^۲ (AHP) یکی از ابزارهای تصمیم‌گیری چند معیاره است. این مدل مقایسه‌های بین معیارها را به صورت دوتایی انجام و وزن‌های نسبی را به عنوان خروجی در نظر می‌گیرد. روش مقایسه دوتایی شامل سه مرحله اصلی ایجاد ساختار سلسله مراتبی، محاسبه وزن‌ها و سازگاری سیستم است (۳۳). استفاده از قابلیت‌های GIS و AHP جهت پردازش داده‌ها و غربال مناطق دارای پتانسیل و اولویت‌بندی گزینه‌ها در مطالعات مکان‌یابی در تحقیقات متعددی صورت گرفته است. دنیز و اوسال در استان بورسای ترکیه مناطق مستعد کشاورزی را با روش اگرواکولوژی فائو و مدل تحلیل سلسله مراتبی مطالعه و گزارش نمودند که ۱۵ درصد اراضی در محدوده‌ی کاملاً مناسب و نسبتاً مناسب و ۸۵ درصد آنها در محدوده‌ی تناسب بحرانی و نامناسب قرار گرفتند (۸). گیرمای و همکاران تناسب اراضی حوضه گاتنوی ایتیوی را برای کاشت گندم، جو و لوبیا مطالعه کردند. ایشان گزارش نمودند که تنها ۷ درصد اراضی برای کاشت گندم و جو کاملاً مناسب و برای لوبیا نسبتاً مناسب است (۱۵). در یک پژوهش ارزیابی تناسب زمین بمنظور کشت نیشکر در منطقه‌ی بیجور هند با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و AHP، از ۱۰ فاکتور بارندگی، بافت، زهکشی، عمق خاک، شیب، فاصله از جاده، فاصله از شرکت‌های قند، خطر فرسایش، خطر سیلاب و اسیدیته استفاده شد نتایج نشان داد ۶۱ درصد اراضی در کلاس بسیار مناسب، ۲۴ درصد نسبتاً مناسب، ۷ درصد تناسب بحرانی و ۸ درصد اراضی در کلاس نامناسب قرار گرفتند (۱۹). عبدالرحمان و همکاران برای ارزیابی تناسب منطقه چماراگاناگر هند از روش فائو استفاده نمودند. بدین منظور عوامل مختلف مانند بافت خاک، عمق، فرسایش، شیب، سیل‌گیری، سنگریزه و سنگ در واحدهای مختلف زمین برای محصولات زراعی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای تهیه نقشه استفاده نمودند (۱). لایومی و همکاران برای ارزیابی تناسب اراضی کشور سری‌لانکا از مدل AHP و روش اگرواکولوژیکی فائو برای کشت چای استفاده نمودند نتایج نشان داد که ۴۲/۱ درصد اراضی در رده مناسب (۹/۹ درصد در کلاس کاملاً مناسب، ۱۲/۴ درصد در کلاس نسبتاً مناسب و ۱۹/۸ درصد در کلاس نامناسب اما با

1- Multi-Criteria Decision Making

2- Analytical Hierarchy Process

متنوع و گسترده از اقلیم متفاوتی برخوردار است (۳). وسعت اراضی کشاورزی استان را حدود ۱۸۰۰۰ کیلومتر مربع برآورد می‌کنند که معادل ۳۹ درصد استان و حدود ۹ درصد اراضی قابل کشت کشور را شامل می‌شود (جدول ۱). در این تحقیق داده‌های اقلیمی با طول دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۲۰۱۵-۱۹۸۶ میلادی) از ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز، اهر، جلفا، مراغه، میانه، سراب و تبریز و همچنین به عنوان ایستگاه کمکی از استان‌های مجاور ایستگاه‌های ارومیه، خوی، پارس آباد و میاندوآب استفاده شدند. برای داده‌های مورد نیاز برای پهنه‌بندی عوامل خاکی از نتایج آنالیز حدود ۹۰۰۰ نمونه خاک دارای مختصات جغرافیایی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان استفاده شد. نقشه شیب و جهت شیب از نقشه رقومی ارتفاعی ۳۰ متری استان و نقشه کاربری اراضی از نقشه موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور (۱۳۸۴) استخراج شدند.

بمنظور مکان‌یابی مناطق مستعد کاشت پسته، ۳ معیار و ۱۱ زیر معیار مورد بررسی قرار گرفت. معیارها شامل اقلیم، زمین و خاک انتخاب شدند. زیر معیارهای اقلیم شامل میانگین دمای دوره رشد، میانگین دما در مرحله گرده‌افشانی، میانگین حداقل مطلق دما در سردترین ماه سال و میانگین درصد رطوبت نسبی در مرحله گدھی است. معیار زمین شامل زیرمعیارهای کاربری اراضی، شیب زمین و جهت شیب و معیار خاک دارای زیرمعیارهای شوری خاک (هدایت الکتریکی عصاره اشباع)، اسیدیته، بافت خاک و میزان کربنات کلسیم معادل خاک (آهک) هستند (جدول ۴). برای اجرای مدل AHP در محیط ArcGIS نقشه‌ها باید رستری باشند.

سودآوری کم) و بقیه اراضی در رده نامناسب قرار دادند (۲۱). در ایران نیز در ده سال گذشته مطالعات مکان‌یابی با هدف شناسایی مناطق مستعد کاشت پسته با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و تحلیل سلسله مراتبی انجام شده است از جمله به مطالعات پورطاهری و همکاران (۳۲)، میرموسویان و میریان (۲۷)، فال‌سلیمان و همکاران (۱۰)، اوجی (۳۰)، محمودآبادی (۲۴)، خوشحال دستجردی و شهسواری (۲۱) و لشکری و کیخسروی (۲۲) می‌توان اشاره نمود.

به دلیل وقوع خشکسالی و پسروری دریاچه ارومیه در دو دهه گذشته، برخی از زارعین بویژه در حاشیه دریاچه ارومیه به احداث باغات پسته روی آورده‌اند. بطوری که سطح زیر کشت این محصول در استان به حدود ۱۰۰۰ هکتار رسیده است. این در حالی است که مطالعات جامعی در مورد قابلیت‌ها و محدودیت‌های اقلیم و زمین این منطقه برای کاشت این پسته وجود ندارد. کاشت آن اغلب به روش آزمون و خطا و تجربیات محلی صورت می‌گیرد که تبعات آن اتلاف منابع مالی و زمان زیادی است. این تحقیق بمنظور شناسایی مناطق مستعد کشت پسته در استان آذربایجان شرقی با روش اگرواکولوژیکی فائو با بکارگیری سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل AHP انجام شد.

مواد و روش‌ها

استان آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران و بین مدارهای ۴۵°، ۳۶° تا ۲۶°، ۳۹° عرض شمالی و بین نصف‌النهارهای ۴۵°، ۲۲°، ۴۸° طول شرقی قرار دارد. مساحت استان برابر ۴۵۸۰۰ کیلومتر مربع است و ۲/۸ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. آب و هوای استان به طور کلی سرد و نیمه خشک بوده ولی به علت توپوگرافی

جدول ۱- کاربری اراضی استان آذربایجان شرقی (km²)
Table 1- Land use of East Azerbaijan Province (km²)

کل	سایر	اراضی مسکونی	مرتع	جنگل	اراضی دیم	اراضی آبی و باغ
Total	Others	Urban	Rangeland	Forest	Dry land	Irrigated farming and Gardens
45800	1264	268.4	24734.4	1564	12823.6	5145.7
100	3	1	54	3	28	11

منبع: Ministry of Jihad Agriculture, 2004

جدول ۲- تقویم زراعی پسته در غرب و جنوب شرق استان آذربایجان شرقی
Table 2- Pistachio crop calendar in the west and southeast of East Azarbaijan Province

زمان برداشت	پرسیدن مغز	گلدهی	شروع رشد جوانه‌ها	کاشت
Date of harvest	Fruit filling	Flowering	Buds begin to grow	Cultivation
نیمه اول مهر The third decade of September	اواسط تیر تا اواخر مرداد The first half of August	دهه اول اردیبهشت The Third decade of April	اواسط فروردین The first decade of April	فروردین April

منبع: Farajnia, 2018

مناطق مختلف استان در سه کلاس شامل اراضی نسبتاً مناسب، اراضی با تناسب بحرانی و اراضی نامناسب پهنه‌بندی شد. اراضی که دارای محدودیت کم به لحاظ اقلیم، خاک یا زمین برای کشت پسته بودند در کلاس نسبتاً مناسب و اراضی که به دلیل وجود محدودیت‌های زیاد دارای سودآوری کم برای استفاده موردنظر باشد در کلاس تناسب بحرانی قرار گرفتند. در صورتی که به دلیل وجود محدودیت‌های شدید درآمد حاصل از استفاده مورد نظر کمتر از هزینه‌های آن باشد در کلاس نامناسب قرار می‌گیرند (۳۴). به طور کلی پس از ایجاد و مشخص کردن وزن طبقات هر لایه، در محیط GIS امتیاز هر پلی‌گون (S) در هر لایه اطلاعاتی، از حاصلضرب هر طبقه (Sij) در وزن لایه مربوط (Wi) به دست می‌آید (معادله ۱).

$$Sij = \sum Sij * Wij \quad (۱) \text{ معادله}$$

امتیاز نهایی به دست آمده در این مرحله نمایشگر آن است که هر طبقه تا چه میزان برای هدف مناسب می‌باشد. این روش یک مقیاس اسمی را با مقادیر از ۱ تا ۹ (جدول ۵) برای تعیین میزان اولویت‌های دو معیار بکار می‌گیرد (۳۳). در این پژوهش، با توجه به اصل "شروط معکوس" در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، اگر اهمیت I نسبت به J برابر با K باشد، اهمیت عنصر J نسبت به I برابر $\frac{1}{K}$ خواهد بود (۲۵). یکی از مزیت‌های مدل AHP امکان بررسی سازگاری در قضاوت‌های انجام شده در تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیر معیارها است. که ضریب ناسازگاری گفته می‌شود و از تقسیم شاخص ناسازگاری به شاخص تصادفی بودن حاصل می‌شود. چنانچه این ضریب کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، ناسازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است در غیر این صورت باید در قضاوت‌ها تجدید نظر شود (۸). مهم‌ترین مزیت این روش در آن است که به برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا یک مسئله پیچیده را به صورت ساختار سلسله مراتبی بشکنند و سپس به حل آن بپردازند. بردار مجموع وزن‌دار با ضرب کردن وزن در اولین ستون ارایه مقایسه زوجی اصلی، محاسبه گردید. سپس وزن معیار دوم در ستون دوم الی آخر و سرانجام مجموع این روش‌ها در ردیف‌ها ضرب شد (برای هریک از زیر معیارها و گزینه‌ها نیز این گونه عمل گردید). برای محاسبه ضریب ناسازگاری از معادله (۲) و شاخص ناسازگاری از معادله (۳) استفاده شد.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۲) \text{ معادله}$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (۳) \text{ معادله}$$

در معادله (۲) RI یا شاخص تصادفی بودن با توجه به تعداد معیارها (n) از جدول ۵ قابل استخراج است. برای محاسبه بردار ویژه (λ) ابتدا بردار مجموع وزنی را که از ضرب کردن وزن اولین معیار در اولین ستون ماتریس مقایسه دو تایی اصلی، سپس ضرب نمودن دومین معیار در دومین ستون، سومین معیار در سومین ستون ماتریس

نقشه‌های رستری درصد شیب، و جهت شیب با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع^۱ (DEM) ۳۰ متری استان تهیه شدند. نقشه کاربری اراضی از نقشه سازمان تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور (۵) استخراج شد. برای تهیه نقشه‌های عوامل اقلیمی اطلاعات اقلیمی نقطه‌ای ۳۰ ساله ایستگاه‌های سینوپتیک استان و ایستگاه‌های کمکی استان‌های مجاور با استفاده از مدل عکس فاصله وزنی^۲ و نقشه‌های عوامل خاکی نیز از اطلاعات حدود ۹۰۰۰ داده نقطه‌ای دارای موقعیت جغرافیایی که در طول ۱۰ سال گذشته از نقاط مختلف استان نمونه‌برداری شده بودند، استفاده و این اطلاعات نقطه‌ای با مدل فوق به نقشه سطحی تبدیل و پهنه‌بندی شدند (اشکال ۳-۱). در ادامه با استفاده از مدل AHP به تخصیص وزن هر لایه اطلاعاتی در قالب یک ماتریس مقایسه زوجی (دودویی) و ترسیم نمودار مربوط در نرم‌افزار اکسپرت چویس^۳ با توجه به اهمیت اثرگذار هر لایه با استفاده از نظر متخصصین و منابع علمی اقدام شد (۳۳). به منظور وزن‌دهی با این روش ابتدا مسأله تصمیم‌گیری، که همان یافتن نواحی مستعد کشت پسته می‌باشد به سلسله مراتبی که شامل مهم‌ترین عناصر تصمیم‌گیری است تجزیه شد. در سطح اول هدف اصلی، در سطح دوم پارامترهای اصلی تأثیرگذار بر روی هدف مورد نظر (اقلیم، زمین و خاک) و در سطح سوم زیر شاخه‌های هر کدام از پارامترهای سطح دوم و در نهایت در سطح چهارم خصوصیات یا کلاس هر لایه اطلاعاتی، دسته‌بندی شدند. پس از ایجاد سلسله مراتب به مقایسه مؤلفه‌های هر سطح در قالب یک ماتریس پرداخته شد. مقایسه و محاسبه وزن‌ها در محیط نرم‌افزار اکسپرت چویس انجام شد، که به طور خودکار نسبت ناسازگاری را نیز محاسبه می‌نماید و از طریق ادغام وزن‌های نسبی سطوح مختلف و از طریق ضرب‌های متوالی ماتریس وزن‌ها در هر سلسله مراتب انجام می‌شود. به طور مثال وزن عامل زمینی در سطح دوم در وزن زیر شاخه‌های خود یعنی سطوح کاربری، شیب و جهت شیب زمین ضرب شده و به همین منوال وزن عوامل زمینی (سطح سوم) در وزن سطح چهارم ضرب (وزن عوامل خاکی) می‌شود تا وزن نهایی بدست آید. از طریق بکاربردن قابلیت Map calculator نرم‌افزار ArcGIS پس از ضمیمه نمودن وزن سطح چهارم به جدول اطلاعات توصیفی، نقشه مربوطه در اوزان سطوح بالایی خود ضرب شد تا نقشه‌های نهایی بر اساس وزن نهایی نرمال شده با مدل هم‌پوشانی (روی هم‌گذاری)^۴ تهیه شد و در نهایت بر اساس میزان و شدت محدودیت‌های اراضی برای کاشت پسته،

- 1- Digital elevation model
- 2- Inverse distance weight
- 3- Expert Choice
- 4- weighted-overlay

سطرها بدست می‌آید. در مرحله بعد بردار توافق از ضرب اعداد بدست آمده بر وزن معیارها حاصل می‌شود. بردار مجموع وزنی برای تک تک معیارها به صورت ذیل محاسبه می‌شود (۸).

دوم به همین ترتیب محاسبات تا معیار یازدهم انجام شد که نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

چون شاخص ناسازگاری از ۰/۱ کمتر است بنابر این قضاوت‌ها سازگار هستند.

اصلی، چهارمین معیار و سرانجام جمع نمودن این مقادیر در

$$\begin{aligned} \text{معیار اول} &= 0.245 * 1 + 0.137 * 2 + 0.134 * 3 \\ &+ 0.133 * 4 + 0.067 * 5 + 0.064 \\ &* 6 + 0.06 * 7 + 0.054 * 8 + 0.052 \\ &* 9 + 0.028 * 10 + 0.026 * 11 \\ &= 4.058 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{معیار دوم} &= 0.245 * 1/2 + 0.137 * 1 + 0.134 * 2 \\ &+ 0.133 * 3 + 0.067 * 4 + 0.064 \\ &* 5 + 0.06 * 6 + 0.054 * 7 + 0.052 \\ &* 8 + 0.028 * 9 + 0.026 * 10 \\ &= 3.1805 \end{aligned}$$

جدول ۳- محاسبه بردار ویژه

Table 3- Calculation of eigen vector

معیار Criterion	وزن نهایی Final weight	λ
شیب Slop	0.245	$0.245=0.99 \times 4.058$
میانگین حداقل دمای سردترین ماه Min T. Coldest month	0.127	$0.44=0.137 \times 3.1805$
شوری خاک Soil salinity	0.134	$0.33=0.134 \times 2.453$
درصد رطوبت نسبی در مرحله گدھی Mean RH. flowering period (%)	0.133	$0.25=0.133 \times 1.859$
Soil texture ((بافت خاک)	0.067	$0.09=0.067 \times 1.395$
درصد کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)	0.064	$0.07=0.064 \times 1.029$
میانگین دمای دوره رشد Mean T. Growth period	0.06	$0.04=0.06 \times 0.7382$
اسیدیته خاک Soil pH	0.054	$0.03=0.054 \times 0.5132$
کاربری اراضی Land use	0.052	$0.02=0.052 \times 0.348$
جهت شیب Steep directions	0.028	$0.007=0.028 \times 0.2348$
میانگین دما در مرحله گرده افشانی Min T. Pollination period	0.026	$0.004=0.026 \times 0.1585$

منبع: Dengiz & Usul, 2018

$$CI = \frac{\lambda_{\max}}{n-1} = \frac{0.99}{10} = 0.09 \quad \rightarrow \quad CR = \frac{CI}{R} = \frac{0.09}{1.51} = 0.06$$

جدول ۴- نیازهای رویشی گیاه پسته
Table 4- Pistachio crop requirements

کلاس Class	کاملاً مناسب Suitable	نسبتاً مناسب Moderat suitable	تناسب بحرانی Critical suitable	نامناسب Non suitable
میانگین دمای دوره رشد (°C) Mean T. Growth period(°C)	20-30	18-20 30-35	15-18 35-37	15> >37
میانگین دمای مرحله گرده افشانی (°C) Min T. Pollination period (°C)	14-25	25-30 10-14	-	10< 30>
میانگین دمای حداقل سردترین ماه سال (°C) Min T. Coldest month (°C)	(-5) - (-2)	(-5) - (-17) 2-4	(-17) - (-25) 4-6	-25>
رطوبت نسبی در مرحله گدھی (%) Mean RH. flowering period (%)	18-35	40-65 15<	65-75	75>
شیب (%) Slope (%)	0-5	5-10	10-15	15>
جهت شیب (درجه) Steep directions (degree)	112.5-247.5	67.5-112.5	247.5-292.5	22.5-292.5
کاربری اراضی Land use	مناطق مستعد کشاورزی و باغ Agriculture and garden	زمین بایر، اراضی دیم Wasteland, dry land	جنگلهای تنگ، مراتع و درختهای پراکنده Tight forests, grasslands and scattered trees	رودخانه، مرداب و مناطق صخره ای Rivers, swamps and rocky areas
شوری خاک (دسی‌زیمنس/ متر) Soil Salinity (dS/m)	< 7.5	7.5-15	15-22	>22
اسیدیته خاک Soil pH	6.5-7.8 5.5-6.5	7.8-8.3 5.5 >	8.3-8.9	>8.9
آهک (%) Lime (%)	0-25	25-40	40-65	<65
بافت خاک Soil texture	L, CL, SCL, SiCL	SC, SiC, SiL, SL	LS , 60%> C	Cm* ,<60%

منبع: Zeinaldin et al, 2019

* بافت رسی با بیش از ۶۰ درصد رس و ساختمان فشرده

جدول ۵- مقیاس چند کمیتی ساعتی برای مقایسه دودویی گزینه ها
Table 5- Saaty multi- quantitative scale for binary comparison criteria

میزان اهمیت Level importance	شدت اهمیت Intensity of the importance
1	با اهمیت و ارجحیت مساوی With equal impotence and preference
3	با اهمیت و ارجحیت کمی بیشتر With slighthly impotence and preference
5	با ارجحیت و اهمیت قوی With strong impotence and preference
7	با ارجحیت خیلی قوی With very strong impotence and preference
9	با ارجحیت بی نهایت With extreme impotence and preference
8 and 6 ، 4 ، 2	ارزش میانی Middele value
ارزش های مقیاس معکوس Reverse scale values	اثر دو جانبه امتیازات Bilateral effects of concessions

منبع: Saaty, 1987

جدول ۶- شاخص پایداری تصادفی بودن (RI)

Table 6- Random consistency indices

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
RI	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56

منبع: Bown, 1993

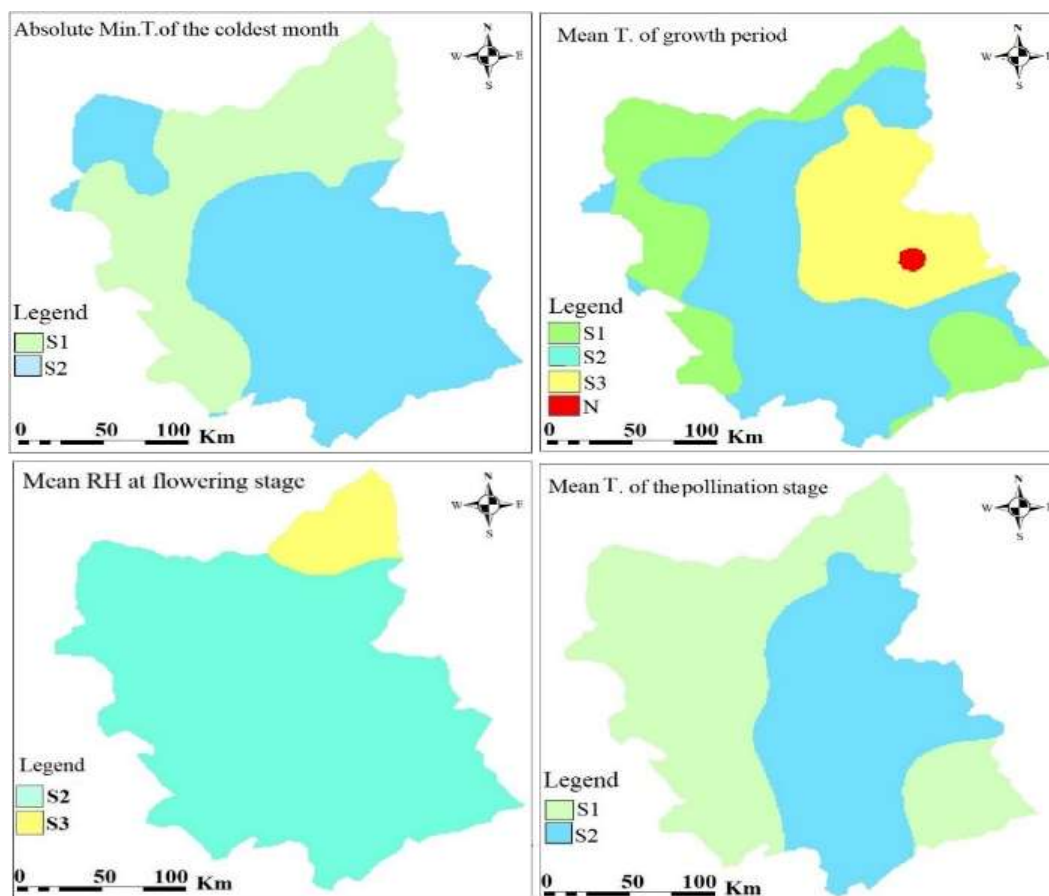
نتایج

نتایج پهنه‌بندی عوامل موثر بر تناسب اراضی استان آذربایجان شرقی در جدول ۷ و اشکال ۱ تا ۳ ارایه شده است. بیش از ۹۰ درصد اراضی استان به لحاظ شوری خاک فاقد محدودیت برای کاشت پسته هستند و فقط حدود ۱۳۰۰ کیلومتر مربع از اراضی استان که در حاشیه دریاچه ارومیه واقعند بدلیل شوری بیش از ۲۲ دسی‌زیمنس بر متر برای کاشت پسته نامناسب هستند. بیشترین اراضی نامناسب برای کاشت پسته به عامل شیب زمین تعلق دارد و بدلیل کوهستانی بودن مناطق مختلف استان بیش از ۲۰ هزار کیلومتر مربع از اراضی (۴۳/۹ درصد) در کلاس نامناسب قرار دارند و حدود

نیمی از اراضی استان با شیب کمتر از ۱۰ درصد برای کاشت پسته در کلاس‌های کاملاً و نسبتاً مناسب قرار دارند. از عوامل محدودیت‌زا برای کاشت این میزان رطوبت نسبی در مرحله گرده‌افشانی است بطوری که ۹۲ درصد استان در کلاس نسبتاً مناسب و الباقی ۸ درصد از اراضی که در شمال شرق شهرستان کلبر واقعند با ۶۵ تا ۷۵ درصد رطوبت در مرحله گرده‌افشانی در کلاس تناسب بحرانی قرار دارند. محققین متعددی رطوبت بالای ۶۵ درصد را عامل منفی در مرحله گلدهی معرفی و گزارش نمودند که با جذب رطوبت دانه گرده متورم و تلقیح را با مشکل مواجه می‌سازد (۱۷ و ۳۴).

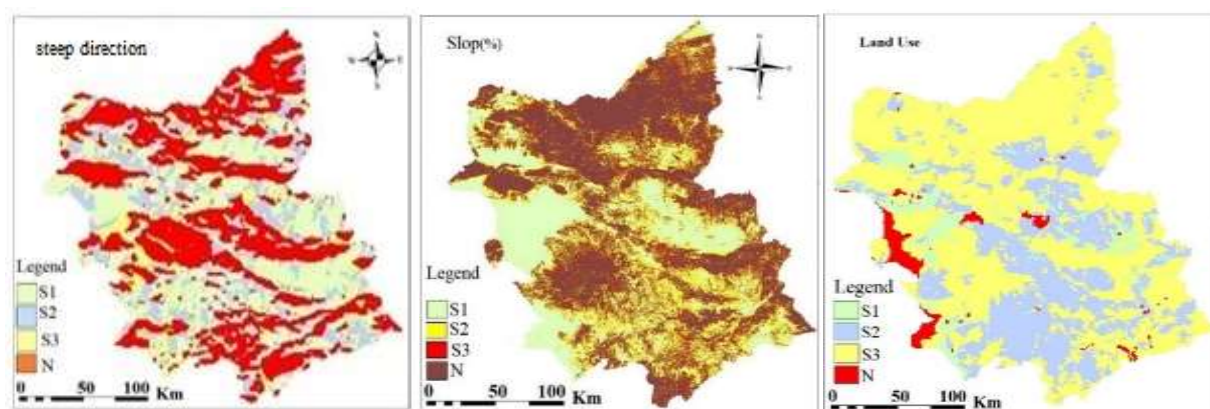
جدول ۷- کلاس‌های مختلف تناسب بر اساس زیرمعیارها (km²)
Table 7- Land suitability classes based on sub criteria (km²)

زیر معیار Sub criteria	کاملاً مناسب Suitable	نسبتاً مناسب Moderat suitable	تناسب بحرانی Critical suitable	نامناسب Non suitable
میانگین دمای دوره رشد (°C) Ave T. Growth period (°C)	2648	22210	10371	211
میانگین دما در مرحله گرده افشانی (°C) Min T. Pollination period (C0)	26480	19560	-	-
میانگین حداقل مطلق دمای دوره رشد (°C) Min T. Coldest month (°C)	27650	18150	-	-
درصد رطوبت نسبی در مرحله گدهی Ave RH. flowering period (%)	-	42150	3650	
شیب زمین (%) Slop (%)	9500	9600	6590	20110
جهت شیب (درجه) Steep direction (degree)	12557	9845	4888	18510
کاربری اراضی Land Use	3620	13720	27170	1290
شوری خاک (دسی‌زیمنس بر متر) Ec (dS/m)	42770	1499	193	1338
اسیدیته خاک pH	17340	28462	-	-
بافت خاک Texture	40705	4328	722	60
کربنات کلسیم معادل (%) CaCO ₃ (%)	36486	9014	300	-



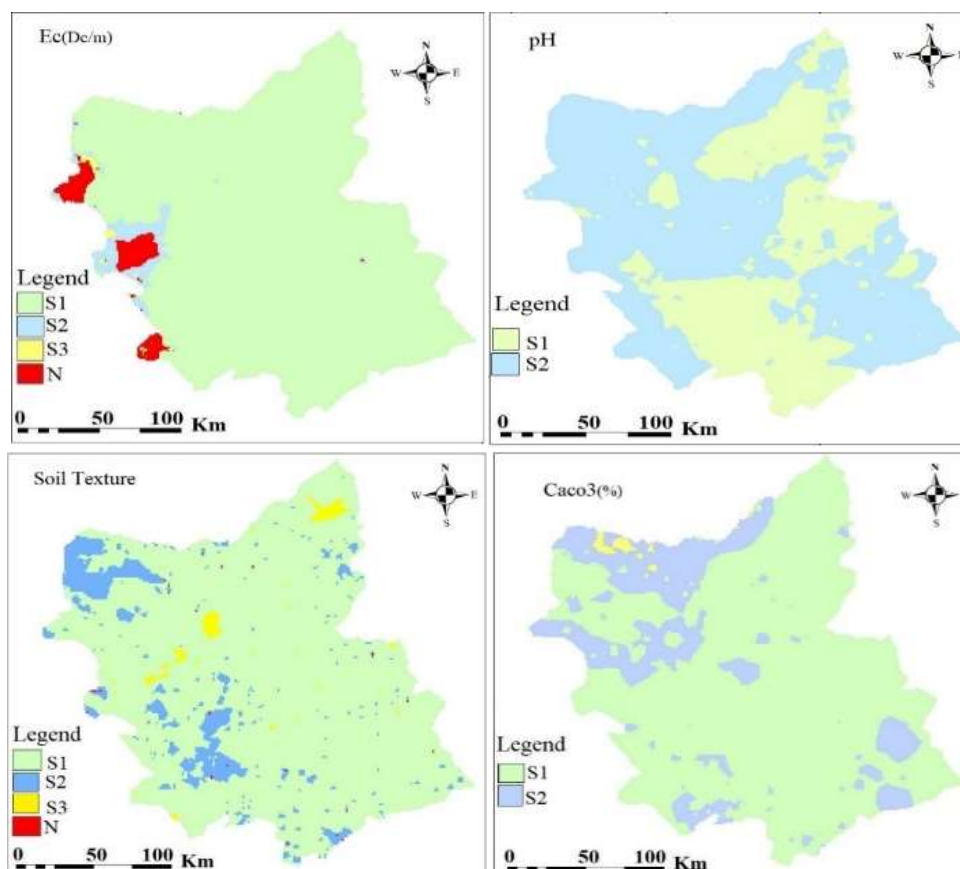
شکل ۱- بترتیب از بالا سمت راست تناسب اراضی برای کاشت پسته بر اساس میانگین دمای دوره رشد، میانگین حداقل مطلق سردترین ماه، میانگین دما در مرحله گرده افشانی و میانگین رطوبت نسبی مرحله گلدهی

Figure 1- From right to left: Land suitable for pistachio based on average growth period temperature, Absolute minimum temperature of coldest month, Average temperature of pollination stage, Mean relative humidity at flowering stage



شکل ۲- بترتیب از بالا سمت راست تناسب اراضی برای کاشت پسته بر اساس کاربری، درصد شیب و جهت شیب

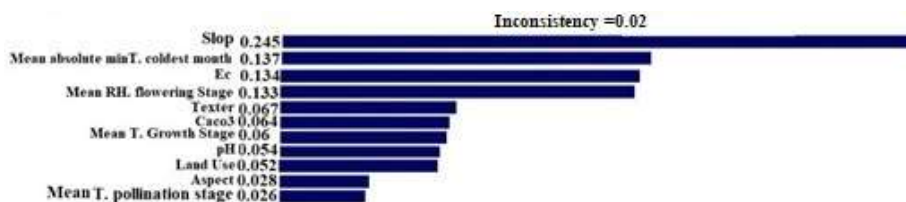
Figure 2- From right to left: Land suitable for pistachio based on land use, slope percent and steep direction



شکل ۳- از بالا سمت راست تناسب اراضی برای کاشت پسته بر اساس شوری، اسیدیته، بافت و درصد کربنات کلسیم خاک
Figure 3- From right to left: Land suitable for pistachio based on soil salinity, acidity, texture and CaCO_3 percentage

محدودیت، لایه‌های انتخاب شده در مراحل بعدی قرار گیرند (۲). نرخ ناسازگاری در مقایسه زوجی زیر معیارها ۰/۰۲ محاسبه شد و چون این مقادیر کمتر از ۰/۱ است. بنابراین مقایسه‌ها از سازگاری مطلوبی برخوردار هستند. اختلاف اندک بین نرخ ناسازگاری محاسبه شده با نرم‌افزار و روش دستی به دقت بالای نرم‌افزار مربوط است. گزارش شده‌است چنانچه در تحلیل‌های مکانی در GIS از توابع تحلیلی نظیر تحلیل سلسله مراتبی نیز استفاده شود دقت نتایج افزایش خواهد یافت (۲۷).

شکل ۴ رتبه‌بندی نهایی زیر معیارهای موثر اقلیمی، زمین و خاک برای کشت پسته در استان آذربایجان شرقی را بر اساس محاسبات نرم‌افزار اکسپرت چویس نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود کارشناسان و خبرگان شرکت کننده در این تحقیق بیشترین وزن یعنی ۰/۲۴۵ را به شیب زمین بعد از آن ۰/۱۳۷ به میانگین حداقل مطلق دما در سردترین ماه سال و رتبه سوم یا ۰/۱۳۴ را به قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک یا شوری دادند. کمترین وزن به میانگین دما در مرحله گرده افشانی (۰/۰۲۶) تعلق گرفت. گزارش شده است وزن-دهی لایه‌ها به‌صورتی انجام گیرد که عاملی که بیشترین محدودیت را در ارزیابی ایجاد می‌کند مهمترین لایه و به نسبت اهمیت و ایجاد



شکل ۴- محاسبه وزن شاخص‌ها با استفاده از نرم‌افزار اکسپرت چویس
Figure 4- Index weight calculation using the software Expert choice

است که تا شوری ۱۵ دسی‌زیمنس بر متر در حاشیه دریاچه ارومیه باغ پسته با بیش از ۱۵ سال قدمت وجود دارد هر چند برخی از این باغ‌ها بدلیل احداث در اراضی محدودیت‌دار عملکرد اقتصادی ندارند (۱۱). ۳۵۶۶۳ کیلومتر مربع (۷۷/۹ درصد) از اراضی مورد مطالعه در کلاس نامناسب (N) قرار دارند. قسمت عمده این اراضی در شمال‌شرق و شمال استان در شهرستان‌های سراب، بستان‌آباد، هریس، اهر و کلیبر واقعند (شکل ۵).

عوامل اصلی محدود کننده رشد پسته در این نواحی بالا بودن رطوبت نسبی در مرحله گلدهی، پائین بودن دما در مرحله گرده افشانی و دوره رشد است از دیگر عوامل محدوده کننده شیب و کوهستانی بودن این بخش از اراضی استان از سایر عوامل محدود کننده بشمار می‌روند در صورتی که محدودیت اصلی اراضی نامناسب شرق استان نظیر جنوب مرند، شرق شبستر و جنوب آذرشهر، کوهستانی بودن منطقه و شیب‌دار بودن اراضی است ولی معیار اصلی نامناسب بودن اراضی غرب تبریز شوری بسیار بالای این اراضی است که در نقشه شوری خاک دیده می‌شود. اگرچه شوری خاک از عوامل قابل اصلاح می‌باشد اما نبود آب با کیفیت مناسب برای آبیاری، سنگین بودن بافت خاک و عدم امکان تخلیه زه‌آب بدلیل مسطح بودن، اصلاح این اراضی را غیر ممکن نموده است. بیشترین باغات پسته که در ۱۰ سال اخیر در این استان احداث شده‌اند در شهرستان‌های شبستر، مرند، تبریز، آذرشهر، بناب و میانه واقعند و بنظر می‌رسد تاکنون گزارشی از کاشت موفق این محصول در مناطقی نظیر بستان‌آباد، سراب، هریس و سایر مناطقی که در شکل ۵ نامناسب نشان داده شده است وجود ندارد (۱۱). مطالعات ارزیابی اراضی از اهمیت بالایی در تصمیم‌گیری در خصوص استفاده از زمین بر اساس پتانسیل‌ها و محدودیت‌ها و حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده برخوردار است (۸). همانطور که ذکر شد پسته گیاه نیمه گرمسیری و بومی مناطق مرکزی ایران و استان کرمان است و تا چند سال پیش کاشت آن در استان‌های سردسیر نظیر آذربایجان شرقی بعید بنظر می‌رسید اما با وقوع پدیده تغییر اقلیم و گرم شدن زمین در بیست سال گذشته کشاورزان در بسیاری از مناطق کشور از جمله منطقه مورد مطالعه با آزمون و خطا توانسته‌اند باغ‌هایی احداث کنند که صرفه اقتصادی داشته و موجب ترغیب سایر کشاورزان به کشت این محصول شده است. مهمترین عامل تمایل کشاورزان در دشت تبریز و اراضی حاشیه دریاچه ارومیه وقوع خشکسالی و پسروری دریاچه ارومیه و شور شدن آب‌های زیرزمینی در این اراضی است که منجر به خشک شدن بسیاری از باغ‌های بادام و زردآلو در این مناطق شد. شوری آب آبیاری در باغ‌های حاشیه دریاچه ارومیه تا بیش از ۷۰۰۰ دسی‌زیمنس هم گزارش شده است این شوری به خشکی باغ‌های هسته‌دار و دانه‌دار منجر شد اما آبیاری با این آب اگرچه افت عملکرد پسته را بدنبال دارد

نقشه‌های حاصله به عنوان لایه‌های ورودی در مدل‌سازی نهایی مورد استفاده قرار گرفتند. مدل‌سازی به روش همپوشانی وزن‌دار با استفاده از قابلیت روی هم اندازی لایه‌ها^۱ در محیط Arc GIS^{۱۰.۷} صورت گرفت (۹). بدین ترتیب تناسب مناطق مختلف استان برای کشت پسته بدست آید (شکل ۵).

نتایج و بحث

بر اساس مدل AHP، اراضی کلاس کاملاً مناسب (S1) برای کاشت پسته در آذربایجان شرقی وجود ندارد یعنی در کلیه مناطق استان، یک یا چند عامل از عوامل یا زیر معیارهای مورد مطالعه محدودیت کم تا زیاد برای کاشت این محصول بوجود می‌آورند (شکل ۵). نتایج نشان داد ۳۸۸۷ کیلومتر مربع یا ۸/۵ درصد از سطح استان آذربایجان شرقی برای کاشت پسته در کلاس نسبتاً مناسب (S2) قرار دارند (جدول ۸). نتایج یک طرح تحقیقاتی که در ۳۰ باغ پسته در استان آذربایجان شرقی اجرا شد نشان می‌دهد در همه این باغات بدلیل وجود محدودیت‌های کم تا زیاد مربوط به اقلیم و زمین اراضی فاقد محدودیت وجود ندارد. اگر چه این محدودیت‌ها به افت عملکرد پسته منجر می‌شود اما توجیه اقتصادی این محصول سبب شده‌است روز بروز به سطح زیر کشت این محصول در استان افزوده شود (۱۱). قرار داده، نیاز آبی کم و متحمل بودن این محصول نسبت به شوری در مقایسه با سایر محصولات باغی است (۳۵).

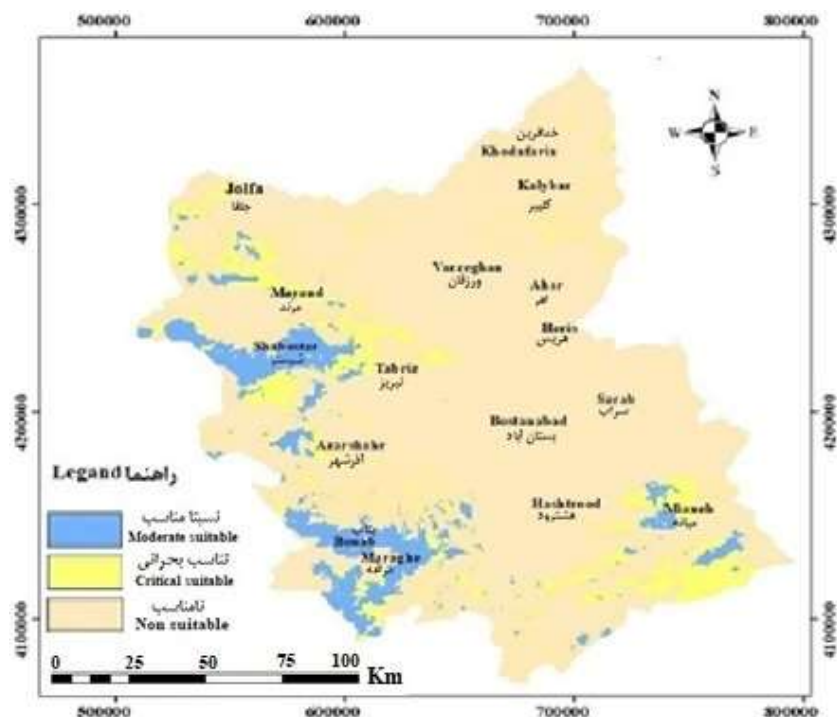
از سال ۱۳۷۷ به اراضی نسبتاً مناسب عمدتاً منطبق بر اراضی کشاورزی استان بوده و در صورت تأمین نیاز آبی می‌توانند به کاشت این محصول اختصاص یابند. از مزیت‌های نسبی که این محصول را مورد توجه کشاورزان دفعات خشکسالی در نقاط مختلف استان کم و بیش بوقوع پیوسته و افت محصولات کشاورزی تا ۳۵ درصد را سبب شده‌است. پسروری دریاچه ارومیه یکی از آثار خشکسالی‌های اخیر است که تاثیر نامطلوبی بر کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی گذاشته است (۱۸). ۶۲۵۰ کیلومتر مربع (۱۳/۶ درصد) از اراضی استان در کلاس تناسب بحرانی یا S3 قرار دارند. برخی از زیر معیارهای مورد مطالعه در این اراضی مانند میانگین دمای دوره گرده افشانی، میانگین دمای دوره رشد، میزان و جهت شیب و بافت خاک در محدوده تناسب بحرانی و یا نامناسب قرار دارند. برای مثال شیب تند در این اراضی را می‌توان عنوان کرد که صرف هزینه برای تسطیح این اراضی غیر از تخریب مراتع و مستعد نمودن آن‌ها به فرسایش خاک ثمری نخواهد داشت. این اراضی عمدتاً شامل مناطق کوهپایه‌ای و دشت‌های کوهستانی و پسرکرانه‌های دشت‌های استان است. اما گزارش شده

1- raster calculator

اما رشد گیاه را با مشکل مواجه نمی‌سازد (۱۸). اما بالا بودن قیمت محصول، پائین بودن عملکرد را پوشش می‌دهد از طرف دیگر بسیاری از باغداران بدلیل خاصیت انبارداری و خشکباری بودن این محصول و سودآوری بالای آن نسبت به بقیه محصولات باغی پسته را ترجیح می‌دهند. این امر باعث شده است مساحت باغ‌های در حال احداث بشدت افزایش یابد.

جدول ۸- کلاس‌بندی قابلیت کشت پسته بر اساس مدل AHP در استان آذربایجان شرقی
Table 8- Classification of pistachio capability based on AHP model in East Azarbaijan Province

کلاس Class	مساحت (کیلومتر مربع) Area (km ²)	درصد (%) Percentage (%)
نسبتاً مناسب Moderately suitable	3887	8.5
تناسب بحرانی Critical suitable	6250	13.6
نامناسب Non suitable	35663	77.9



شکل ۵- پهنه‌بندی مناطق مستعد کاشت پسته در استان آذربایجان شرقی
Figure 5- Pistachio zoning map planting in East Azerbaijan Province

کاملاً مناسب و نسبتاً مناسب به این کاربری اختصاص یابند. و از کشاورزی در اراضی با تناسب بحرانی و نامناسب خودداری شود (۷). فرج‌نیا گزارش نمود عملکرد باغات پسته در استان آذربایجان شرقی در محدوده اراضی نسبتاً مناسب (S₂) ۱۵۰۰-۱۰۰۰ و اراضی با تناسب بحرانی (S₃) ۱۰۰۰-۶۰۰ کیلوگرم در هکتار بسته به تعداد و میزان محدودیت‌های اقلیم، زمین و خاک متغیر است. اما باغاتی وجود دارند که به دلیل احداث در اراضی نامناسب عملکردشان کمتر از ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار است و توجیه اقتصادی ندارند (۱۱).

می‌توان گفت پسته‌کاری در استان آذربایجان شرقی عکس‌العمل زارعین برای مقابله با خشکسالی‌های اخیر و پسروری دریاچه ارومیه است و یکی از راهکارهای پیشنهادی برای سازگاری با تغییر اقلیم است که خوب عمل کرده است. در شرایط فعلی قابلیت استان برای کاشت این محصول بسیار بیشتر از سطح فعلی است اما ضروری است که با انجام مطالعات دقیق‌تر، از کاشت آن در اراضی با تناسب بحرانی که در مجاورت اراضی نسبتاً مناسب قرار دارند جلوگیری شود. توصیه شده است برای تولید اقتصادی محصولات کشاورزی بایستی اراضی

نتیجه گیری

مدل AHP روشی قوی در امر تصمیم‌گیری چند معیاری است. این مدل به دلیل وزن‌دهی به معیارها و مقایسه زوجی آن‌ها نسبت به هم و نسبت به هدف دقت بالایی در مکان‌یابی دارد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بخش قابل توجهی از اراضی کشاورزی استان آذربایجان شرقی از قابلیت‌های لازم برای کشت پسته برخوردار نیستند. با توجه به متحمل بودن این محصول به کم آبی و شوری آب و خاک جایگزینی کشت آن با محصولات با نیاز آبی بالا صرفاً در اراضی که در کلاس نسبتاً مناسب قرار دارند علاوه بر سودآوری مناسب موجب صرفه‌جویی در مصرف آب نیز خواهد شد. اگر چه جدول نیازهای رویشی گیاه پسته بر مبنای خصوصیات اراضی مناطق تحت کشت پسته کشور تهیه شده است. اما بدلیل

منابع

جوان بودن اغلب باغات در استان آذربایجان شرقی توصیه می‌شود این جداول در سال‌های آتی در سطح باغات بیشتری بررسی و در صورت لزوم اصلاح شود.

محدودیت منابع آب در اکثر مناطق کشور از جمله این استان، کشاورزان را به کاشت پسته ترغیب نموده است بطوری که سطح زیر کشت آن بسرعت در حال افزایش است و در بیشتر موارد مکان‌یابی به صورت سعی و خطا و اطلاعات تجربی می‌باشد. نتایج این مطالعات می‌تواند در بسیاری از موارد از هدر رفت منابع تولید جلوگیری نماید. با توجه به محدودیت منابع تولید در اکثر مناطق استان، از کاشت و توسعه باغات پسته در اراضی که در این تحقیق در کلاس‌های تناسب بحرانی و نامناسب قرار گرفتند پرهیز شود.

- 1- Abdel Rahman M., Natarajan E., and Hegde R. 2016. Assessment of land suitability and capability by integrating remote sensing and GIS for agriculture in Chamarajanagar district, Karnataka, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 19(1): 125-141.
- 2- Alavizadeh S., Monazam Ismailpour A., and Hoseinzadeh Kermani M. 2013. Possibility study of areas with potential cultivation of saffron in Kashmar plain using GIS. *Saffron Agronomy & Technology* 1(1): 71-95. (In Persian with English abstract)
- 3- Anonymous. 2016. East Azerbaijan meteorology statistics. East Azerbaijan meteorology Organization. (In Persian)
- 4- Anonymous. 2015. Statistics of Jihad-e-Agriculture Organization of East Azerbaijan province. Statistics of Jihad-e-Agriculture Organization of East Azerbaijan province. (In Persian)
- 5- Anonymous. 2004. Preparation of country vegetation map. Organization of forests, pastures and watershed management. Ministry of Agriculture. (In Persian)
- 6- Boriss H. Pistachio Profile. 2015. Agricultural Marketing Resource Center.
- 7- Bown W.M. 1993. AHP, Multiple Criteria Evaluation in Klosterman, Spreadsheet Models for Urban and Regional Analysis. New Brunswick Center for Urban Policy Research. Springer. USA.
- 8- Dengiz O., and Usul M. 2018. Multi-criteria approach with linear combination technique and analytical hierarchy process in land evaluation studies. *Eurasian Journal Soil Science* 7(1): 20-29.
- 9- ESRI. ArcGIS10.3 for Desktop. 2015. Environmental Systems Research Institute: ESRI Redlands, CA, USA.
- 10- Fal Soleyman M., Hajipour M., and Sadeghi H. 2013. Comparison of the efficiency of multi-criteria decision making methods (AHP) and TOPSIS in order to determine the susceptible areas for pistachio cultivation in Mokhtaran plain of Birjand city in GIS environment. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences* 31: 133-155. (In Persian with English abstract)
- 11- Farajnia A., and Zeinadin A. 2018. Rating of crop requirements and land characteristics of pistachio in East Azarbaijan Provinces. Final provincial research report. East Azarbaijan Agricultur and Natural center.
- 12- FAO. 1996. Agro-ecological zoning: Guidelines. *FAO Soils Bull*: 73.
- 13- Ferguson L., Polito V., and Kallsen C. 2015. The Pistachio Tree; Botany and Physiology. *Fruits and Nuts*. UC Davis.
- 14- Fischer G., and Nachtergaele F.O., Prieler S., Teixeira E., Toth G., Van Velthuisen H., Verelst L., and Wiberg D. 2012. Global Agro-Ecological Zones – Model Documentation GAEZ. V. 3. 0. IIASA/FAO, Laxenburg, Austria/Rome, Italy.
- 15- Girmay G., Sebnie W., and Reda R. 2018. Land capability classification and suitability assessment for selected crops in Gateno watershed, Ethiopia. *Cogent Food & Agriculture*.
- 16- Ismailpour A., Emami Y., Basirat M., Tajabadipour A., Javanshah A., Hakmabadi H., Hosseini Fard J., Hagdal M., Shaker Ardakani A., Sedaghat R., Sedaghati N., Mohammadi A., Mehrnejad M., and Hashemi Rad H. 2016. Pistachio: From production to consumption. Agricultural Education Publishing Publications. (In Persian)

- 17- Jahanbakhsh S. 2011. Drought monitoring and forecasting and its effects on the agricultural sector of East Azerbaijan province. Deputy of Development, Management and Human Resources of the Governor's Office of Education and Research. (In Persian)
- 18- Jamil M., Ahmed R., and Sajjad H. 2018. Land suitability assessment for sugarcane cultivation in Bijnor district, India using geographic information system and fuzzy analytical hierarchy process. *Geo Journal* 83(3): 595-611.
- 19- Kamali A., and Owji A. 2016. Agro ecological requirements for growing pistachio trees: A literature Review. *Elixir Agriculture* 96: 41450-41454.
- 20- Khoshshal Dastjerdi J., and Shahsavari S. 2005. Investigation of environmental conditions and calculation of heat needs of killed pistachios in Borkhar plain, Research of Humanities, University of Isfahan. 18 (Special issue of Geography) 193-210. (In Persian)
- 21- Lashkari H., and Kaykhosravi Q. 2009. Locating suitable places for pistachio cultivation in Sabzevar city by using the GIS method, along with models (Boolean and AHP models). *Journal of Geography and Planning* 27: 95-139. (In Persian with English abstract)
- 22- Layomi Jayasinghe S., Kumar L., and Sandamali J. 2019. Assessment of Potential Land Suitability for Tea (*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze) in Sri Lanka Using a GIS-Based Multi-Criteria Approach. *Agriculture*.
- 23- Mahmoudabadi M. 2010. Agricultural Climate Zoning for Pistachio in Kerman Province. Master Thesis, Department of Geography, Faculty of Humanities of Yazd University. (In Persian with English abstract)
- 24- Mamet N.J.Z., and Daniel J.K. 2007. Statistical analyses on time complexity and rank consistency between singular value decomposition and the duality approach in AHP: A case study of faculty member selection. *Mathematical and Computer Modelling* 46: 1099-1106.
- 25- Marinoni O. 2007. Some Words on the Analysis Hierarchy Process and the Provided Arc GIS extension 2007", ext-ahp, Retrieved.
- 26- Mirmosavian S.H., and Mirian M. 2014. Study and zoning of geographical features of Pistachio cultivation in Zanjan province. *Journal of Geography and Planning*, Volume 18, Number 49: 295-315. (In Persian with English abstract)
- 27- Naini M.R. 2016. Familiarity with planting and holding Pistachios. Qom Agricultural and Natural Resources Research Center Publications. (In Persian)
- 28- Nasrallahi N., Kazemi H., Kamkar B., and Sadeghi S. 2014. Agroecological evaluation of Aq-Qala Township (Golestan Province) for dry land wheat cultivation using geographical information system (GIS). *Agronomy Journal* 110: 83-94.
- 29- Owji A. 2011. Geostatistical zoning of land quality fit for pistachios in Hormozabad region of Rafsanjan. Master's thesis, Faculty of Agriculture, Valiasr University of Rafsanjan. (In Persian with English abstract)
- 30- Ozden-Tokatli Y., Akdamir H., Tilkat E., and Onay A. 2010. Current status and conservation of pistachio germplasm. *Biotechnological Advance* 28: 130-141.
- 31- Portaheri M., Ahmadabadi A., and Rahbari M. 2015. Feasibility study of areas prone to pistachio cultivation in Damghan city using Vickor approach. *Journal of Regional Planning* 5(2): 110-97. (In Persian with English abstract)
- 32- Saaty T.L. 1987. *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- 33- Sys C., Vanraet E., and Debavey J. 1991. Land evaluation Parts I, II, III general administration for development cooperation agricultural Pub. No. 7. Brussels, Belgium
- 34- Zeinadin A., Tumanian N., Navidi M.N., Farajnia A., and Seyed Jalali S.A. 2019. Crop requirements of garden plants. *Agricultural Research and Education Organization and Natural Resources*.
- 35- Zeinadin A., Eskandari M., Hoseinifard S., Farajnia A., Tumanian N., and Qasemzadeh Ganjaei M. 2019. Rating of crop requirements and land characteristics of pistachio in Kerman, Khorasan Razavi, Fars, Isfahan and East Azarbaijan provinces. Final Report No: 56765. *Agricultural Research and Education Organization and Natural Resources*. (In Persian with English abstract)



Application of FAO Agro-ecological Model for Locating Areas Prone to Pistachio Cultivation in East Azerbaijan Province

A. Farajnia^{1*}- K. Moravej²- P. Alamdari³- M. Eslahi⁴

Received: 24-07-2021

Accepted: 25-09-2021

Introduction: FAO agro-ecological model determines the production capacity, creating a logical relationship between the natural potential of the environment, the needs of communities, human activities, and sustainable adaptation. With the development of plant growth simulation models, researchers have begun a large-scale effort to agroecological zoning of various crops on a regional scale. In this method, an area was divided into homogeneous units with maximum similarity in terms of climate and land characteristics. Then, the potential yield map predicted by a simulation model is used for zoning. Pistachio is a subtropical plant that has long been cultivated in the central areas of Iran. With the occurrence of drought in the last two decades, farmers cultivated Pistachio in East Azerbaijan province without considering this crop requirement. This study aimed to use the AHP model to evaluate the suitability of East Azerbaijan lands for cultivating pistachio.

Methods and Materials: East Azerbaijan province is located in the northwest of Iran, between the latitudes of 36° and 45° N and 26° and 39° E and the longitudes of 45° and 5° to 48° and 22° E based on the geographic coordinate system. The area of the province is 45800 square kilometers. The climate is generally cold and semi-arid, but it has different climates due to its diverse and extensive topography. The area of agricultural lands is estimated to be 18,000 square kilometers, which is about 39% of the total area. In this research, climatic data were collected for 30 years from Tabriz, Jolfa, Mianeh, Sarab, Maraghe, and Malekan synoptic stations, and from four neighboring stations of Orumieh, Khoy, Miandoab, and Parsabad. Three criteria (i.e. climate, land, and soil) and 11 sub-criteria were studied. The sub-climatic criteria included the average temperature of the growing season, average temperature in the pollination stage, absolute minimum temperature in the coldest month of the year, and average percentage of relative humidity in the flowering stage. Land criteria were land use sub-criteria, land slope, and slope directions, and soil criteria were salinity (electrical conductivity of saturated extract), pH, soil texture, and soil lime content (CaCO₃). The results of the analysis of about 9000 soil samples were prepared for zoning of soil factors from East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research Center. Land characteristics of slope map and aspects were prepared from the digital elevation map of the study area and land use map was obtained base on the map provided by the Forests and Rangelands Research Institute of Iran. The parameters were then weighted upon AHP by the parameter importance for each region. Data were transferred to Expert Choice software and clustered, rated, integrated for producing the final layer.

Results and Discussion: According to the AHP model, there are no entirely suitable class areas for pistachio cultivation in East Azerbaijan province. Because one or more factors or sub-criteria created low restrictions for the cultivation of this crop. The results showed that 3887 square kilometers or 8.5% of the area was classified as a relatively suitable class. Although this area has low restrictions for pistachio planting, the profitability of this complex has increased the area of pistachio orchards rapidly. The suitable lands are mainly located by the agricultural lands and if water requirement could be met, they can be allocated for planting. The low water requirement and tolerance to salinity compared to other crops can be considered as the advantages of cultivating pistachio. Since 1998, droughts have occurred in different areas of the province. It caused a decrease in agricultural products by up to 35%. The declining water level of Lake Urmia is one of the consequences of the recent droughts, deteriorating the groundwater quantity and quality. The 6250 square kilometers (13.6%) of the province's lands was classified as the critically suitable class. Some of the sub-criteria studied in these lands such as the average temperature of pollination period, the average temperature of the growth period, amount and direction of slope, and soil texture were in the critical classes. The 35663 square kilometers (77.9%) of the

1- Scientific Member of Soil and Water Research Department, East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center and Ph.D. Graduate, Department of Soil Science, Faculty of agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(*- Corresponding Author Email: farajnia1966@yahoo.com)

2 and 3- Assistant Professors, Department of Soil Science, Faculty of agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

4- Expert of the General Meteorological Department of East Azerbaijan Province, Tabriz

DOI: 10.22067/JSW.2021.71439.1066

studied lands were found to be unsuitable (N). The main reason for the unsuitability was the very high salinity of lands, as seen in the soil salinity map. Although it is a modifiable factor, the lack of quality for leaching, heavy soil texture, and the impossibility of draining drainage due to flatness, render the reclamation of these lands impossible. Under the current situation, East Azerbaijan province is much more capable of planting this crop. However, it is necessary to conduct more detailed studies to avoid pistachio cultivation in marginal suitable lands.

Keywords: AHP, Agro-ecological model, East Azerbaijan province, Land suitability, Pistachio



مقاله پژوهشی

مدل سازی تغییرات عمقی کربنات کلسیم معادل خاک با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین در دشت قزوین

سید روح اله موسوی^۱ - فریدون سرمیدیان^{۲*} - محمود امید^۳ - پاتریک بوگارت^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

چکیده

کربنات کلسیم معادل یکی از ویژگی های کلیدی خاک های مناطق خشک و نیمه خشک است که بررسی تغییرات سطحی و عمقی آن از اهمیت ویژه ای در بهره برداری پایدار از خاک های زراعی برخوردار است. هدف از این تحقیق مدل سازی مکانی کربنات کلسیم معادل (CCE) در پنج عمق استاندارد ۱۰۰-۶۰، ۶۰-۳۰، ۳۰-۱۵، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی متر متناظر با پروژه جهانی نقشه خاک با استفاده از سه الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF)، رگرسیون درخت تصمیم (DTr) و k-نزدیک ترین همسایگی (k-NN) بود. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی شامل حفر ۲۷۸ خاکرخ، نمونه برداری و انجام تجزیه های فیزیکوشیمیایی مورد نظر بود. متغیرهای کمکی شامل مشتقات مدل رقومی ارتفاع، شاخص های سنجش از دور، داده های اقلیمی و خاک بودند که انتخاب دسته مناسب آن ها با استفاده از روش تجزیه مؤلفه های اصلی (PCA) و نظر کارشناس انجام گردید. همسان سازی مقادیر CCE در اعماق استاندارد به وسیله تابع عمق اسپیلاین اجرا گردید. بر اساس روش PCA در مؤلفه های اول تا پنجم با توجه بیش از ۸۰٪ واریانس تجمعی، متغیرهای کمکی شاخص همواری دره با وضوح مکانی بالا (MrVBF)، میانگین دمای سالانه (MAT)، شاخص سبزی (Greenness)، احتمال افق کلسیک (Cal.hr) و شاخص اثر باد (Wind Effect) و براساس نظر کارشناس، درصد رس (Clay) انتخاب گردیدند. الگوریتم RF در مقایسه با دو الگوریتم دیگر (k-NN، DTr) با دامنه مقادیر R^2 برابر ۰/۸۳ - ۰/۷۶ و RMSE برابر ۲/۱۴ - ۳/۲۱ درصد بالاترین میزان دقت و حداقل خطا را ارائه نمود. در سه عمق سطحی تغییرات مکانی CCE متأثر از متغیر Clay بود، در حالی که در اعماق زیرین Cal.hr مهم ترین فاکتور پیش بینی کننده آن بود. به طور کلی استفاده از رویکردهای نوین نقشه برداری در تهیه نقشه CCE به دلیل تأثیر این ویژگی بر روی قابلیت دسترسی رطوبت خاک و جذب عناصر غذایی توسط گیاهان بسیار کاربردی است.

واژه های کلیدی: اعماق استاندارد، تابع اسپیلاین، فاکتورهای خاک سازی، نقشه برداری رقومی خاک

مقدمه

روش های نقشه برداری رقومی خاک باهدف تولید نقشه های با ماهیت پیوسته به همراه اعتبارسنجی کمی و محاسبه عدم قطعیت آن ها یکی از روش های کاهش هزینه و زمان مطالعات خاک شناسی است (۶).

در این رویکرد از الگوریتم های یادگیری ماشین برای شناسایی رابطه بین داده های خاک و متغیرهای کمکی استفاده می شود و انتخاب بهینه الگوریتم پیش بینی کننده مکانی تأثیر بالایی در صحت نهایی نقشه های تولید شده دارد به طوری که در یک بررسی جامع از مطالعات ۱۰ سال اخیر توسط خالدیان و همکاران (۱۳) الگوریتم های رگرسیون خطی چندمتغیره (MLR)، K - نزدیک ترین همسایگی (k-NN)، رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR)، کوبیست (Cubist)، جنگل تصادفی (RF) و شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) بر اساس پنج فاکتور، کمی سازی فرا پارامترها، اندازه نمونه،

نقشه های خاک بیانگر نمایش ساده ای از الگوهای پیچیده و ناشناخته پراکنش مکانی ویژگی های خاک است (۲۸). استفاده از

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک و استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*) - نویسنده مسئول: Email: fsarmad@ut.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی ماشین های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- استاد دانشکده محیط زیست و علوم زمین، دانشگاه کاتولیک لوون، دی لوون، بلژیک

پیش‌بینی مکانی CCE در اعماق استاندارد ۱۰۰-۶۰، ۶۰-۳۰، ۳۰-۱۵، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی‌متر و (۲) شناسایی مهم‌ترین متغیرهای کمکی پیش‌بینی کننده CCE در خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک صورت پذیرفت.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر در بخشی از اراضی دشت قزوین با مساحت حدود ۶۰۰۰ هکتار در حفاصل دو استان قزوین و البرز صورت پذیرفت (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در حدواسط موقعیت‌های جغرافیایی "۵۰° ۳۵' ۳۵/۰۶" و "۵۰° ۲۹' ۲۵/۵۳" طول شرقی و "۳۸° ۵۴' ۳۸/۸۳" تا "۳۶° ۵۴' ۳۸/۸۳" عرض شمالی واقع شده است. بر اساس اطلاعات اقلیمی بلندمدت ۴۹ ساله (سازمان هواشناسی کشور) منطقه دارای میانگین بارش ۲۸۰ میلی‌متر و دمای ۱۴/۵ درجه سانتی‌گراد بوده که به ترتیب دارای رژیم‌های رطوبتی و حرارتی زیریک^۲، اردیک^۳، آکوئیک^۴ و ترمیک^۵ می‌باشد. بر اساس مطالعات میدانی و آنالیزهای آزمایشگاهی خاک‌های منطقه در هشت گروه بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند که سه کلاس هاپلوزرپتر^۶، کلسی زرپتر^۷ و هاپلوکلسیدز^۸ بیشترین مساحت منطقه مورد مطالعه را شامل می‌شوند (۳۶). کاربری غالب اراضی منطقه شامل زراعت آبی شامل محصولات یکساله و چندساله گندم، جو، ذرت، یونجه، کلزا، صیفی‌جات و محصولات باغی درختان انگور، گردو، گلابی و سیب به‌همراه مراتع شور و غیر شور می‌باشند.

روندنمای کلی تحقیق

در راستای توصیف هر چه بهتر چارچوب مورد استفاده در این تحقیق روندنمای^۹ کلی آن در شکل ۱ ارائه شده است؛ که مهمترین گام‌های آن شامل (۱) تهیه متغیرهای محیطی با قابلیت دست‌یابی آسان و حداقل هزینه (۲) انتخاب مناسب‌ترین متغیرهای محیطی با روش تجزیه مولفه‌های اصلی و نظر کارشناس (۳) مطالعات میدانی و نمونه‌برداری از خاک‌های مشاهداتی (۴) همسان‌سازی^{۱۰} مقادیر CCE در افق‌های ژنتیکی بر اساس اعماق استاندارد (۵)

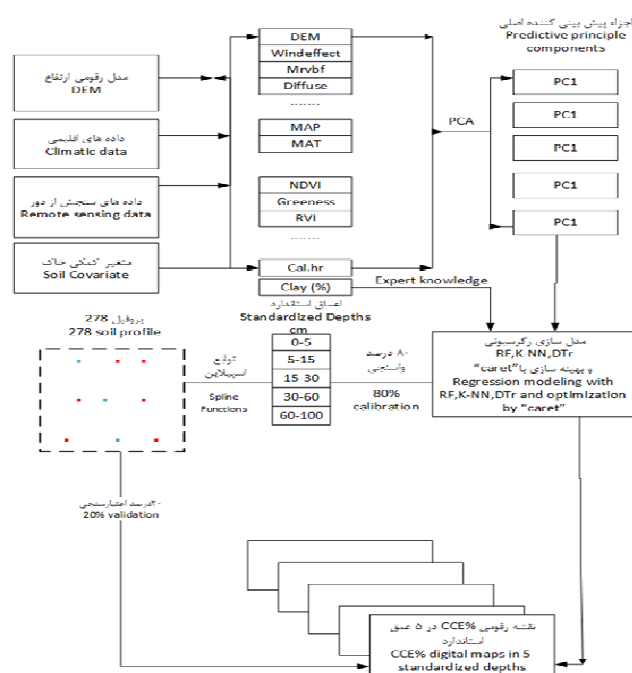
انتخاب متغیر، زمان یادگیری و تفسیرپذیری ارزیابی نموده و درمجموع الگوریتم RF را نسبت دیگر الگوریتم‌ها به‌عنوان مدل برتر معرفی نمودند. تاکنون استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی پیش‌بینی مکانی ویژگی‌های خاک در اعماق سطحی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (۴۵، ۳۷، ۲۹، ۲۷، ۲۱ و ۱۷)، و باوجود تغییرات پیوسته ویژگی‌ها با عمق، مدل‌سازی آن‌ها کمتر موردتوجه واقع شده است (۹، ۱۸ و ۳۳).

مدل‌سازی تغییرات عمقی خصوصیات خاک با توجه به تغییر ضخامت افق‌های خاک در گستره وسیع نیاز به استفاده از توابع هماهنگ‌سازی را توجیه نموده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به توابع اسپیلاین با سطوح یکسان اشاره نمود (۳۹، ۳۸، ۱۸ و ۲۳). کربنات کلسیم معادل (CCE) یکی از ویژگی‌های مهم خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک است که مطالعات اندکی در ارتباط با تغییرپذیری مکانی سطحی و عمقی آن به‌عنوان یکی از منابع پتانسیل میزان کربن غیر آلی ذخیره‌شده در خاک انجام شده است (۳۵ و ۱). در پژوهشی، تغییرات متوسط وزنی CCE تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر در دشت شهرکرد با استفاده از مدل‌های RF، SVR و ANN و متغیرهای محیطی مساحت حوزه آبخیز و سطح اساس شبکه کانال^۱ بررسی و ANN به‌عنوان مدل با خطای کمتر معرفی گردید (۶). همچنین اسرویناس و همکاران (۳۵) از مدل RF در مقیاس قاره هند برای مدل‌سازی چگالی کربنات کلسیم تا ۱۰۰ سانتی‌متر بدون لحاظ توابع عمقی استفاده نموده و دقت بالایی را گزارش نمودند. در مطالعات ایران نیز زراعت پیشه و همکاران (۴۵) و مصلح و همکاران (۲۰) در دشت‌های فلات مرکزی از مدل‌های RF، MLR، Cubist برای مدل‌سازی CCE سطحی استفاده نموده و دقت متوسط به پایین را گزارش نمودند. همچنین در منطقه مورد مطالعه (۲۲ و ۷) با استفاده از روش‌های زمین‌آماري اقدام به تهیه نقشه تغییرات مکانی CCE در خاک سطحی نموده‌اند و نتایج خوب تا متوسطی را گزارش نموده‌اند. امیریان چکان و همکاران (۱) تغییرات عمودی و جانبی کربنات کلسیم معادل در دشت سیلاخور با استفاده از توابع اسپیلاین و زمین‌آمار بررسی کردند و نتایج حاکی از دقت خوب توابع اسپیلاین در تخمین عمقی CCE است.

با این‌وجود مطالعات محدودی در ارتباط با بررسی تغییرات عمقی و جانبی CCE با استفاده هم‌زمان از توابع عمق اسپیلاین، مدل‌های یادگیری ماشین، متغیرهای محیطی و ویژگی‌هایی از جنس خود خاک به‌عنوان فاکتور "s" در معادله اسکورپن صورت پذیرفته است؛ بنابراین پژوهش حاضر با اهداف (۱) مقایسه کارایی سه الگوریتم یادگیری ماشین RF، DTr و k-NN در تهیه نقشه‌های

- 2- Xeric
- 3- Aridic
- 4- Aquic
- 5- Thermic
- 6- Haploxerepts
- 7- Calcixerepts
- 8- Haplocalcids
- 9- Flowchart
- 10- Harmonization

- 1- Channel network base level



شکل ۱- روندنمای کلی تحقیق
Figure 1- The flowchart of this research

انتخاب مناسبترین متغیرهای کمکی از یک رویکرد نیمه خودکار^۳ - نظارت نشده، به نام تجزیه مولفه های اصلی^۴ (PCA) استفاده گردید (۱۳). مولفه های اصلی با ارزش ویژه^۵ بزرگتر از "یک" مورد بررسی قرار گرفتند. درون هر مولفه اصلی (PC) متغیرهای کمکی که دارای بالاترین مقادیر بودند به همراه سایر شاخص هایی که در ۱۰٪ با آنها باشند، شناسایی شدند. سپس بر اساس تطبیق ویژگی های منتخب در هر PC با ضریب همبستگی بین آنها، در صورت وجود همبستگی بالا (با فرض ضریب همبستگی بیشتر از ۰/۶) بین آنها در نهایت متغیر کمکی که بالاترین مقدار را داشت، نگه داشته شده و بقیه حذف گردیدند (۳۴). تجزیه مولفه های اصلی در نرم افزار SPSS نسخه ۲۱ انجام گردید.

مطالعات نمونه برداری خاک و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی
در این پژوهش نمونه برداری از مجموع ۲۷۸ خاکرخ انجام گرفت (شکل ۳).

مدلسازی مکانی CCE با استفاده از الگوریتم های RF، DTr و k-NN (۶) اعتبارسنجی نتایج مدل سازی با استفاده از آماره های اعتبارسنجی (۷) تهیه نقشه های پراکنش مکانی CCE در اعماق استاندارد متناظر با پروژه جهانی نقشه خاک^۱ بر اساس مناسبترین الگوریتم یادگیری ماشین انجام گردید.

متغیرهای محیطی

در این تحقیق مجموعه ای از متغیرهای محیطی با قابلیت دسترسی آسان و هزینه حداقل که شامل مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع با وضوح مکانی ۱۲/۵ متر نماینده فاکتور "r"، شاخص های قابل تهیه از نسبت گیری باندهای ماهواره لندست ۸ با وضوح مکانی ۳۰ متر نماینده فاکتور "o" و اجزا بافت خاک (درصد رس، سیلت و شن) و نقشه احتمال افق مشخصه کلسیک^۲ (Cal.hr) به عنوان نماینده فاکتور "s" در مدل اسکورپن استفاده گردید. در مجموع ۲۲ متغیر محیطی از منابع اشاره شده تهیه گردیدند (جدول ۱) که شش مورد از مهمترین آنها در شکل ۲ ارائه شده است. برای

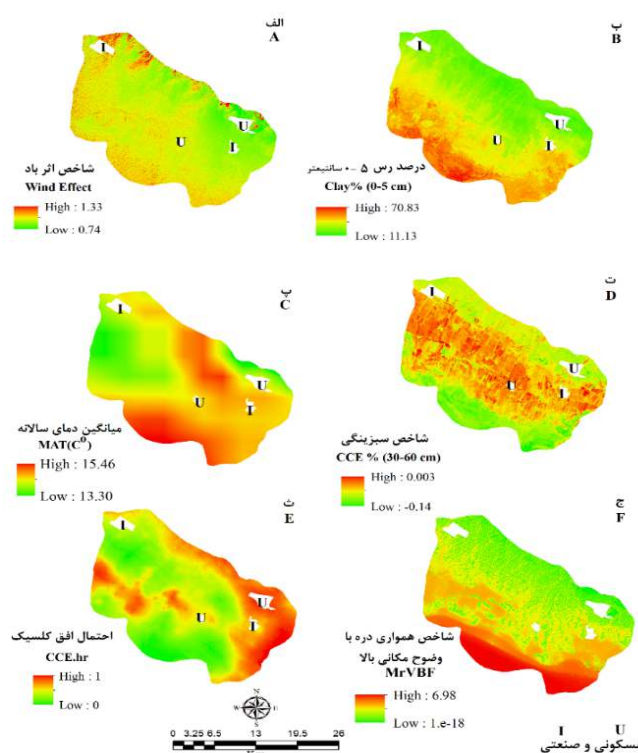
3- Semi-automated

4- Principal component analysis

5- Eigenvalues

1- Global soil map project

2- Calcic diagnostic horizon



شکل ۲- نمونه‌ای از مهمترین متغیرهای محیطی

Figure 2- Example of the most importance environmental covariates

۱۵-۳۰، ۱۵-۵، ۵-۰ سانتی‌متر استاندارد گردیدند. به‌منظور استانداردسازی و همگن‌سازی، معادله عمق اسپیلاین^۳ با سطح برابر به داده‌های CCE در هریک از افق‌های ژنتیکی برازش شد (شکل ۴). خلاصه آماری داده‌های CCE خاک در هر یک از اعماق استاندارد (جدول ۱) در نرم‌افزار تجزیه و تحلیل آماری R نسخه 4.0.3 انجام گردید.

مدل‌سازی مکانی

در این تحقیق از سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF)، رگرسیون درخت تصمیم (DTr) و k-نزدیکترین همسایگی (k-NN) به منظور مدل‌سازی مکانی تغییرات عمقی CCE در پنج عمق استاندارد ۱۰۰-۶۰، ۶۰-۳۰، ۳۰-۱۵، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی‌متر استفاده گردید. کلیه مراحل مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار متن باز آماری R و با استفاده از بسته‌های تخصصی "caret"، "random Forest" و "rpart" صورت پذیرفت.

موقعیت نقاط نمونه‌برداری با توجه به وضعیت زمین‌نما (فیزیوگرافی، کاربری اراضی، سهولت دسترسی) بر اساس روش طبقه‌بندی تصادفی و نظر کارشناس طراحی و سپس با استفاده از سیستم موقعیت یاب جهانی^۱ (مدل گارمین ۶۲ اس^۲) جانمایی و حفر گردیدند. نمونه‌برداری خاک از کلیه افق‌های ژنتیکی قابل شناسایی انجام و در ادامه برای انجام آزمایش‌های مورد نظر به آزمایشگاه منتقل گردیدند. پس از هوا خشک شدن نمونه‌های خاک و عبور آنها از الک ۲ میلی‌متری، مقادیر درصد کربنات کلسیم معادل (CCE) برای ۸۳۵ نمونه خاک جمع‌آوری شده به روش تیتراسیون (۲۵) اندازه‌گیری گردید.

استانداردسازی تغییرات عمق خاک

به‌منظور هماهنگ‌سازی نتایج مدل‌سازی در این تحقیق با مطالعات جهانی نقشه‌های خاک (۹)، تهیه و مقادیر CCE خاک‌ها بر اساس اصول تعریف شده توسط (۲) در پنج عمق ۶۰-۳۰، ۱۰۰-۶۰، ۶۰-۳۰، ۳۰-۱۵، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی‌متر استاندارد گردیدند.

1- Geographic position system

2- Garmin 62s

3- Spline depth function

جدول ۱- متغیرهای محیطی مورد استفاده برای مدل سازی مکانی CCE%
Table 1- Environmental covariates applied for spatial modeling of CCE%

فاکتور خاک سازی Soil forming factors	متغیر کمکی محیطی Environmental covariates	نام متغیر و نماد Covariate and symbol
	مدل رقومی ارتفاع	Digital elevation model
	شاخص اثر باد	Wind effect
	شاخص همواری دره با وضوح مکانی بالا	Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)
	شدت تابش پخشیده	Diffuse insulation
	عمق دره	Valley depth
توپوگرافی Relief (r)	شاخص موقعیت توپوگرافی	Topographic position index
	مساحت حوضه آبخیز	Catchment area
	طول در درجه شیب	LS-Factor
	موقعیت نسبی شیب	Relative slope position
	شاخص خیس توپوگرافی	Topographic wetness index
	شیب	Slope
	جهت شیب	Aspect
اقلیم Climate (c)	میانگین دمای سالانه	Mean annual temperature (MAT)
	میانگین بارندگی سالانه	Mean annual precipitation
	شاخص تفاضلی پوشش گیاهی	$DVI = NIR - RED$
	Difference Vegetation Index	
	شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده	$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$
	Normalized Difference Vegetation Index	
	شاخص پوشش گیاهی نسبی	$RVI = RED - NIR$
ارگانیسم Organism (o)	Relative Vegetation Index	
	شاخص پوشش گیاهی تعدیل یافته خاک	$SAVI = [(NIR - R) / (NIR + R)] * (1 + S)$
	Soil adjusted Vegetation Index	
	شاخص سبزیگی	$Greenness = -0.2848 (B2) - 0.2435 (B3) - 0.5436 (B4) + 0.7243 (B5) + 0.0840 (B6) - 0.1800 (B7)$
	Greenness index	
	شاخص روشنایی	$Brightness = 0.3037 (B2) + 0.2793 (B3) + 0.4743 (B4) + 0.5585 (B4) + 0.5082 (B6) + 0.1863 (B7)$
	Brightness index	
خاک Soil (o)	احتمال حضور افق کلسیک	Cal.hr
	Probability of calcic horizon	
	اجزا بافت خاک (رس)	Clay
	Soil texture component (Clay)	

عموماً برابر مقدار ۰/۵ برای تعدیل اثر خاک پس زمینه: Bands numbers, B2: Blue, B3: Green, B4: RED, B5: NIR, B6: SWIR1, B7: SWIR2. S:

جنگل تصادفی

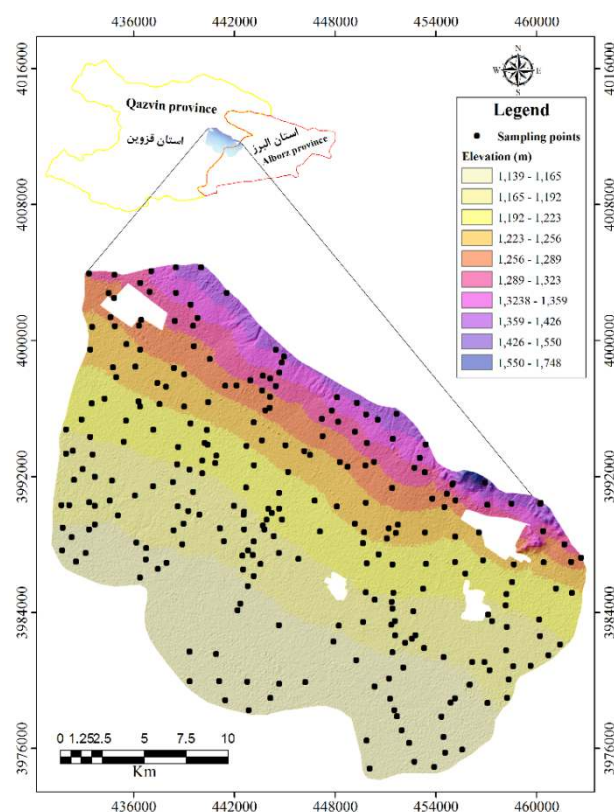
ایجاد شده پیش بینی نماید و در نهایت نتایج پیش بینی را به صورت رگرسیون خطی چند متغیره (۴۳) در برگ درختان قابل مشاهده است.

در این تحقیق از این الگوریتم جنگل تصادفی (RF) برای دست یافتن به پایدارترین نتایج در پیش بینی تغییرات عمودی CCE%، با تعداد درختان تصادفی ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ عدد درخت با فواصل ۱۰۰ عدد و بهینه ترین تعداد متغیرهای کمکی در انتهای هر گره با توجه به حداقل مقدار خطا (RMSE) مورد استفاده قرار گرفت.

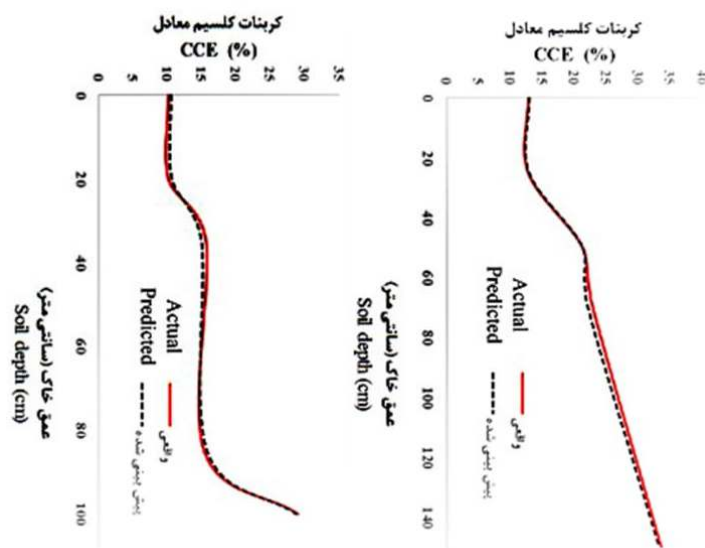
رگرسیون درخت تصمیم

مدل k-نزدیک ترین همسایگی یکی از روش های غیر پارامتریک است که اساس کارکرد آن به این شیوه است که ابتدا فاصله اقلیدسی بین نمونه خاک مورد نظر با سایر نقاط مشاهداتی محاسبه می گردد، سپس k تعداد از نمونه های مشاهداتی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند وزن دهی می گردند. در نهایت بر اساس وزن هر یک از نمونه ها در مجموعه ای با k تعداد نمونه، برآوردی از داده های مورد نظر با توجه به حداقل مقدار خطا در آن مجموعه صورت می پذیرد (۲۶).

این الگوریتم به عنوان یکی از الگوریتم های یادگیری ماشین با استفاده از مدل درختی M5 قادر است تا مقادیر متغیر هدف (CCE%) را بر اساس متغیرهای محیطی کمی در ساختار درختی



شکل ۳- موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه‌برداری بر روی نقشه طبقات ارتفاعی
Figure 3- The location of study area and sampling points under classified elevation map



شکل ۴- تغییرات عمقی CCE در دو نیمرخ مشاهداتی خاک
Figure 4- Vertical variation of CCE in two example profile

اعتبارسنجی نتایج مدل سازی

جهت ارزیابی کارکرد الگوریتم های یادگیری ماشین مورد استفاده در پیش بینی مکانی تغییرات عمقی CCE از سه شاخص آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میزان اریب (Bias) استفاده گردید (روابط ۱ و ۲ و ۳).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - P_i)^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - P_i}{n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در معادلات فوق Y_i : مقادیر اندازه گیری شده، P_i : مقادیر پیش بینی شده CCE خاک، $\bar{Y}$: میانگین مقادیر اندازه گیری شده و n : تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

توصیف آماری

نتایج خلاصه آماری حاکی از آن است (جدول ۲) که از سطح به عمق مقدار میانگین CCE در حال افزایش است. کمترین و بیشترین مقدار میانگین CCE به ترتیب مربوط به لایه های ۰-۵ و ۶۰-۱۰۰ سانتی متر است. حداکثر مقدار CCE نیز در عمق های ۱۵-۳۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی متر با مقادیر ۶۴٪ و ۶۲٪ و حداقل آن مربوط به دولا به ۵- و ۶۰-۳۰ سانتی متر با مقادیر ۲۷٪ و ۳۲٪ است. با توجه به مقادیر ضریب تغییرات در لایه ۵- سانتی متر با ۶۶٪ و

لایه ۶۰-۳۰ سانتی متر با ۵۸٪ بیشترین و کمترین مقدار تغییرات کربنات کلسیم معادل در خاک ها مشاهده گردید. بر اساس طبقه بندی ارائه شده توسط (۴۴) CCE در تمامی عمق ها دارای ضریب تغییرات بالا (بیش از ۳۵٪) است. در تحقیقات سایر محققین از قبیل ژائو و همکاران (۴۶) نیز روند افزایشی در مقدار CCE از سطح تا عمق ۵۰ سانتی متر مشاهده گردید و در اعماق بعد تا ۲۰۰ سانتی متر روند نسبتاً پایداری را در مورد تغییرات عمودی CCE گزارش نمودند. به طور کلی خاک های منطقه از نظر محتوای کربنات کلسیم معادل در کلاس آهکی تا آهکی متوسط قرار دارند (۴۱). به طور کلی در بخش های شمالی و مرکزی منطقه مطالعاتی افزایش میزان کربنات کلسیم از سطح به عمق که عمدتاً به دلیل تأثیر فرآیند آبشویی آن ها از لایه های سطحی که منجر به انتقال و انباشت آن ها در لایه های زیر سطحی (۴۰) را می توان بیان نمود.

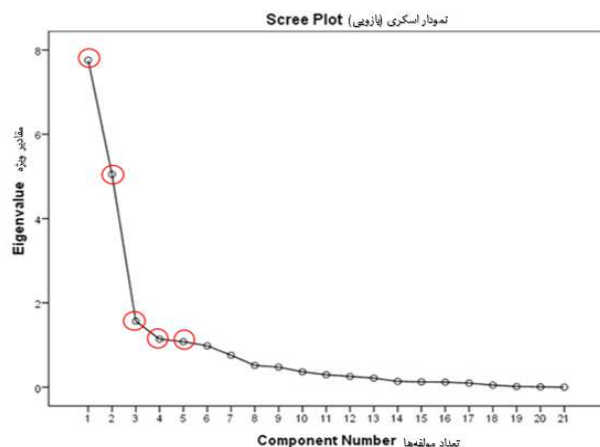
متغیرهای محیطی

نتایج روش PCA برای انتخاب مناسب ترین متغیرهای محیطی از میان مجموعه داده مورد استفاده نشان داد که در نهایت پنج مؤلفه اصلی از PC1 تا PC5 دارای مقادیر ارزش ویژه بالاتر از یک بودند (شکل ۵). در ادامه نتایج درصد واریانس منفرد پنج مؤلفه نخست به ترتیب نشان دهنده مقادیر ۲۶، ۲۰/۵، ۱۵، ۱۰ و ۹ بودند که در مجموع ۸۰/۵٪ از کل واریانس متغیرهای محیطی مورد را توجیه نمودند و در نهایت پنج متغیر کمکی MrVBF، MAT، Greenness، Cal.hr و Wind Effect بالاترین ضریب ارزش ویژه را نشان دادند و درصد رس (Clay) نیز بر اساس نظر کارشناس به فرآیند مدل سازی اضافه گردید. متغیرهای کمکی منتخب به نحوی توسط روش PCA و نظر کارشناس انتخاب شده اند.

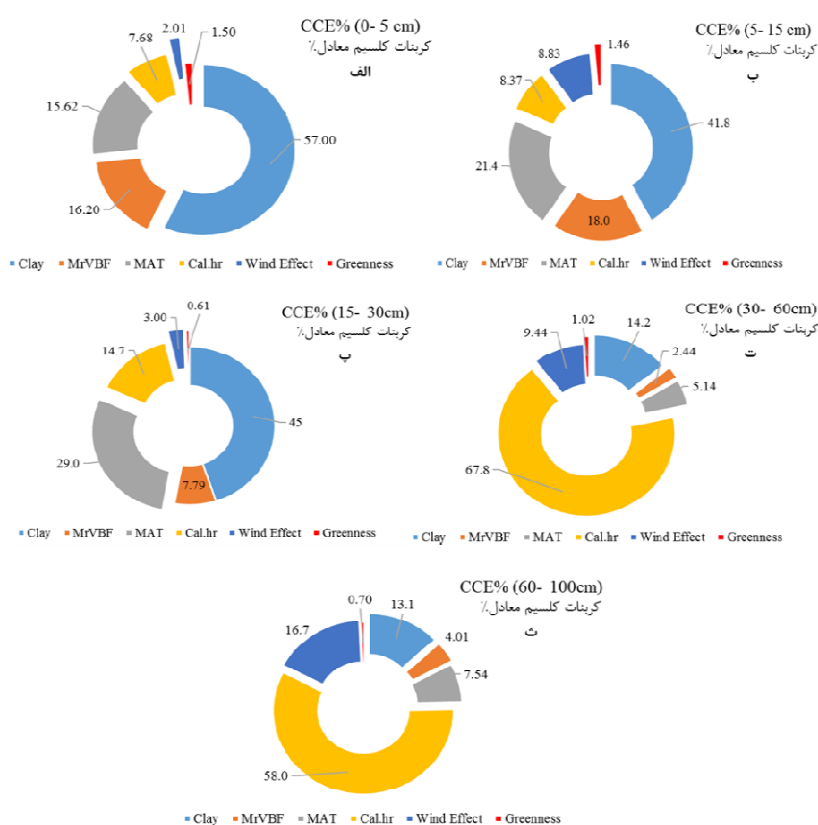
جدول ۲- خلاصه آماری مقادیر CCE% در اعماق استاندارد

Table 2- Summary statistical of CCE% in the standardized depth

عمق خاک (سانتی متر) Soil depth (cm)	آموزشی Train (220)					اعتبارسنجی Test (58)				
	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات	حداقل	میانگین	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات
	Min	Mean	Max	SD	CV (%)	Min	Mean	Max	SD	CV (%)
0-5	0.27	12.0	32	8.0	66.6	0.30	11.8	52	7.50	63.5
5-15	0.50	12.2	56	8.02	65.4	0.55	12.0	50	7.55	62
15-30	0.45	13.0	64	8.1	62.3	0.40	12.2	58	7.8	63
30-60	0.32	15.5	60	9.1	58.7	0.35	15.1	62	9.2	60
60-100	0.41	16.2	62	10.3	63.5	0.43	15.9	64	9.81	61



شکل ۵- نمودار اسکری (بازویی) برای تعیین تعداد مولفه‌های مناسب
Figure 5- The scree plot for determining the principal component number



شکل ۶- اهمیت نسبی متغیرهای محیطی در پیش‌بینی تغییرات عمقی CCE%
Figure 6- The relative importance of environmental covariates in prediction of CCE % depth variation

متغیرهای محیطی در پیش‌بینی ویژگی‌های فیزیکی خاک پیشنهاد نمودند. نتایج اهمیت نسبی^۱ متغیرهای محیطی پیش‌بینی کننده در

1- Relative importance

رحمانی و همکاران (۳۱) نیز از روش PCA استفاده نمودند و مشابه با نتایج این تحقیق پنج مؤلفه نخست در این روش حدود ۸۰/۲ درصد از واریانس مجموع را به خود اختصاص داد، در همین ارتباط امیریان چکان و همکاران (۵) روش PCA را برای انتخاب بهینه

اعماق استاندارد مورد بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است. بر اساس شکل های (۶ الف، ب و پ) متغیر خاک، Clay به ترتیب با توجیه ۵۷، ۴۱/۸ و ۴۵ درصد از کل واریانس تغییرات مکانی CCE را در سه عمق استاندارد ۵-۱۵، ۱۵-۳۰ و ۳۰-۱۵ سانتی متر بالاترین اهمیت نسبی را نسبت به سایر متغیرهای کمکی ارائه نمود. که مشاهده این نتایج بر اساس (شکل ۷ الف، ب و پ) که پراکنش مکانی آهک را به ترتیب در سه عمق استاندارد ۱۵-۳۰، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی متر را نشان می دهند با جدول همبستگی (جدول ۳) که نشان دهنده همبستگی مثبت و معنی دار درصد کربنات کلسیم معادل در این اعماق با درصد رس می باشد، که این نتایج با یافته های (۱۱) نیز همخوانی دارد. بعد از Clay در دو عمق اول (۵-۰ و ۵-۱۵) متغیر توپوگرافی MrVBF با توجیه به ترتیب ۱۸ و ۱۶ درصد از تغییرات CCE نسبت به سایر متغیرهای محیطی در درجه دوم اهمیت مشاهده گردید. در همین راستا موسوی و همکاران (۲۲) در مدل سازی مکانی کربنات کلسیم معادل و تهیه نقشه پیش بینی آن در خاک سطحی اراضی قروه-دهگلان مشاهده نمودند که متغیرهای محیطی توپوگرافی از قبیل DEM، شاخص موقعیت توپوگرافی و فاصله اقلیدسی از شبکه آبراهه بالاترین میزان اهمیت را دارا بودند. در اعماق استاندارد بعدی ۳۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی متر نتایج بیانگر بارزتر شدن نقش متغیر محیطی Cal.hr نسبت به سایر متغیرهای محیطی با ارائه ۶۷/۸ و ۵۸ درصد از کل واریانس تغییرات عمقی CCE بود؛ بنابراین به نظر می رسد برخلاف نتایج مولدر و همکاران (۲۴) که معتقدند از سطح به عمق به دلیل کاهش همبستگی فاکتورهای محیطی با ویژگی های خاک، دقت نقشه های پیش بینی کاهش می یابد، اما در این تحقیق به دلیل وجود متغیر کمکی Cal.hr که برگرفته از خود خاک است، موجب افزایش دقت مدل سازی در اعماق زیرسطحی گردید و به نحوی کاهش تأثیر متغیرهای محیطی در توجیه تغییرات عمقی ویژگی های خاک پوشش داده است. در پژوهش دیگری نیز نتایج محققین بیانگر اهمیت و تأثیر بیشتر متغیرهای کمکی (رس، کربن آلی) برگرفته از خاک، در نقشه برداری رقومی ویژگی های خاک نسبت به شاخص های سنجش دور بود (۴). همان گونه که مشاهده می گردد (شکل ۶) شاخص سنجش از دوری سبزینگی (Greenness) به طور کلی قادر به توجیه واریانس قابل توجهی از تغییرات CCE% نبود.

برخلاف نتایج تحقیق حاضر در مطالعه ای زراعت پیشه و همکاران (۴۰) همبستگی بالایی را بین متغیرهای سنجش از دور پوشش گیاهی و CCE گزارش کردند. روند اهمیت نسبی پارامتر اقلیمی MAT از لایه اول تا لایه استاندارد سوم افزایش یافت، به نحوی که بیشترین تأثیر آن در عمق ۱۵-۳۰ سانتی متر بود. متغیر کمکی Wind Effect در لایه های زیرین ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی متر نسبت به سه لایه ای استاندارد فوقانی اهمیت بیشتری را نشان داد. چنین به نظر می رسد، شاخص تأثیر باد در دو عمق آخر به دلیل تأثیر باد بر افزایش و یا کاهش میزان تبخیر و تعرق و تأثیرگذاری غیر مستقیم بر میزان انحلال و یا صعود موئینگی کربنات کلسیم معادل از پایین به بالا سبب تجمع کربنات کلسیم در اعماق مشاهده شده برای افق کلسیک گشته است هر چند که در این اعماق پارامتر دارای اهمیت بالا با بیش از ۶۰ درصد هنوز پارامتر Cal.hr می باشد و در درجه بعدی پارامتر اثر باد دارای درجه اهمیت نسبی بیش از ۱۵ درصد است. پارامترهای اقلیمی، توپوگرافی، مواد مادری و ارگانیک به عنوان فاکتورهای محیطی کنترل کننده تغییرات ویژگی های خاک می باشند (۱۶). به طور کلی نتایج اهمیت نسبی متغیرهای پیش بینی کننده CCE در لایه های سطحی و زیرسطحی نشان داد که تغییرات مکانی CCE به مقدار قابل توجهی در منطقه مورد مطالعه توسط رس و در اعماق زیرسطحی به وسیله نقشه احتمال افق مشخصه کلسیک قابل توجیه است که این نتیجه نشان از تأثیر بالای فاکتور "s" بر نتایج نقشه برداری رقومی ویژگی های خاک است.

ارزیابی کارایی الگوریتم های یادگیری ماشین

نتایج کارایی الگوریتم های یادگیری ماشین RF، DTr و k-NN در پیش بینی تغییرات مکانی CCE از سطح به عمق در جدول ۴ ارائه شده است. الگوریتم RF بر اساس آماره های R^2 و RMSE دارای بالاترین میزان دقت و حداقل خطا بود. به نحوی که مقدار آماره R^2 در الگوریتم RF از ۰/۷۶ تا ۰/۸۳ و مقادیر RMSE از ۳/۲۱٪ در لایه ۵-۰ سانتی متر تا ۱/۱۴٪ در لایه ۱۰۰-۶۰ سانتی متر متغیر است. به طور کلی بر مبنای RF از سطح به عمق با افزایش R^2 ، مقدار RMSE یک روند کاهشی را نشان می دهد. در حالی که مقدار Bias در امتداد پروفیل خاک یک روند نامنظم را نشان داد.

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون بین درصد رس و کربنات کلسیم معادل در پنج عمق استاندارد (عمق بر حسی سانتی متر)
Table 3- Pearson correlation coefficient between Clay and CCE in five standard depths (cm)

متغیرهای خاک	Clay (0-5)	Clay (5-15)	Clay (15-30)	Clay (30-60)	Clay (60-100)
CCE (0-5)	0.22**				
CCE (5-15)		0.23**			
CCE (15-30)			0.25**		
CCE (30-60)				0.23**	
CCE (60-100)					0.23**

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی الگوریتم‌های پیش‌بینی کننده CCE% در اعماق استاندارد
Table 4- Validation results of CCE% prediction algorithms in standard depths

عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	الگوریتم یادگیری ماشین (MLA)	شاخص‌های اعتبارسنجی		
		ضریب تبیین R^2	جذر میانگین مربعات خطا RMSE (%)	اریب Bias
0-5		0.82	3.58	0.06
5-15		0.85	3.46	0.16
15-30	جنگل تصادفی (RF)	0.87	2.69	0.14
30-60		0.89	2.34	0.29
60-100		0.90	2.14	0.33
0-5		0.39	5.14	0.35
5-15	رگرسیون درخت تصمیم (DTr)	0.41	5.05	0.32
15-30		0.48	4.23	0.28
30-60		0.51	4.01	0.25
60-100		0.52	3.91	-0.21
0-5	k- نزدیک‌ترین همسایه (k-NN)	0.37	5.18	0.29
5-15		0.29	5.96	0.53
15-30		0.39	5.10	-0.46
30-60		0.21	7.98	0.62
60-100		0.15	9.22	1.62

پنج عمق استاندارد بر اساس آن ارائه شده است (شکل ۷). روند کلی تغییرات CCE در سه لایه فوقانی خاک ۱۵-۳۰ و ۱۵-۵، ۵-۰ سانتی‌متر به یکدیگر مشابه است در حالی که با افزایش میزان عمق تغییرات توزیع مکانی آهک به‌ویژه در بخش‌های شمالی نشان‌دهنده افزایش میزان CCE است. بر اساس شکل‌های (۷ الف و ۷ ب و ۷ پ) که روندهای مشابه‌تری با یکدیگر دارند، بیشترین مقدار CCE در یک امتداد از شرق منطقه به غرب منطقه است. همان‌طور که در نتایج قبل توضیح داده شد، پیش‌ران‌های اصلی تغییرات CCE لایه‌های سطحی Clay و دو پارامتر توپوگرافی MrVBF و Wind Effect بوده است. در همین راستا کشاورزی و همکاران (۱۱) همبستگی مثبت و معنی‌داری (در سطح ۱ درصد) بین درصد رس و کربنات کلسیم معادل در منطقه زیاران دشت قزوین گزارش نمودند. با توجه به اینکه شکل غالب کربنات کلسیم مشاهده شده در خاک‌های منطقه از نوع ثانویه می‌بودند، این فرم از کربنات عمدتاً در خاکدانه‌های با اندازه رس و سیلت تشکیل می‌شوند (۱۲). در مطالعه‌ی دیگری محققین در مورد ارتباط رس و کربنات کلسیم معتقدند که در خاک‌هایی که مقدار فراوانی کربنات وجود دارد آنها با هم‌آوری رس در افق‌های فوقانی منجر به افزایش اندازه آن شده و در عمل از جابه‌جایی آن جلوگیری می‌کنند (۳). در منطقه پیرانشهر آذربایجان غربی نیز رضاپور (۳۲) مقادیر بالاتر کربنات کلسیم معادل را در افق سطحی خاک‌های ورتی‌سول نسبت به کمبی‌سول‌های تحت کاربری‌های زراعی و مرتعی در طی مطالعه خود گزارش نمود. بخش‌های شمالی منطقه دارای بیشترین میزان ارتفاع می‌باشند (شکل ۴) که به دلیل وجود ارتباط بین میزان ارتفاع، بارش و رژیم رطوبتی خاک (زرریک) و از طرفی بر اساس اطلاعات خاکشناسی این بخش‌ها دارای بافت سبک سطحی (لوم شنی)، زهکشی مناسب و درصد رس

در مدل DTr باوجود اینکه مقادیر دقت کمتر و خطای پیش‌بینی بیشتری برای CCE حاصل گردید اما روند مشابهی با RF نشان داد. نتایج کارایی این الگوریتم با مقادیر R^2 ۰/۳۹ تا ۰/۵۲ و RMSE ۳۰/۹۱ تا ۵/۱۴٪ متغیر بود (جدول ۲). برخلاف دو الگوریتم (RF و DTr) در مورد k-NN نتایج اعتبارسنجی آن به‌جز در لایه ۱۵-۳۰ سانتی‌متر، در کلیه لایه‌های استاندارد روند کاملاً متفاوتی را نشان داد، بطوری‌که از سطح به عمق با کاهش R^2 مقادیر RMSE افزایش یافت؛ بنابراین از نظر میزان دقت سه الگوریتم پیش‌بینی کننده مکانی به‌ترتیب RF دارای دقت پیش‌بینی خوب^۱، DTr متوسط^۲ و k-NN ضعیف^۳ می‌باشند (۴۲). در مطالعه مقایسه‌ای که در مرکز ایران انجام گردید دو مدل کوپست (CB) و سپس RF را در پیش‌بینی مکانی CCE در خاک سطحی به عنوان مدل برتر معرفی نمودند (۴۵). رحمانی و همکاران (۳۱) توانائی بالاتر مدل RF در مقایسه با روش SoLIM با مقادیر R^2 برابر ۰/۶۳ و ۰/۴۲ در پیش‌بینی CCE سطحی گزارش نمودند. همچنین در پژوهشی در غرب ایران، مدل RF با مقادیر $R^2=0/4$ و $RMSE=11/6\%$ نسبت به دو روش کریجینگ معمولی و وزن‌دهی معکوس فاصله در پیش‌بینی CCE (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر) به عنوان مدل برتر گزارش گردید (۲۱).

تغییرپذیری مکانی کربنات کلسیم معادل

با توجه به اینکه الگوریتم RF نسبت به دو روش دیگر بالاترین میزان صحت را ارائه نمود نقشه‌های نهایی پیش‌بینی مکانی CCE در

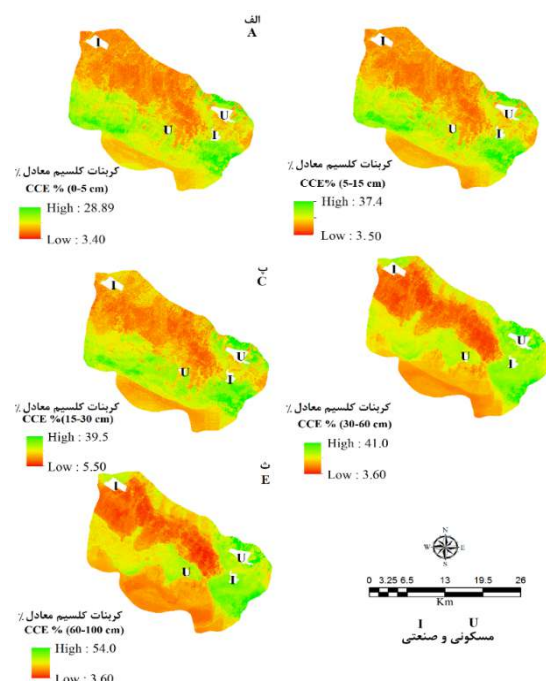
- 1- Well
- 2- Moderate
- 3- Weak

فراهم شده به ویژه مقادیر CCE در این مناطق به طور متوسط بیش از ۴۰٪ است. به طور کلی وضعیت خاک های منطقه در اعماق مورد پژوهش نشان می دهد که در لایه های سطحی ۱۵-۳۰ و ۵-۱۵، ۵-۰ سانتی متر حدود ۶۰٪ از خاک ها در کلاس آهکی ضعیف تا آهکی و مابقی آهکی متوسط تا آهکی شدید می باشند، در حالی که در اعماق زیرین ۳۰-۶۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی متر بیش از ۵۰ درصد منطقه در کلاس آهکی شدید، ۳۰٪ درصد در کلاس آهکی متوسط و حدود ۲۰٪ در کلاس آهکی و آهکی ضعیف قرار دارند (۱۹).

نتیجه گیری

پژوهش حاضر باهدف بررسی کارایی سه الگوریتم یادگیری ماشین RF، DTr و k-NN در مدل سازی و پیش بینی تغییرات مکانی CCE در پنج عمق استاندارد ۱۰۰-۶۰، ۶۰-۳۰، ۳۰-۱۵، ۱۵-۵ و ۵-۰ سانتی متر، متناظر با پروژه جهانی تهیه نقشه خاک اجرا گردید. به طور کلی نتایج استفاده از تابع اسپیلاین ارائه یک تخمین قابل قبول از مقادیر CCE در هر یک از اعماق مورد بررسی با حداقل خطا و حداکثر انطباق میان داده های واقعی و پیش بینی شده که می توان نتایج آن را برای همسازی ویژگی های خاک به ویژه CCE در سایر مناطق خشک و نیمه خشک، مشابه با شرایط منطقه مورد مطالعه استفاده نمود.

کمتر (شکل ۳ ب) منجر به شستشو و انتقال کربنات کلسیم از لایه های سطحی (۳۰-۰ سانتی متر) به اعماق زیرین شده است که این نتایج با مشاهدات (۳۰ و ۱) مطابقت دارد. در بخش های میانی منطقه به سمت شمال غرب به دلیل وجود کاربری زراعت آبی متمرکز، آبیاری طولانی مدت توسط کشاورزان و بافت سطحی متوسط (لوم) تا سبک (لوم شنی) کربنات کلسیم از سطح شسته و در اعماق پایین تر تجمع یافته است که شرایط این بخش از منطقه بر اساس کلیه نقشه های پیش بینی تا عمق ۱۰۰ سانتی متری CCE در حداقل میزان خود است (۸). دلیل پایین بودن مقدار CCE در بخش های جنوبی منطقه عمدتاً ناشی از حضور گچ و شوری بالا و نوع مواد مادری از نوع (سازند کفه های گلی نمکی) است که از نظر روند تکامل به دلیل میزان حلالیت بالاتر املاح و گچ نسبت به کربنات کلسیم موجب شده که عمق تجمع CCE خارج از حداکثر میزان عمق مورد مطالعه باشد (۸). در مورد اعماق زیرین ۶۰-۳۰ و ۱۰۰-۶۰ سانتی متر بر اساس نتایج اهمیت نسبی متغیر Cal.hr بیشترین میزان اهمیت را نسبت به سایر متغیرها داشت که موجب شده تا روند تغییرات زیرسطحی آهک به شکل قابل توجهی متأثر از تغییرات این ویژگی که از جنس خود خاک نیز است، مشاهده گردد. بر اساس شکل های (۷ ت و ۷ ث) در بخش های شرقی و شمال شرقی منطقه به دلیل وجود بافت خاک زیرسطحی سنگین تر (لوم رسی) نسبت به لایه های فوقانی به همراه آبشویی کمتر شرایط مناسبی برای تجمع کربنات کلسیم



شکل ۷- نقشه های رقومی تغییرات عمقی CCE با استفاده از مدل RF

Figure 7- Digital maps of CCE vertical variation by RF model

اعماق بود. با توجه به اینکه به‌طور عمده بخش‌های شمال شرق و میانی منطقه در کلاس آهکی شدید (۵۰-۲۵ درصد) قرار می‌گیرند، بنابراین به کارشناسان، مدیران و بهره‌برداران اراضی توصیه می‌گردد تا اقدامات اصلاحی از قبیل استفاده از کودهای آلی (حیوانی، کمپوست و ورمی کمپوست) و کودهای شیمیایی با پایه ترکیبات سولفات (سولفات آمونیوم) جهت تعدیل اثرات ناشی از حضور آهک در خاک مدنظر قرار دهند، و همچنین بهبود شرایط شیمیایی خاک را فراهم می‌نمایند و منجر به جذب بهتر عناصر غذایی ضروری پرمصرف مثل فسفر و کم مصرف (از قبیل روی، مس، آهن و منگنز) می‌انجامد، که در ادامه موجبات ارتقا حاصلخیزی خاک‌ها و افزایش عملکرد محصولات واقع در الگوی کشت منطقه گردد.

سپاسگزاری

از کلیه مدیران شهرستان و کارشناسان بخش کشاورزی نظرآباد جهت همکاری در انجام مراحل مطالعات میدانی و نمونه‌برداری خاک‌ها در راستای تکمیل هر چه بهتر این پژوهش همکاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

روش انتخاب متغیر PCA به‌خوبی توانست با تعیین پنج مؤلفه اصلی و انتخاب یک ویژگی با بالاترین ضریب ارزش ویژه در هر مؤلفه بیش از ۸۰٪ واریانس تجمعی متغیرهای محیطی موجود را تأمین نماید و همچنین پوشش کاملی از فاکتورهای مدل "scorpan" شامل توپوگرافی (Wind Effect، MrVBF)، ارگانیک (Greenness)، اقلیم (MAT) و خاک (Cal.hr) را ارائه نماید. الگوریتم یادگیری ماشین RF نسبت به دو الگوریتم دیگر (DTr و k-NN) بیشترین میزان دقت و حداقل خطا را در پیش‌بینی مکانی CCE در همه اعماق نشان داد؛ بنابراین استفاده از الگوریتم RF با ارائه نتایج قابل‌اعتماد برای تهیه نقشه تغییرات سطحی و عمقی ویژگی‌های خاک توصیه می‌گردد. پراکنش مکانی CCE در سه عمق استاندارد ۱۵-۳۰ و ۵-۱۵، ۵-۵ سانتی‌متر تا حد بسیار زیادی متأثر از تغییرات درصد رس در منطقه بود که همبستگی بالایی را با CCE نشان داد، درحالی‌که مقادیر CCE در اعماق ۶۰-۱۰۰ و ۶۰-۳۰ سانتی‌متر متأثر از نقشه احتمال افق کلسیک (Cal.hr) به‌عنوان مهم‌ترین پیش‌ران تغییرات این ویژگی بود که نشان از غالبیت فرآیندهای ژنتیکی خاک و تأثیر بیشتر آن‌ها در توجیه تغییرات مکانی CCE نسبت به سایر فاکتورهای خاکسازي مورد استفاده در این

منابع

- 1- Amirian C.A., Taghizadeh Mehrjardi R., Sarmadian F., and Mohammadi J. 2018. Study of lateral and vertical distribution of soil calcium carbonate using geostatistics and spline functions. (In Persian with English abstract)
- 2- Arrouays D., Grundy M.G., Hartemink A.E., Hempel J.W., Heuvelink G.B., Hong S.Y., Lagacherie P., Lelyk G., McBratney A.B., McKenzie N.J., and dL Mendonca-Santos M. 2014. GlobalSoilMap: Toward a fine-resolution global grid of soil properties. *Advances in Agronomy* 125: 93-134.
- 3- Asgari Hafshejani N., and Jafari S. 2017. The study of particle size distribution of calcium carbonate and its effects on some soil properties in Khuzestan province. *Iran Agricultural Research* 36(2): 71-80.
- 4- Bouslihim Y., Rochdi A., and Paaza N.E.A. 2021. Machine learning approaches for the prediction of soil aggregate stability. *Heliyon* 7(3): e06480.
- 5- Chakan A.A., Taghizadeh-Mehrjardi R., Kerry R., Kumar S., Khordehbin S., and Khanghah S.Y. 2017. Spatial 3D distribution of soil organic carbon under different land use types. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(3): 131.
- 6- Esfandiarpour Boroujeni I., ShahiniShamsabadi M., Shirani H., Mosleh Z., BagheriBodaghabadi M., and Salehi M.H. 2020. Assessment of different digital soil mapping methods for prediction of soil classes in the Shahrekord plain, Central Iran. *Catena* 193: 104648.
- 7- Esmaeili E., Shahbazi F., Sarmadian F., Jafarzadeh A.A., and Hayati B. 2021. Land capability evaluation using NRCS agricultural land evaluation and site assessment (LESA) system in a semi-arid region of Iran. *Environmental Earth Sciences* 80(4): 1-14.
- 8- FAO. 1973. Irrigation, Drainage and salinity. FAO/UNESCO.
- 9- Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., and Guevara M.A. 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one* 12(2): e0169748.
- 10- Hengl T., Miller M.A., Krizan J., Shepherd K.D., Sila A., Kilibarda M., Antonijevic O., Glušica L., Dobermann A., Haefele S.M., and McGrath S.P. 2021. African soil properties and nutrients mapped at 30 m spatial resolution using two-scale ensemble machine learning. *Scientific Reports* 11(1): 1-18.
- 11- Keshavarzi A., Sarmadian F., Labbafi R., and Ahmadi A. 2011. Developing pedotransfer functions for estimating field capacity and permanent wilting point using fuzzy table look-up scheme. *Computer and Information Science* 4(1): 130.

- 12-Khodaverdiloo H., Homae M., van Genuchten M.T., and Dashtaki S.G. 2011. Deriving and validating pedotransfer functions for some calcareous soils. *Journal of Hydrology* 399(1-2): 93-99.
- 13-Khaledian Y., and Miller B.A. 2020. Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. *Applied Mathematical Modelling* 81: 401-418.
- 14-Kuhn M., and Johnson K. 2013. *Applied predictive modeling* (Vol. 26, p. 13). New York: Springer.
- 15-Lacoste M., Minasny B., McBratney A., Michot D., Viaud V., and Walter C. 2014. High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape. *Geoderma* 213: 296-311.
- 16-McBratney A.B., Santos M.M., and Minasny B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117(1-2): 3-52.
- 17-Mahmoudabadi E., Karimi A., Haghnia G.H., and Sepehr A. 2017. Digital soil mapping using remote sensing indices, terrain attributes, and vegetation features in the rangelands of northeastern Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* 189(10): 1-20.
- 18-Malone B.P., McBratney A.B., Minasny B., and Laslett G.M. 2009. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. *Geoderma* 154(1-2): 138-152.
- 19-McDonald R.C., Isbell R.F., Speight J.G., Walker J., and Hopkins M.S. 1998. *Australian soil and land survey: field handbook* (No. Ed. 2). CSIRO publishing.
- 20-Mosleh Z., Salehi M.H., Jafari A., Borujeni I.E., and Mehnatkesh A. 2016. The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(3): 195.
- 21-Mousavi S.R., Parsayi F., Rahmani A., Sedri, M.H., and Kohsar Bostani M. 2020. Spatial Prediction Some of the Surface Soil Properties Using Interpolation and Machine Learning Models. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 10(3): 27-49. (In Persian with English abstract).
- 22-Mousavi S.R., Sarmadian F., Dehghani S., Sadikhani M.R., and Taati A. 2017. Evaluating inverse distance weighting and kriging methods in estimation of some physical and chemical properties of soil in Qazvin Plain. *Eurasian Journal of Soil Science* 6(4): 327-336.
- 23-Mousavi S.R., Sarmadian F., Omid M., and Bogaert P. 2021. Digital modeling of three-dimensional soil salinity variation using machine learning algorithms in arid and semi-arid land of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, doi: 10.22059/ijswr.2021.323030.668957. (In Persian with English abstract)
- 24-Mulder V.L., Lacoste M., Richer-de-Forges A.C., Martin M.P., and Arrouays D. 2016. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. *Geoderma* 263: 16-34.
- 25-Nelson R.E. 1982 Carbonate and gypsum. In: Page AL (ed) *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, Madison, pp 181-197.
- 26-Nemes A., Rawls W.J., and Pachepsky Y.A. 2006. Use of the nonparametric nearest neighbor approach to estimate soil hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal* 70(2): 327-336.
- 27-Pahlavan-Rad M.R., and Akbarimoghaddam A. 2018. Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena* 160: 275-281.
- 28-Padarian J., Minasny B., and McBratney A.B. 2019. Using deep learning for digital soil mapping. *Soil* 5: 79-89.
- 29-Parsaei F., Firouzi A.F., Mousavi S.R., Rahmani A., Sedri M.H., and Homae M. 2021. Large-scale digital mapping of topsoil total nitrogen using machine learning models and associated uncertainty map. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(4): 1-15.
- 30-Presley D.R., Ransom M.D., Kluitenberg G.J., and Finnell P.R. 2004. Effects of thirty years of irrigation on the genesis and morphology of two semiarid soils in Kansas.
- 31-Rahmani A., Sarmadian F., Mousavi S.R., and Khamoshi S.E. 2020. Application of Geomorphometric attributes in digital soil mapping by using of machine learning and fuzzy logic approaches. *Journal of Range and Watershed Managment* 73(1): 105-124. (In Persian)
- 32-Rezapour S. 2014. Response of some soil attributes to different land use types in calcareous soils with Mediterranean type climate in north-west of Iran. *Environmental Earth Sciences* 71(5): 2199-2210.
- 33-Rossel R.V., Chen C., Grundy M.J., Searle R., Clifford D., and Campbell P.H. 2015. The Australian three-dimensional soil grid: Australia's contribution to the GlobalSoilMap project. *Soil Research* 53(8): 845-864.
- 34-Rostaminia M., Nouri N., Keshavarzi A., and Rahmani A. 2019. Quantitative Evaluation and Zoning of Spatial Distribution of Soil Quality Index in Some Parts of Arid and Semi-Arid Lands of Western Iran (Case Study: Kane Sorkh Region, Ilam Province). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(7): 1701-1719. (In Persian with English abstract)
- 35-Sreenivas K., Dadhwal V.K., Kumar S., Harsha G.S., Mitran T., Sujatha G., Suresh G.J.R., Fyze M.A., and Ravisankar T. 2016. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. *Geoderma* 269: 160-173.
- 36-Staff S.S. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th Edn Washington. DC: Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- 37-Taghizadeh Mehrjardi R., Nabiollahi K., and Kerry R. 2016. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma* 266: 98-110.
- 38-Taghizadeh Mehrjardi R., Minasny B., Sarmadian F., and Malone P.B. 2014a. Digital mapping of soil salinity in Ardakan region, central Iran. *Geoderma* 213: 15-28.

- 39- Taghizadeh-Mehrjerdi R., Amirin Chakan A., and Sarmadian F. 2014b. 3D digital mapping of soil cation exchange capacity in Dorud, Lorestan province. *Journal of Water and Soil* 28: 998-1010. (In Persian with English abstract)
- 40- Tan W.F., Zhang R., Cao H., Huang C.Q., Yang Q.K., Wang M.K., and Koopal L.K. 2014. Soil inorganic carbon stock under different soil types and land uses on the Loess Plateau region of China. *Catena* 121: 22-30.
- 41- Vargas R., Pankova E.I., Balyuk S.A., Krasilnikov P.V., and Khasankhanova G.M. 2018. Handbook for saline soil management. FAO/LMSU.
- 42- Viscarra Rossel R.A., and McBratney A.B. 2008. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In 'Digital soil mapping with limited data'. Developments in Soil Science series. (Eds AE Hartemink, AB McBratney, L Mendonça-Santos) (Elsevier Science: Amsterdam).
- 43- Wang Y., and Witten I.H. 1997. Inducing model trees for continuous classes. In *Proceedings of the Ninth European Conference on Machine Learning*. pp. 128-137.
- 44- Wilding L.P. 1985. Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984 (pp. 166-194).
- 45- Zeraatpisheh M., Ayoubi S., Jafari A., Tajik S., and Finke P. 2019. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma* 338: 445-452.
- 46- Zhao W., Zhang R., Huang C., Wang B., Cao H., Koopal L.K., and Tan W. 2016. Effect of different vegetation cover on the vertical distribution of soil organic and inorganic carbon in the Zhifanggou Watershed on the loess plateau. *Catena* 139: 191-198.



Modeling the Vertical Soil Calcium Carbonate Equivalent Variation by Machine Learning Algorithms in Qazvin Plain

S.R. Mousavi¹ - F. Sarmadian^{2*} - M. Omid³ - P. Bogaert⁴

Received: 16-08-2021

Accepted: 25-09-2021

Introduction: Calcium Carbonate Equivalent (CCE) is one of the key soils properties in arid and semi-arid regions. The study of spatial variability of surface and subsurface layers is important in the sustainable land management of arable soils. This study aimed to model the spatial distribution of CCE percentage by using three machine learning algorithms including Random Forest (RF), Decision Tree regression (DTr) and k-Nearest Neighbor (k-NN) at five standard depths of 0-5, 5-15, 15-30, 30-60, and 60-100 cm.

Material and Methods: The study area with 60,000 ha includes the major part of the lands of Qazvin plain located on the border of Qazvin and Alborz provinces. Field and laboratory surveys included 278 representative profiles were excavated, described by the horizon, and determined physicochemical properties. The studied soils have a very high diversity in soil moisture (Aridic, Xeric, and Aquic) and temperature regimes (Thermic). These variations have led to the formation of eight great groups of soils in the region based in the *USDA* soil classification system with the three classes of *Haploxerepts*, *Calcixerepts*, and *Haplocalcids* were the dominant soil classes in the study area. A total of 22 environmental covariates, including 12 variables extracted from the primary and secondary derivation of digital elevation model (DEM), six remote sensing (RS) indicators, two climatic parameters, and two soil covariates were prepared, and then the most appropriate environmental covariates were selected using principal component analysis (PCA) and expert knowledge. The CCE percentage data were randomly divided into two parts, 80% for training and 20% for testing, which was then modeled by three machine learning algorithms RF, DTr, and k-NN, and were evaluated by some statistical indices as coefficient determination (R^2), root mean square error (RMSE) and Bias.

Results and Discussion: The results of harmonizing the CCE values at the genetic horizons with the standard depths showed the high efficiency of the spline depth function in providing an acceptable estimate with minimum error and maximum agreement between observed and predicted values. The PCA method showed that the first to fifth components with the explanation of more than 80% of cumulative variance were Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF), Mean Annual Temperature (MAT), Greenness index (Greenness), Probability of Calcic horizon (Cal.hr), and Wind Effect environmental covariates which had the highest eigenvalues. Besides, Clay was selected on expert knowledge-based. The relative importance (RI) of the environmental covariates showed the spatial distribution of CCE were affected by Clay with an explanation of more than 57%, 41.8% and 45% of its variance at three surface depths of 0-5, 5-15, and 15-30 cm, while the Cal.hr covariate had the highest impact in the spatial prediction of CCE compared to other predictors as auxiliary variables with 67.8% and 52.8% justification, respectively, at two depths of 30-60 and 60-100 cm. Hence, using the calcic horizon probability Map (Cal.hr) as a derivative soil factor made it possible to produce more appropriate final maps, while preventing the reduction of the accuracy of the modeling results in the subsoils. The auxiliary variable of remote sensing, i.e., Greenness, could not show a significant impact on the expression of the variation of CCE percentage at all studied depths. Unlike remote sensing indices, the topographic attribute of the MrVBF, at two standard depths of 0-5 and 5-15 cm, the MAT at a depth of 15-30 cm, and the Wind Effect at the standard depths 30-60 and 60-100 cm, after the soil covariates, were the most effective in justifying the spatial variations of CCE%. RF algorithm with a range of R^2 values of 0.83 - 0.76 and RMSE of 2.14% - 2.21%

1 and 2- Ph.D. Student of Soil Resource Management and Professor, Department of Soil Science and Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, respectively.

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

3- Professor of Agricultural Machinery Engineering Department, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Professor of Earth and Life Institute, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium

DOI: 10.22067/JSW.2021.71748.1076

resulted in the highest accuracy and minimum error. Even though the DTr method presented R^2 values (0.52-0.39) weaker than the RF in the validation dataset, in general, the results of its spatial predictions were similar to the RF model from the surface to the subsurface and more stable than the k-NN. Against RF and DTr, k-NN couldn't display acceptable performance in the prediction of CCE% at all standardized depths.

Conclusion: In general, it is necessary to understand the spatial distribution of CCE due to its effect on soil moisture accessibility and plant nutrient uptake. Therefore, in the present study, we tried to introduce the RF machine learning algorithm as a superior model with environmental variables that were selected by PCA and the expert knowledge variable selection method. The maps prepared by this approach have an acceptable level of reliability for agricultural and environmental management by managers, soil experts, and farmers.

Keywords: Digital soil mapping, Standard depth, Spline function, Soil forming factors



مقاله پژوهشی

بررسی اثر رخ داد امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهر سنج

طی سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۸۹

رقیه ملکی مرشت^۱ - بهروز سبحانی^{۲*} - مسعود مرادی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

چکیده

امواج گرمایی از فرین‌های جوی بسیار آسیب‌زا بر زندگی بشر است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر رخ داد امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهر سنج طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ بود. بدین منظور داده‌های دمای حداکثر ایستگاه مذکور، از سازمان هواشناسی اخذ و با اعمال شاخص فومیایی، روزهایی را که دمای آن‌ها بالاتر از $+2$ انحراف معیار یا بالاتر از میانگین (NTD) بود و حداقل ۲ روز تداوم داشت، به‌عنوان روز توأم با موج گرما تعریف شد. جهت بررسی تأثیر امواج گرمایی بر جزایر حرارتی در ماه‌های گرم و سرد، جزایر حرارتی برای روزهای توأم با موج گرمایی و یک روز عادی با کمترین دمای حداکثر قبل از هر موج گرمایی در روز هنگام و شب هنگام مودیس - آکوا محاسبه شد. طبق نتایج، بیشترین فراوانی مخاطره‌ی موج گرمایی در این شهر در سال ۱۹۹۱ و در ماه‌های فوریه، مارس، سپتامبر و اکتبر بوده است. همچنین امواج گرمایی در این شهر ۶ روزه و لذا بلند مدت بوده که اغلب در ماه‌های سرد سال رخ داده است. براساس نتایج، چه در ماه‌های گرم و چه در ماه‌های سرد اغلب در هر دو شرایط وجود و عدم موج گرمایی در روز جزیره‌ی سرمایی در مرکز سنج تشکیل شده که در شرایط موج گرما گاهی جزیره‌ی گرمایی در مرکز شهر ایجاد شده است. در شب هم‌زمان با امواج گرمایی اغلب جزیره‌ی گرمایی ایجاد شده که گاهی تا $2/5$ درجه نیز افزایش یافته. در مجموع میزان تأثیرپذیری جزایر حرارتی از امواج گرمایی در ماه‌های گرم بیشتر از ماه‌های سرد بوده است.

واژه‌های کلیدی: امواج گرمایی، جزایر حرارتی، شاخص فومیایی، شهر سنج

مقدمه

روز دوام داشته باشد و دما ۵ درجه از حالت نرمال بیشتر باشد و نیز برای انسان و محیط زیست ایجاد بحران کند (۲۷). تغییر آب و هوا و افزایش دما منجر به کاهش فرین‌های سرد و افزایش فرین‌های گرم می‌شود (۱۵). شرایط اتمسفری راکد حاصل از امواج گرمایی، آلاینده‌ها را در مناطق شهری محبوس کرده و با اضافه شدن تنش شدید آلاینده‌های سمی بر تنش خطرناک هوای گرم موجود، یک مشکل زیستی را در ابعاد وسیع به وجود می‌آورد (۲). شهرها اغلب شرایط اقلیمی خاصی را تجربه می‌کنند که به آن اقلیم شهری گفته می‌شود، اقلیم شهری به واسطه‌ی تفاوتی که در متغیرهای اقلیمی (دما، رطوبت، سرعت و جهت باد و بارش) با نواحی کم‌تراکم‌تر اطراف دارد، مشخص می‌شود. دمای سطح زمین یکی از پارامترهای کلیدی و عامل مهمی در مطالعه‌ی آب و هوای شهری محسوب می‌شود (۲۳). اختلاف دما بین شهر و روستا معمولاً در شب بیشتر از روز است که در شرایط ورزش باد ضعیف آشکارتر می‌شود. علت اصلی جزیره‌ی گرمایی شهری، تغییر سطح زمین در اثر توسعه‌ی شهری

کره‌ی زمین پدیده‌های زیان بخش جوی بسیاری را تجربه می‌کند که طبق مطالعات انجام شده، تغییر اقلیمی موجب افزایش وقوع این پدیده‌ها شده است. یکی از این مخاطرات، امواج گرمایی^۴ هستند. امواج گرمایی از پدیده‌های اقلیمی با پیامدهای بسیار خطرناک در سراسر جهان است که طی دهه‌های اخیر فراوانی آن افزایش یافته است. موج گرمایی به دوره‌ی شدید گرما اطلاق می‌شود که بیش از ۵

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری آب و هواشناسی و استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

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

۳- دکتری آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2021.71049.1061

4- Heat Waves

به این نتیجه رسیدند که بسامد و شدت دوره‌های گرم به ویژه طی ۱۰ سال اخیر افزایش یافته است؛ اما تغییرات قابل توجهی در امواج گرمایی ایجاد نشده است. زهو و همکاران، (۳۹) با روش ترکیبی مشاهدات ماهواره‌ای و با استفاده از مدل اقلیم شهر (Urb Clim^۲) به مدل‌سازی آب‌وهوای لایه‌ی مرزی شهر و ارزیابی فصلی بودن جزیره‌ی حرارتی شهر لندن پرداختند. بررسی‌های آنان نشان داده است که مدل اقلیم شهری می‌تواند دمای سطح زمین (LST^۳) شهری و روستای را به میزان قابل توجهی بازسازی نماید. همچنین طبق یافته‌های آنان، تغییرات دمای سطح زمین، می‌تواند عمدتاً با تغییرات فصلی تابش دریافتی خورشید در ارتباط باشد. قبادی و همکاران (۱۶) به بررسی تأثیر امواج گرمایی بر جزایر حرارتی شهر کرج پرداختند. نتایج بررسی‌های آنان نشان داده است که هم‌زمان با حاکمیت امواج گرمایی، جزیره‌ی گرمایی شهری (UHI) در منطقه‌ی مورد مطالعه تشدید شده و درجه‌ی حرارت شهری در مقایسه با دمای مناطق روستایی، هم در روز و هم در شب افزایش یافته است. بای و همکاران (۴) به بررسی امواج گرمایی و جزایر حرارتی در چند شهر پرداخته‌اند. طبق نتایج حاصل از پژوهش آنان، در شهرهایی با وسعت یکسان، رابطه متفاوتی بین امواج گرمایی و جزایر حرارتی وجود داشته است. در شهرهای نیویورک، ایالت واشنگتن و بالتیمور در مقایسه با شهرهای کوچک، جزیره‌ی حرارتی هم‌زمان با رخ داد امواج گرمایی تقویت شده است. پاراوانتیس (۳۰) آثار دمای بالا، امواج گرمایی و جزیره‌ی حرارتی شهری را در مرگ و میر روزانه‌ی قلبی-عروقی و تنفسی افراد بالای ۶۵ سال طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۲ در یونان و آتن بررسی نموده و یافته‌های آنان نشان داده است که همبستگی بالایی بین مرگ و میر روزانه‌ی قلبی و عروقی و تنفسی افراد بالای ۶۵ سال و دماهای بالا وجود دارد که بیشترین میزان مرگ و میر، در اثر امواج گرمایی گزارش شده است. فوندا و سانتاموریس (۱۱) رابطه امواج گرمایی و جزایر حرارتی شهری در تابستان بسیار گرم ۲۰۱۲ در آتن را مطالعه نمودند. طبق نتایج به دست آمده، در روز حادثه، همبستگی قوی بین جزیره‌ی حرارتی شهری و امواج گرمایی وجود داشته است که این امر می‌تواند موجب افزایش چشم‌گیر خطر گرما در شهرها و آسیب‌پذیری جمعیت شهری گردد. باسارا (۵) تأثیرپذیری جزیره‌ی حرارتی شهری از رخداد امواج گرمایی شدید در شهر اوکلاهما را بررسی نموده‌اند و یافته‌های آنان نشان داده است که طی حاکمیت امواج گرمایی، یک جزیره‌ی حرارتی در مرکز شهر ایجاد شده است. روهینی و همکاران (۳۳) به بررسی امواج گرمایی هند با استفاده از مدل CMIP5 پرداختند. نتایج پژوهش آنان افزایش امواج گرمایی

است (۳۵). طی دهه‌های اخیر امواج گرمایی به عنوان یکی از مخاطرات مهم اقلیمی، مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران داخلی و خارجی قرار گرفته است. تان و همکاران (۳۶) به بررسی جزیره‌ی حرارتی شهری و تأثیر آن بر امواج گرمایی و سلامت انسان در شانگهای چین پرداختند و دریافتند که بخش‌های مختلف مرکزی شهر درجات مختلفی از گرمایش را تجربه می‌کنند و جزیره‌ی حرارتی شهری تأثیر مستقیم منفی بر سلامت انسان دارد. فنگ و همکاران، (۹) به شبیه‌سازی جزیره‌ی حرارتی در شرایط سینوپتیکی هوای گرم شهر هنگ‌کونگ در چین پرداختند. آنان در پژوهش خود از مدل ترکیبی WRF/UCM^۱ استفاده کرده‌اند و یافته‌های آنان نشان داده است که جزیره‌ی حرارتی عمدتاً حاصل ذخیره‌ی گرمایی زیاد در صنایع شهری در طول روز و انتشار این گرما در شب هنگام است. لیونسو و همکاران (۲۵) به بررسی تأثیر سناریوی توسعه‌ی شهری بر جزیره‌ی حرارتی و استرس گرمایی در شهر پاریس (فرانسه) پرداختند. نتایج بررسی آنان نشان داد که در شهرهای متراکم، با تمرکز ساکنان در مناطقی که بیشتر تحت تأثیر جزیره‌ی حرارتی هستند، آسیب‌پذیری کل جمعیت افزایش می‌یابد. وهی (۳۷) جهت مطالعه‌ی امواج گرمایی سال ۲۰۱۱ گریت‌ر هیستون، به بررسی تأثیر کاربری زمین بر دمای هوا پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که فاصله تا خط ساحلی و مناطق خیلی توسعه یافته، تأثیر بسیاری بر میانگین دمای روزانه داشته و آب‌های آزاد نیز اثر بیشتری بر حداقل دمای روزانه دارند. دی راید و همکاران (۷) تشدید جزیره‌ی گرمایی شهر پاریس در دوره‌ی گرم در تابستان ۲۰۰۳ را بررسی نمودند و تشدید جزایر حرارتی در زمان حاکمیت امواج گرمایی را تأیید کردند. این تأثیرپذیری و تشدید، در مناطق کم تراکم شهری مثل پارک‌ها، کم‌تر از نقاط پرتراکم بوده است. دابراوالنی و کراولا (۸) تنوع مکانی دمای هوا و شدت جزیره‌ی گرمایی شبانه در شهر برنو، جمهوری چک را مطالعه نموده‌اند و یافته‌های آنان نشان داده است که تراکم ساختمان‌ها و پوشش گیاهی، به میزان ۵۰ درصد در تشدید جزیره‌ی حرارتی شهر نقش دارد. همچنین در اوایل شب در تابستان دما در مرکز شهر در بالاترین حد بوده است که به سمت مناطق حومه، از شدت آن کاسته شده است. حسینی (۱۸) جزیره‌ی گرمایی شهر تهران را بررسی نموده و به این نتیجه دست یافته است که این شهر طی روز جزیره‌ی گرمایی و در شب جزیره‌ی گرمایی داشته است. کم‌ترین میزان جزیره‌ی گرمایی ۴- درجه کلوین در ماه مارس و بالاترین میزان جزیره‌ی گرمایی ۳/۹- درجه‌ی کلوین در ماه می بوده است. سچرنی و همکاران (۶) به بررسی امواج گرمایی و سرمایی در سراسر آمریکای جنوبی پرداختند و

2- urban climate model
3- land surface temperature

1- Weather Research and Forecasting Model/
Unresolved complex mixture

گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهر سنندج طی سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۸۹ می‌باشد. افزایش مداوم دمای شهرها تحت عنوان جزیره‌ی حرارتی شهری و رخ داد ناگهانی امواج گرمایی به عنوان یکی از مخاطرات مهم اقلیمی، از جمله نگرانی‌های مهم سیاست‌گذاران و مدیران شهری می‌باشد و تأثیر وقوع هم زمان این دو پدیده بر افزایش دما خصوصاً در نقاط مرکزی شهرها، می‌تواند سبب تشدید گرمای مراکز شهری شده و خسارات زیست محیطی فراوانی را به بار بیاورد. طبق پیش‌بینی پژوهش‌گران، فراوانی و تداوم امواج گرمایی طی سال‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیمی افزایش خواهد یافت. لذا پی بردن به زمان وقوع و چگونگی اثر مخاطره‌ی موج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی شهری، می‌تواند آگاهی‌ها، توصیه‌ها و راه‌کارهای لازم را در خصوص آمادگی در مقابل افزایش احتمالی دمای هوا به کشاورزان، باغ‌داران و مسئولان ستاد حوادث غیرمترقبه‌ی این شهر ارائه نماید.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مورد مطالعه

در پژوهش حاضر محدوده‌ی مورد مطالعه، شهر سنندج می‌باشد که به عنوان مرکز و نماینده‌ی سایر ایستگاه‌های استان کردستان انتخاب گردید. مشخصات و محدوده‌ی شهر سنندج در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

بلند را طی دهه‌های آتی تأیید کرده است. الماسی و همکاران (۱) رفتار و تغییرات بسامد رخ داد امواج گرمایی شهر اهواز پرداختند و طبق یافته‌های آنان، در این شهر امواج کوتاه مدت فراوانی رخ داد بیشتری داشته است. امیدوار و همکاران (۲۹) به روش آماری، احتمال وقوع امواج گرمایی استان کرمانشاه را تحلیل نمودند. نتایج حاصل نشان داده است که در استان کرمانشاه بیشترین فراوانی امواج گرمایی در تیر ماه و مرداد ماه بوده و روند افزایشی داشته است. کرم‌پور و همکاران (۲۱) به شناسایی و تحلیل سینوپتیکی امواج گرمایی غرب ایران پرداخته‌اند و نتایج حاصل نشان داده است که ۷۰ موج در دوره-ی گرم و ۷۳ موج در دوری سرد رخ داده است و بیشترین میزان وقوع امواج گرمایی در ماه فروردین بوده و امواج کوتاه رخ داد بیشتری داشته‌اند. کاشکی و همکاران (۲۲) به واکاوی آماری امواج گرمایی زابل پرداختند. طبق یافته‌های آنان موج‌های گرمایی کم دوام فراوانی بیشتر و امواج گرمایی مداوم فراوانی کمتری داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داده است که امواج گرمایی در دوره‌ی آماری مورد مطالعه‌ی آنان روند افزایشی داشته است.

بررسی پیشینه‌های ارائه شده نشان داد که رخ داد امواج گرمایی و تشکیل جزایر حرارتی شهری اغلب در پژوهش‌های خارجی در ارتباط باهم بررسی شده‌اند ولی در پژوهش‌های داخلی این دو مخاطره به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. لذا بررسی رابطه این دو پدیده در شهرهای ایران، جهت مدیریت بحران و کاهش آثار منفی ناشی از افزایش دما بر کشاورزی، محیط زیست و باغداری، ضروری به نظر می‌رسد. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر رخ داد امواج

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه سنندج (۲۶)

Table 1- Geographical location and height of Sanandaj station (26)

شهر	عرض	طول	ارتفاع
City	Latitude	Longitude	Height
سنندج	35.3	47	1373.4
Sanandaj			



شکل ۱- محدوده‌ی شهر سنندج در گوگل ارث

Figure 1- Boundary of Sanandaj city in Google Earth

روز برای هر روز تقویمی طبق رابطه ۳ به دست آمد. سپس میانگین متحرک ۹ روزه سه بار انجام شد:

$$\overline{\sigma^2(i,j)} = \sum_{n=1989}^{2018} \sum_{j=30}^{j+30} [\Delta T(i,j',n) - \overline{\Delta T(i,j',n)}]^2 \div 31N \quad (3)$$

مقدار $\overline{\Delta T(i,j)}$ میانگین انحراف دما روی کرنل ۳۱ روزه است که از رابطه ۴ به دست آمد:

$$\overline{\Delta T * (i,j)} = \sum_{n=1989}^{2018} \sum_{j=30}^{j+30} T(i,j',n) \div 31N \quad (4)$$

سرانجام نمایه‌ی فومیایی یا انحراف دمای نرمال شده (NTD) از رابطه ۵ محاسبه گردید:

$$\chi(i,j,n) = \Delta T(i,j,n) \div \overline{\sigma(i,j)} \quad (5)$$

که در آن $\overline{\sigma(i,j)} = \sqrt{\overline{\sigma^2(i,j)}}$ می‌باشد. هرگاه ضریب NTD برای P روز متوالی ۲ انحراف معیار بالاتر از میانگین باشد، یک موج گرمایی P روزه داریم؛ به عبارتی اگر (i) NTD معرف دمای بهنجار شده‌ی روز i ام باشد، آنگاه یک موج گرمایی P روزه داریم (رابطه ۶) (۲۰).

$$NTD(i), NTD(i+1), \dots, NTD(i+p-1) \geq 2, NTD(i-1), NTD(i+p) \leq 2 \quad (6)$$

محاسبه‌ی شدت جزیره‌ی حرارتی سطحی شهر^۶

دمای بالاتر شهرها نسبت به دمای نواحی روستایی جزیره‌ای از هوای گرم ایجاد می‌کند که به آن جزیره‌ی حرارتی شهری^۷ (UHI) گفته می‌شود که در شب‌های آرام و صاف بر روی شهر گسترش می‌یابد (۳). به منظور بررسی شدت جزیره‌ی حرارتی در شهر سنجند سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ (۱۶ سال) به عنوان نماینده دوره‌ی آماری مورد مطالعه، که داده‌های رویه‌ی زمین در دسترس بود انتخاب گردید و در روزهای توأم با موج گرمایی (روزهای بدون ابر) داده‌های دمای رویه‌ی زمین سنجنده‌ی مودیس-آکوا^۸ برای روز هنگام ساعت ۱۵:۲۴-۱۳:۳۸، شب هنگام ساعت ۰۳:۵۳-۰۲:۳۱، از وبسایت ناسا^۹ در سیستم تصویری سینوسی دریافت گردید. MODIS یا اسپکترو رادیومتر تصویربرداری با قدرت تفکیک مکانی متوسط، ابزاری است که بر روی ماهواره‌ی آکوا (EOS PM) که در ماه می ۲۰۰۲ راه‌اندازی شده است، نصب گردیده. MODIS داده‌ها را در ۳۶ باند

شناسایی روزهای توأم با موج گرمایی با اعمال شاخص فومیایی

جهت شناسایی و استخراج امواج گرم، داده‌های حداکثر دمای روزانه‌ی ایستگاه سینوپتیک سنجند، طی سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸، از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید و با کمک شاخص فومیایی^۱ شاخص به هنجار شده‌ی دما و از طریق برنامه نویسی در محیط نرم‌افزار متلب^۲، روزهایی که دمای آن بالاتر از ۲+ انحراف معیار یا بالاتر از میانگین (NTD)^۳ بوده و دست کم دو روز تداوم داشته، به عنوان روز توأم با موج گرمایی معرفی گردید. به منظور محاسبه‌ی این نمایه، نخست میانگین بلند مدت دما برای هر یک از روزهای سال محاسبه شد تا انحراف دمای هر روز خاص نسبت به میانگین بلند مدت مبنای دماوری درباره‌ی گرمی آن روز قرار گیرد (۲۰). میانگین دماهای هر روز با رابطه ۱ به دست آمد:

$$\overline{T(i,j)} = \sum_{n=1989}^{2018} T(i,j,n) \div N \quad (1)$$

دمای روز i ام از ماه j ام در سال nام $\overline{T(i,j)}$ میانگین بلندمدت دمای روز i ام، از ماه j ام می‌باشد. برای از بین بردن نوفه‌های (نویز^۴) موجود در میانگین، فیلتر میانگین متحرک ۹ روزه سه بار بر روی این داده‌ها انجام شد. به این ترتیب میانگین دمای هر روز بر مبنای دمای همان روز و ۲۹ روز همسایه‌ی آن محاسبه شد. به بیان دیگر دمای هر روز نماینده‌ی وضع کلی دما در همان روز و دمای دو هفته پیش و دو هفته پس از آن است. در نتیجه آثار عوامل زود گذر محلی که موجب نوسان دما گردیده‌اند، حذف و اثرات سامانه‌های همید که تغییرات کلان دما را تعیین می‌کنند، تقویت می‌شود. سپس به کمک رابطه ۲، انحراف دمای هر یک از روزهای مورد بررسی، نسبت به میانگین بلند مدت محاسبه شد. فوجیبی^۵ و همکاران (۱۲).

$$\Delta T = (i,j,n) = T(i,j,n) - T(i,j) \quad (2)$$

در این جا $\Delta T = (i,j,n)$ انحراف مطلق دما از میانگین روز j ام از ماه i ام، در سال n ام نسبت به میانگین دمای همان روز تقویمی است. برای آن که مقادیر انحراف دمای زمان‌ها و مکان‌های مختلف در یک زمان معین و یک نقطه‌ی جغرافیایی با یکدیگر قابل مقایسه باشند، لازم است این مقادیر مطلق انحراف دما به کمک پراش دما، استانداردسازی شوند. همانند تغییرات روز به روز، پراش ΔT در ۳۱

6- SUHI

7- Urban Heat Island

8- MODIS-Aqua

9- Nasa

1- Fumiaki

2- MATLAB

3- Normalized Thermal Deviation

4- Noise

5- Fujibe

جهت مطالعه‌ی نقطه‌ای SUHI، از اختلاف دمای دو یاخته معرف داخل و بیرون شهر استفاده شد (۲۷) و به منظور بررسی میزان تأثیرپذیری جزایر حرارتی شهری از رخ داد امواج گرمایی، مقادیر جزیره‌ی حرارتی در روزهای حاکمیت امواج گرمایی و یک روز عادی (بدون موج گرمایی) با کم‌ترین دمای حداکثر، به فاصله‌ی حداکثر دو هفته قبل از وقوع هر موج گرمایی محاسبه شد و شدت جزایر حرارتی در دو شرایط متفاوت (وجود و عدم موج گرمایی) مقایسه گردید و به منظور صحت سنجی نتایج حاصل، وضعیت باد و رطوبت نسبی، در روزهای مورد مطالعه، از سایت سازمان هواشناسی (۲۶) اخذ و واکاوری گردید.

نتایج و بحث

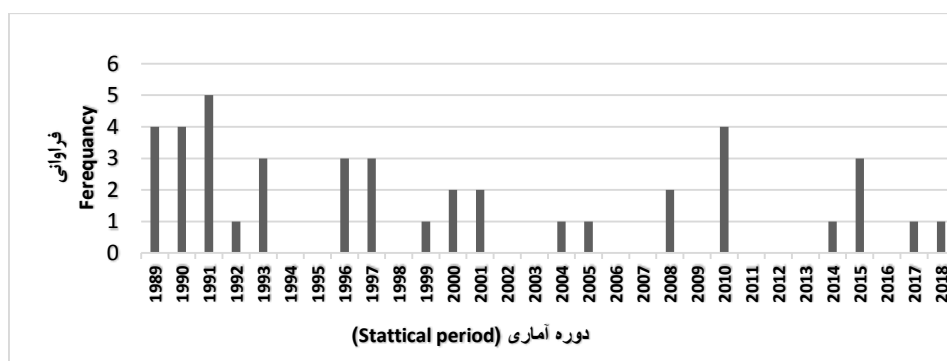
نتایج استخراج امواج گرمایی با اعمال شاخص فومیایی

با اعمال شاخص فومیایی، امواج گرمایی شهر سنندج شناسایی و به دو دسته‌ی امواج کوتاه مدت و امواج بلند مدت تقسیم شد (امواج گرمایی با تداوم بین ۲ تا ۵ روزه، امواج گرمایی کوتاه مدت و امواج با تداوم ۶ روزه یا بیشتر، امواج گرمایی بلند مدت نام‌گذاری شدند). طبق نتایج حاصل، طی ۳۰ سال مورد مطالعه (۱۹۸۹-۲۰۱۸)، بیشترین فراوانی مخاطره‌ی موج گرمایی در این شهر در سال ۱۹۹۱ (شکل ۲) و در ماه‌های فوریه، مارس، سپتامبر اکتبر بوده است (شکل ۳). حداکثر تداوم امواج گرمایی ۶ روزه و طبق تقسیم‌بندی ذکر شده، امواج گرمایی در این شهر بلند مدت بوده که در دسامبر ۲۰۱۷ و دسامبر ۲۰۰۵ رخ داده و لذا به نظر می‌رسد اغلب در ماه‌های سرد سال تداوم این مخاطره بیشتر از ماه‌های گرم سال بوده است (شکل ۴).

طیفی با عبور از بالای خط استوا در حوالی ۱۳:۳۰ و ۰۱:۳۰ بر ماهواره آکوا جمع‌آوری می‌کند. MOD11_A2 و MYD11_A2، دمای سطح زمین (LST) و توان تشعشعی ۸ روزه در سطح ۳، تشکیل شده از محصول LST روزانه ۱ کیلومتر مودیس (MOD11A1 و MYD11A1) می‌باشد و بر روی یک شبکه سینوسی ۱ کیلومتر به عنوان مقدار متوسط (LSTs) در آسمان صاف در طول ۸ روز در شبانه روز (۱۳:۳۰ و ۰۱:۳۰) ذخیره شده است. لازارینی و همکاران (۲۴). در پژوهش حاضر برداشت‌های مودیس-آکوا به این دلیل انتخاب شد که نسبت به مودیس ترا به ساعات میانه‌ی روز و میانه‌ی شب (مقادیر فرین روزانه) نزدیک‌تر بود. معمولاً جهت بررسی جزیره‌ی حرارتی سطحی، از تفاوت دمای سطح مناطق شهری با مناطق غیرشهری یا روستایی استفاده می‌شود. به منظور محاسبه‌ی جزیره‌ی حرارتی رویه‌ی زمین لازم است ابتدا مناطق شهری و روستایی تعیین شود. در این پژوهش برای محدوده‌ی شهری از میانگین دمای تمام یاخته‌های داخل شهر و منطقه‌ی روستایی در گستره‌ی یک برابر مساحت شهر در اطراف آن انتخاب شد. سپس توزیع فراوانی دمای رویه‌ی زمین در این گستره‌ی روستایی از کم‌ترین تا بیشترین مقدار ثبت شده محاسبه شد. در ادامه، دمای که بیشترین فراوانی را در منطقه‌ی روستایی داشت به عنوان نماینده‌ی منطقه‌ی روستایی انتخاب شد و برای این کار از رابطه ۷ استفاده گردید:

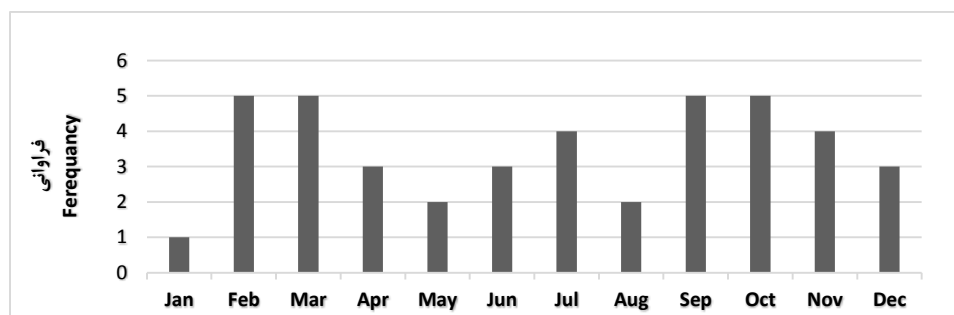
$$SUHI = MLST_{urban} - FLST_{rural} \quad (7)$$

که در این رابطه SUHI جزیره‌ی گرمایی رویه‌ی زمین، $MLST_{urban}$ میانگین دمای رویه‌ی زمین در منطقه‌ی شهری و $FLST_{rural}$ دمای رویه‌ی زمین با بیشترین فراوانی رخداد در منطقه‌ی روستایی است.

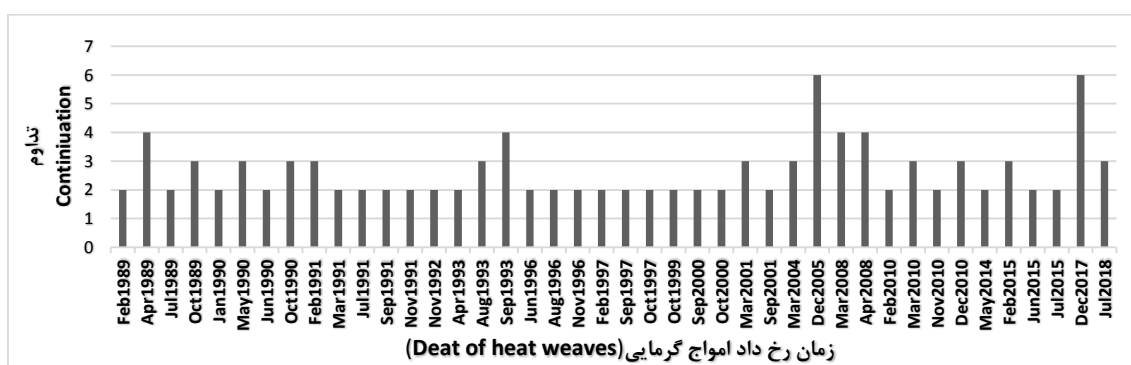


شکل ۲- فراوانی سالانه و روند موج گرمایی در ایستگاه سنندج (۱۹۸۹-۲۰۱۸)

Figure 2- Annual frequency and heat wave trend in Sanandaj station (1989-2018)



شکل ۳- فراوانی ماهانه امواج گرمایی در ایستگاه سنندج (۱۹۸۹-۲۰۱۸)
Figure 3- Monthly frequency of heat waves in Sanandaj station (1989-2018)



شکل ۴- زمان رخ داد و تداوم امواج گرمایی در ایستگاه سنندج (۱۹۸۹-۲۰۱۸)
Figure 4- Time of occurrence and continuation of heat waves in Sanandaj station (1989-2008)

درصد رطوبت نسبی و حداکثر سرعت باد در زمان رخ داد امواج گرمایی کمتر از شرایط قبل از موج گرمایی بوده است. بررسی شدت جزایر حرارتی در این شهر نشان داد که در روز هنگام در هر دو شرایط (وجود و عدم موج گرمایی) جزیره‌ی سرمایی در مرکز شهر تشکیل شده است که در شرایط حاکمیت موج گرمایی از شدت جزیره‌ی سرمایی کاسته شده و همچنان که در نمودار مشاهده می‌شود، در ماه‌های پایانی زمستان (فوریه) حتی در روز هنگام نیز جزیره‌ی گرمایی در مرکز این شهر ایجاد شده است. در شب هنگام چه در شرایط عادی و چه در شرایط رخ داد امواج گرمایی، جزیره‌ی گرمایی در مرکز شهر تشکیل شده که البته شدت جزایر گرمایی شبانه اغلب در زمان حاکمیت موج گرمایی در اواخر زمستان به طور کاملاً محسوس، بیشتر از شرایط عادی بوده است. به عنوان نمونه، در سوم فوریه ۲۰۱۵ (شرایط موج گرمایی) در مقایسه با ۲۴ ژانویه ۲۰۱۵ (شرایط عادی) جزایر گرمایی شبانه بیش از ۲ درجه شدت یافته است. بررسی وضعیت جزایر حرارتی در ماه‌های گرم سال (جدول ۲ شکل ۶). نشان داد که در هر دو شرایط وجود و عدم موج گرمایی، در مرکز شهر جزیره‌ی سرمایی وجود داشته که شدت آن در زمان حاکمیت امواج گرمایی خصوصاً در ماه‌های مربوط به فصل تابستان گاهی بیش از ۲/۵ درجه بالاتر از شرایط عادی بوده است. در شب هنگام اغلب جزیره‌ی گرمایی در مرکز شهر وجود داشته که شدت آن بیشتر از

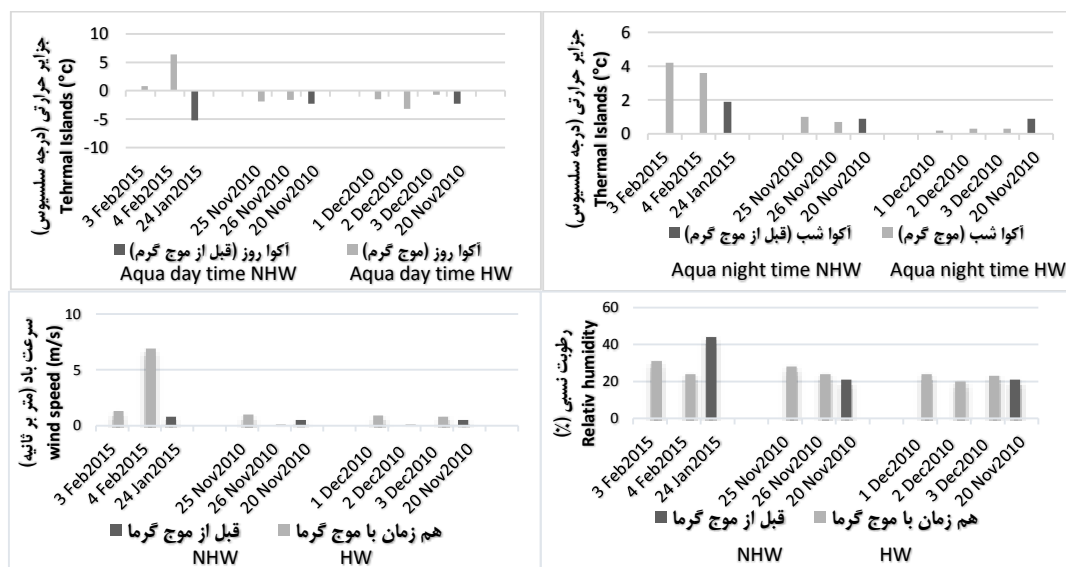
مقایسه‌ی شدت جزایر حرارتی در شرایط وجود و عدم موج گرمایی در ماه‌های گرم و سرد

با مقایسه‌ی مقادیر جزیره‌ی حرارتی در روزهای توأم با موج گرمایی و روز عادی بدون موج گرم با پایین‌ترین دمای حداکثر قبل از هر موج گرمایی در ماه‌های گرم و سرد سال نتایجی حاصل گردید که در جدول ۲ ارائه شده که در این جدول، ارقام مثبت حاصل از محاسبه‌ی اختلاف دمای رویه‌ی زمین در مناطق شهری و غیر شهری نشان‌گر جزیره‌ی گرمایی شهری و ارقام منفی نمایان‌گر جزیره‌ی سرمایی شهری در مرکز شهر سنندج می‌باشد. همچنین جهت مقایسه‌ی ملموس‌تر شدت جزایر حرارتی، باد و رطوبت نسبی در شرایط وجود و عدم موج گرمایی در ماه‌های گرم و سرد، پارامترهای مذکور در قالب نمودار در اشکال ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. طبق جدول و نمودارهای عنوان شده، در هر دو شرایط وجود و عدم موج گرمایی، در ماه‌های گرم و سرد سال، اغلب در روز، دمای مرکز شهر سنندج از دمای مناطق غیر شهری اطراف آن کمتر ولی در شب، بیشتر بوده است. بنابراین اغلب در روز، جزیره‌ی سرمایی و در شب، جزیره‌ی گرمایی در مرکز این شهر ایجاد شده است. همچنین بررسی‌ها نشان دادند که امواج گرمایی کوتاه مدت ۲ روزه نیز در تشدید جزایر حرارتی شهری مؤثر بوده است. طبق جدول ۲ و شکل ۵ در ماه‌های سرد،

نتیجه گیری

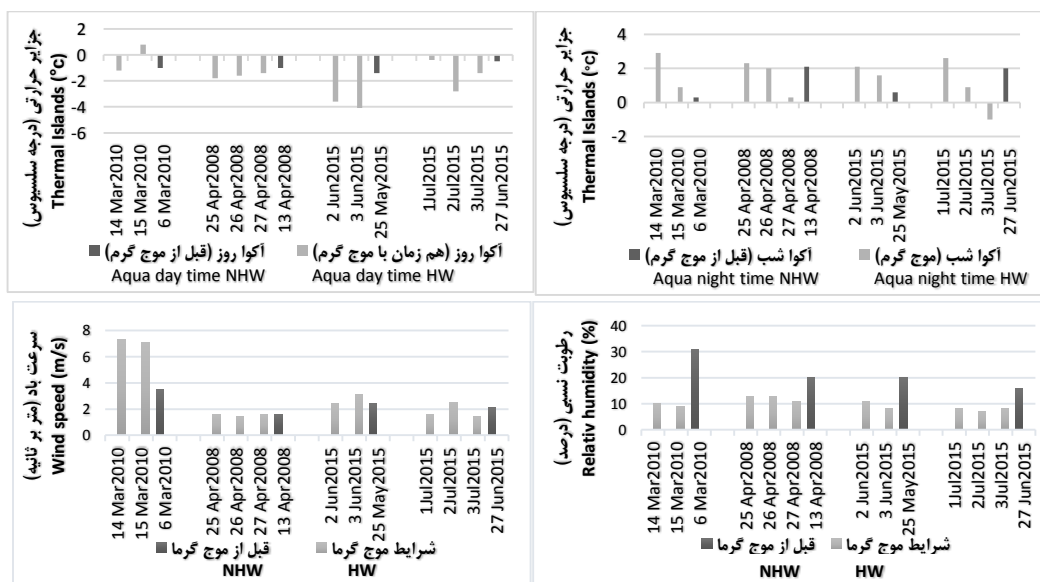
امواج گرما از زیان‌بارترین فرین‌های جوی می‌باشد که آگاهی از زمان وقوع و رابطه آن با پدیده‌هایی همچون جزایر حرارتی شهری، می‌تواند در کاهش آثار مخرب این مخاطره‌ی اقلیمی مفید واقع شود. هدف از پژوهش حاضر، بررسی اثر رخ داد امواج گرمایی بر تشدید جزایر حرارتی در شهر سنجند بود.

وضعیت عادی بوده است به طور مثال: در ۱۴ مارس ۲۰۱۰ (شرایط موج گرما) در مقایسه با ۶ مارس ۲۰۱۰ (شرایط عادی) بیش از ۲/۵ درجه بر شدت جزیره ی گرمایی شبانه افزوده شده است. همچنین در اثر وقوع موج گرما، سرعت باد و به ویژه رطوبت نسبی در ماه‌های گرم، محسوس‌تر از ماه‌های سرد سال کاهش یافته است.



شکل ۵- جزایر حرارتی، باد و رطوبت نسبی در شرایط وجود و عدم موج گرمایی در ماه‌های سرد

Figure 5- Thermal islands, wind and relative humidity in HW and NHW conditions in cold months



شکل ۶- جزایر حرارتی، باد و رطوبت نسبی در شرایط وجود و عدم موج گرمایی در ماه‌های گرم

Figure 6- Thermal islands, wind and relative humidity in HW and NHW conditions in hot months

جدول ۲- جزیره‌ی حرارتی محاسبه شده در ماه‌های سرد و گرم در شرایط وجود و عدم موج گرمایی

Table 2- Thermal Island in cold and hot months in HW and NHW conditions

Table 2- Thermal Island in cold and hot months in HW and NHW conditions							جزیره ی حرارتی سطحی شهر
شرایط وجود و عدم موج گرم (Heat Wave and No Heat Wave Condition)	تاریخ Date	حداکثر دما (T Max) (°c)	جهت باد (Wind) (direction	سرعت باد (Wind speed m/s)	رطوبت نسبی (Relative Humidity %)	(°C)(SUHI)	
						شب (Night-) (time	
						روز (Day- time) ۱۳:۳۸-۱۵:۲۴	
۰۲:۳۱-۰۳:۵۳							
(Cold months) ماه های سرد سال							
وجود موج گرما ^۱ (HW)	Feb 3th 2015	18	S	1.3	31	0.8	4.2
	Feb 4th 2015	18	S	6.9	24	6.4	3.6
عدم موج گرما ^۱ (NHW)	Jan 24th 2015	11.2	NW	0.8	44	-5.2	1.9
وجود موج گرما (HW)	Nov 25th 2010	20.2	W	1	28	-1.9	1
	Nov 26th 2010	20.4	NW	0.1	24	-1.6	0.7
عدم موج گرما (NHW)	Nov 20th 2010	17.8	N	0.5	21	-2.3	0.9
وجود موج گرما (HW)	Dec 1th 2010						
عدم موج گرما (NHW)	Dec 1th 2010	21.2	E	0.9	24	-1.5	0.2
	Dec 2 th 2010	21.2	N	0.1	20	-3.2	0.3
	Dec 3 th 2010	21.2	NW	0.8	23	-0.7	0.3
عدم موج گرما (NHW)	Nov 20th 2010	17.8	N	0.5	21	-2.3	0.9
(Hot months) ماه های گرم سال							
وجود موج گرما (HW)	Apr 25th 2008						
	Apr 26th 2008	31.6	S	1.6	13	-1.8	2.3
	Apr 27th 2008	32.5	S	1.4	13	-1.6	2
عدم موج گرما (NHW)	Apr 13th 2008	32.8	SW	1.6	11	-1.4	0.3
	Apr 13th 2008	23	SW	1.6	20	-1	2.1
وجود موج گرما (HW)	Mar14th 2010	26.4	S	7.3	10	-1.2	2.9
	Mar15th 2010	27.6	S	7.1	9	0.8	0.9
عدم موج گرما (NHW)	Mar 6th 2010	18.2	S	3.5	31	-1	0.3
وجود موج گرما (HW)	Jun 2th 2015	37	S	2.4	11	-3.6	2.1
	Jun 3th 2015	37.6	SW	3.1	8	-4.1	1.6
عدم موج گرما (NHW)	May25th 2015	29.2	SW	2.4	20	-1.4	0.6
وجود موج گرما (HW)	Jul 1th 2015	42.6	W	1.6	8	-0.4	2.6
	Jul 2th 2015	42.2	W	2.5	7	-2.8	0.9
	Jul 3th 2015	42	S	1.4	8	-1.4	-1
عدم موج گرما (NHW)	Jun 27th 2015	32.4	W	21.1	16	-0.5	2

گرم سال تأثیر محسوسی داشته است و با توجه به پیش‌بینی دانشمندان در خصوص وقوع تغییر اقلیم و گرمایش زمین طی دهه‌های آتی، احتمال می‌رود در این شهر، خصوصاً در شب هنگام و در ماه‌های گرم سال، جزایر گرمایی شبانه شدت بیشتری پیدا کند. یافته‌های پژوهش حاضر با یافته‌های اکثر پژوهش‌گران هم‌راستا بود از جمله: قبادی و همکاران (۱۶)، باسارا (۵)، فوندا و سنتامورس (۱۱)، الماسی و همکاران (۱)، دی رایدر و همکاران (۷)، حسینی (۱۸)، کرم پور و همکاران (۲۱)، کاشکی و همکاران (۲۲).

طبق یافته‌های پژوهش حاضر، باتوجه به این‌که جزایر حرارتی شهری حتی در شرایط عدم موج گرمایی در مرکز این شهر وجود داشته و با رخ داد موج گرمایی تحت تأثیر قرار گرفته است. لذا جهت کاستن شدت جزایر حرارتی در مرکز این شهر ذکر چند راهکار ضروری به نظر می‌رسد. از جمله: پوشاندن سطوح و ساختمان‌ها با مصالحی با ظرفیت گرمایی بالا، استفاده از درختان و درختچه‌ها در اطراف ساختمان‌ها، حفاظت از پوشش گیاهی طبیعی منطقه و افزودن فضاهای سبز و ایجاد بام سبز در مرکز شهر، توجه به جهت باد در ساخت و سازها و احداث غیر متمرکز آن‌ها در مرکز شهر به منظور کانالیزه شدن باد و تخلیه‌ی حرارتی بین ساختمان‌ها.

سپاسگزاری

با سپاس از همکاری سازمان هواشناسی کشور و اساتید محترم راهنما و مشاور، مقاله‌ی حاضر مستخرج از رساله دکتری می‌باشد.

طبق نتایج حاصل، فراوانی و تداوم بیشتر مخاطره‌ی موج گرمایی طی دوره‌ی مورد مطالعه به ویژه در ماه‌های سرد سال، می‌تواند از آثار تغییر اقلیم و گرمایش جهانی در منطقه‌ی مورد مطالعه باشد که این رخ داد شدید و مداوم موج گرما در شهر سنجند به عنوان نماینده‌ی سایر شهرهای استان کردستان به ویژه در اواخر زمستان و اوایل بهار که طبیعت آمادگی دماهای بالا را ندارد، می‌تواند سبب جوانه زنی و گل دهی زود هنگام محصولات زراعی و باغی شده و کشاورزی و باغداری را که جزء مشاغل اصلی ساکنین این منطقه است تحت تأثیر منفی قرار دهد و خسارات فراوان اقتصادی برای مردم این استان به دنبال داشته باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر رخ داد امواج گرمایی بر جزایر حرارتی، در روز هنگام حومه‌ی شهر به دلیل داشتن آسمانی صاف و بدون آلودگی، با حداقل پوشش گیاهی و نبود منابع آب سطحی و داشتن زمین‌های لخت با ظرفیت گرمایی پایین، نسبت به مرکز شهر سریع‌تر تحت تأثیر امواج گرمایی قرار گرفته و در نتیجه با گرم‌تر شدن رویه‌ی زمین در اطراف شهر نسبت به مرکز آن، جزیره‌ی گرمایی در مرکز شهر تشکیل یافته است. در شب هنگام حومه‌ی شهر به دلیل ظرفیت گرمایی پایین، گرمای جذب شده در طول روز را سریع‌تر، از دست داده و لذا نسبت به مرکز شهر سردتر شده و در نتیجه در مرکز شهر به دلیل بالاتر بودن دمای رویه‌ی زمین، جزیره‌ی گرمایی تشکیل شده است. همچنین با وقوع موج گرما، به دلیل رابطه معکوسی که بین دما و رطوبت نسبی وجود دارد، میزان رطوبت نسبی مرکز شهری اغلب در مقایسه با روزهایی عادی کاهش یافته است. در مجموع می‌توان گفت که رخ داد امواج گرمایی در تشدید جزایر حرارتی در شهر سنجند به ویژه در ماه‌های

منابع

- 1- Almasi F., Tawoosi T., and Hosseinabadi N. 2016. Analysis of Behavior and Frequency Changes in the Occurrence of Heat Waves in Ahvaz, Journal of Spatial Planning 19: 150-137. (In Persian with English abstract)
- 2- Almusaed A. 2011. The Urban Heat Island Phenomenon upon Urban Components. Biophilic and Bioclimatic Architecture 21: 139-150.
- 3- Azizi Gh. 2004. Climate change, Tehran, Ghoms Publishing, first edition, 434.
- 4- Bai L., Gangqiang D., Shaohua G., Peng B., Buda S., Dahe Q., Ramamurthy P., and Bou-Zeid E. 2017. Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. Journal of Geophysical Research Atmospheres an. 122: 168-178.
- 5- Basara J., Basara H., Bradley I., and Kenneth C. 2018. The Impact of the Urban Heat Island during an Intense Heat Wave in Oklahoma City. Advances in Meteorology 7: 1-10.
- 6- Ceccherini G., Russo S., Ametztoy I., Patricia R., Claudia C., and Moreno C. 2016. Magnitude and frequency of heat and cold waves in recent decades: the case of South America. Nat. Hazards Earth System 16: 821-831.
- 7- De Ridder K., Maiheu B., Lauwaet D., Daglis I A., Keramitsoglou I., Kourtidis K., Manunta P., and Paganini M. 2016. Urban Heat Island Intensification during Hot Spells-The Case of Paris during the Summer of 2003. Urbanscience 1: 1-11.
- 8- Dobrovolny P., and Krahula L. 2015. The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic, Moravian Geographical Reports 23: 8-16.
- 9- Feng C., Xuchao Y., and Weiping Z. 2014. WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China. Atmospheric Research 138: 364-377.

- 10- Feron R., Sarah R., Cordero P., Alessdro J., Damiani L., Jorquera E., sepulveda V., Asencio Laroze D., Labbe F., Carrasco J., and torres G. 2019, observations and projections of Heat Waves in south Americas. Scientific Reports 9: 1-15.
- 11- Founda D., and Santamouris M. 2017. Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012), Scientific Reports 7: 1-16.
- 12- Fujibe F., Yamazaki N., Kobayashi K., and Nakamigawa H. 2007. Long-term changes of temperature extremes and day-to-day variability in Japan, papers in Meterology and Geophysics, IPCC 85: 63-70.
- 13- Fumiaki F., Yamazaki N., Kobayashi K., and Nakamigawa H. 2007. Long-term changes of temperature extremes and day-to-day variability in Japan, papers in Meterology and Geophysics, 58.
- 14- Ghasemifar E., and Naserpour S. 2019. Synoptic analysis of heat and cold waves on the southern shores of the Caspian Sea, Journal of Geographical Information (Sepehr) 103: 146-137. (In Persian with English abstract)
- 15- Ghavidel F. 2014. Identification, classification and synoptic analysis of heat waves in northwest of Iran, M.Sc. Thesis, University of Tabriz, Supervisor: Saeed Jahanbakhsh. (In Persian with English abstract)
- 16- Ghobadi A., Khosravi M., and Tavousi T. 2017. Surveying of Heat waves Impact on the Urban Heat Islands: Case study, the Karaj City in Iran. Urban Climate 10: 1-16. (In Persian with English abstract)
- 17- Hoshyar M., Sobhani B., and Hoseyni S.A. 2018. Perspective Changes Maximum Temperator Urmia Using Disposition Statistics Contact CanESM2 Model, Journal of Geography and Planning 63: 325-305. (In Persian with English abstract)
- 18- Hosseini A. 2016. Assessment of Urban Heat Island based on the relationship between land surface temperature and Land Use/Land Cover in Tehran, Sustainable Cities and Society 23: 94-104. (In Persian with English abstract)
- 19- <https://search.earthdata.nasa.gov/>.
- 20- Ismail Nejad M., Khosravi M., Alijani B., and Masoudian A. 2013. Identification heat waves of Iran, Geography and Development 3: 39-54. (In Persian with English abstract)
- 21- Karampoor M., Rafiyi J., and Jafari A. 2017. Synoptic identification and analysis of heat waves in western Iran (Ilam, Khuzestan, Lorestan, Kermanshah), Environmental Hazard Management (former hazard knowledge) 3: 263-279. (In Persian with English abstract)
- 22- Kashki A., Karami M., Baaghdeh M., and Ali Moradi M.R. 2019. Statistical analysis of Zabul heat waves, Changes and Weather Hazards 1: 40-55. (In Persian with English abstract)
- 23- Khandelwal S., Goyal R., Kaul N., and Mathew A. 2017. Assessment of land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science 21: 1-8.
- 24- Lazzarini M., Marpu P.R., and Ghedira H. 2013. Temperature-land cover interactions: the inversion of urban heat island phenomenon in desert city areas. Remote Sensing of Environment 130: 136-152.
- 25- Lemonsu A., Vigié V., Daniel M., and Masson V. 2015. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). Urban Climate 14: 586-605.
- 26- Meteorological Organization of Iran .<http://www.irimo.ir>.
- 27- Mojarad F., Nasiriyah M., and Hashemi S. 2018. Investigation of periodic and seasonal changes of day and night heat island in Kermanshah City using satellite images, Earth and Space Physics 44: 479-494. (In Persian with English abstract)
- 28- Muhire I., and Ahmed F. 2016. Spatiotemporal trends in mean temperatures and aridity index over Rwanda. Theoretical and Applied Climatology 123: 399-414.
- 29- Omidvar K., Mahmoud Abadi M., Olfati S., and Moradi Kh. 2016. Investigation of the possibility of heat waves in selected stations of Kermanshah province, Journal of Environmental Hazards 10: 1-20. (In Persian with English abstract)
- 30- Paravantis J., Santamouris M., Constantinos C., Efthymiou Ch., and Kontoulis N. 2017. Mortality Associated with High Ambient Temperatures Heat waves, and the Urban Heat Island in Athens, Greece, June 2013, Sustainability 1-22.
- 31- Rahimi D., Mir Hashemi H., and Alizadeh T. 2016. Analysis of heat waves structure in the west and northwest of Iran, Geography and Environmental Planning 3: 69-80. (In Persian with English abstract)
- 32- Ramamurthy P., and Bou-Zeid E. 2017. Heatwaves and urban heat islands: A comparative analysis of multiple cities. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 1: 168-178.
- 33- Rohini P., Pajeevan M., and Mukhopahay P. 2019. Future projections of heat waves over India from CMIP5 models, Climate Dynamics 53: 975-988.
- 34- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen M., and Marquis K.B, IPCC. 2007.
- 35- Sadeghi H., Aghighi M.A., and Suri D. 2017. Investigation of the occurrence of the phenomenon of urban thermal islands using Aster satellite images (Study area: Shiraz city), Third International Conference on Research in Engineering Sciences, 9th of September. (In Persian with English abstract)
- 36- Tan J., Zheng Y., Tang X., Guo C., Li Li., Song Y., Kalkstein A.J., and Furong Li. 2010. The Urban heat island and its impact on heat waves and human health in shanghai. International Journal of Biometeorology 54: 75-84.

- 37- Weihe Z., Shuang Ji., Tsun-Hsuan Ch., Hou Y., and Zhang K. 2014. The 2011 heat wave in Greater Houston: Effects of land use on temperature. *Environmental Research* 135: 81–87.
- 38- Wilks D. 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Second Edition, Academic Press is an imprint of Elsevier, Cornell University USA, Volume 100 3rd Edition: 706.
- 39- Zhou B., Lauwaet D., Hooyberghs H., De Ridder K., Kropp J.B., and Rybski D. 2016. Assessing Seasonality in the Surface Urban Heat Island of London, *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55: 493-505.



Investigating the Effect of Heat Waves on the Intensification of Thermal Islands in Sanandaj City From 1989 to 2018

R. Maleki Meresht¹- B. Sobhani^{2*}- M. Moradi³

Received: 04-07-2021

Accepted: 25-09-2021

Introduction: Heat waves (HWs) are one of the most important climatic disasters that have devastating environmental consequences in nature every year). The purpose of this study is investigation of the effect of heat waves on the intensification of thermal islands in Sanandaj city from 1989 to 2018. The constant rise in temperature of the city as an urban heat island and the sudden occurrence of HW's as one of the major climatic hazards, is an important concern of urban management policy makers; because intensify heat of this city and cause a lot of environmental damage.

Materials and Methods: In order to identify HWs in Sanandaj city, from 1989 to 2018, by using Fumiaki Index and MATLAB software, days whit temperature above +2 standard deviation or above the mean Normalized Thermal Deviation (NTD) that lasted at least two days, were identified as the day with HWs and calculated by equation 1.

$$\overline{T(i,j)} = \sum_{n=2003}^{2018} T(i,j,n) \div N \quad (1)$$

Where, T (i, j, n) is temperature of day ith from month jth in year nth and $\overline{T(i,j)}$ indicates the average temperature of day i from month j. To eliminate the noise in the mean, a 9-day moving average filter was performed on these data three times and calculated by the following equation.

$$\Delta T = (i,j,n) = T(i,j,n) - \overline{T(i,j)} \quad (2)$$

Where, $\Delta T = (i,j,n)$ indicates absolute deviation of temperature from the average on day jth of the month ith, in year nth compared to the average temperature of the same day. In order to the values of temperature deviation of different times and places to be comparable at a certain time and place, it is necessary to standardize these absolute values of temperature deviation by means of temperature diffraction. Like day-to-day changes, diffuse TΔ at 31 days for each day is calculated by the following equation.

$$\overline{\sigma^2(i,j)} = \sum_{n=2003}^{2018} \sum_{j=-16}^{j+16} [\Delta T(i,j',n) - \overline{\Delta T(i,j',n)}]^2 \div 31N \quad (3)$$

The value $\overline{T(i,j)}$ is the average temperature deviation in 31 days that is calculated by the following equation.

$$\overline{\Delta T(i,j)} = \sum_{n=2003}^{2018} \sum_{j=-16}^{j+16} T(i,j',n) \div 31N \quad (4)$$

Finally, (NTD) is calculated by the following equation.

$$x(i,j,n) = \Delta T(i,j,n) \div \overline{\sigma(i,j)} \quad (5)$$

Where $\overline{\sigma(i,j)} = \sqrt{\overline{\sigma^2(i,j)}}$. Then in MATLAB software, days with temperatures +2 above average (NTD) and lasting at least two days, were selected as the day with the HW.

$$NTD(i), NTD(i+1), ..., NTD(i+p-1) \geq 2, NTD(i-1), NTD(i+p) \leq \quad (6)$$

Then the thermal island was calculated in Sanandaj city using Equation 7.

1 and 2- Ph.D. Student and Professor of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

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

3- Ph.D. of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

DOI: 10.22067/JSW.2021.71049.1061

$$\text{SUHI} = \text{MLST}_{\text{urban}} - \text{FLST}_{\text{rural}} \quad (7)$$

Where, SUHI is the island surface heat index, $\text{MLST}_{\text{urban}}$ and $\text{FLST}_{\text{rural}}$ are the average surface temperature of urban and rural areas, respectively.

Results and Discussion: The results showed that, during the study period (1989-2008), the highest frequency of HW hazards in this city was in September, February, March, and October 1991. The maximum duration of HWs was 6 days, which occurred in December 2017 and 2005, therefore long-term HWs have been experienced in this city. Results also showed, in both HW and NHW conditions, in the hot and cold months of the year, often a cold island is formed in the city center during the day and a heat island is formed at night. Results also showed that short-time heat waves have been effective in intensifying heat islands. Examination of the intensity of thermal islands in this city showed that during the day in both HW and NHW conditions, which in the HW conditions dominance of the cold island compared to normal day, it has been reduced and in the last months of winter (February), even during the day, a heat island has been created in the center of the city. At night time, in both HW and NHW conditions, a heat island was created in Sanandaj center, but the intensity of night-time heat islands in HW conditions is often significantly higher than normal conditions especially in the winter. Investigation of the condition of thermal islands in the warm months of the year showed that in both HWs, a cold island has been created in the city center that the intensity of cold islands during the HW conditions, especially in the summer months, was often higher than NHW conditions. At night time, there was often a heat island in the city center that was more intense than normal day. Also, in HW conditions, wind speed and especially relative humidity has decreased significantly more than the cold months of the year.

Conclusion: According to the results the highest incidence of HW hazards occurred in the winter and early spring. Also, long-term (6-days) HW occurred in this period. The increasing trend, frequency and continuation of HW, especially in the cold months of the year, can be the effects of climate change and global warming. Severe and continuous HWs occurred in Sanandaj city, especially in late winter, can cause early germination and flowering of crops and gardens and it will negatively affect agriculture and horticulture and will lead to great economic losses. The effects of HWs on heat islands occurred in the suburbs due to having a clear sky without pollution, with minimal vegetation and lack of surface water resources and ground with low heat capacity is affected by HWs faster than the city center and as the land surface around the city becomes warmer than its center, a cold island is formed in the city center. At night, the suburbs due to low heat capacity, lose absorbed heat faster and as a result, the heat island is formed in the city center. In general, the occurrence of heat waves in the intensification of thermal islands in the Sanandaj city, especially in the warm months of the year, has a significant effect, and it is likely to intensify in the coming decades, especially at night during the hot months of the year.

Keywords: Fumiaki index, Heat waves, Sanandaj city, Thermal islands

مقاله پژوهشی

ارزیابی مقایسه‌ای شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از کریجینگ و آنتروپی

سمیرا بیاتی^۱ - خدایار عبدالمهی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶

چکیده

یک شبکه باران‌سنجی بهینه برآورد واقع گرایانه‌ای از میانگین یا پراکنش بارش نقطه‌ای حوزه آبخیز دارد. گرچه افزایش تراکم شبکه باران‌سنجی موجب کاهش خطای برآورد می‌گردد اما تعداد ایستگاه‌های بیشتر به معنای هزینه نصب و نظارت بیشتر است. هدف از مطالعه حاضر ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تئوری آنتروپی است. بدین منظور وضعیت آماری ایستگاه‌های این استان مطالعه و دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ به عنوان پایه زمانی مشترک انتخاب و همگنی، وجود روند در سری زمانی داده‌ها و کفایت تعداد باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی بررسی شد. سپس با استفاده از روش کریجینگ، نقشه‌های درون‌یابی بارش سالانه و خطای استاندارد آن‌ها در دوره مورد مطالعه تهیه و سهم هر ایستگاه در کاهش یا افزایش خطا در شبکه باران‌سنجی با حذف هر ایستگاه بررسی شد. با استفاده از مفهوم آنتروپی، کارایی شبکه باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه ارزیابی و مقادیر شاخص‌های آنتروپی محاسبه گردید. در نهایت ارزش و اهمیت ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از شاخص اطلاعات خالص تبدیلی سنجیده شد. نتایج این مطالعه، همگنی داده‌ها و عدم وجود روند معنی‌دار در سری داده‌ها را نشان داد. نتایج محاسبه خطای کریجینگ نشان داد که با حذف ایستگاه آب ترکی مقدار خطا 0.3% و با حذف هریک از ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز مقدار خطا 0.1% افزایش می‌یابد، لذا از اهمیت بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردارند. طبق نتایج شاخص اطلاعات خالص تبدیلی ایستگاه‌های بارده، بره مرده و دزک آباد به ترتیب با رتبه‌های ۱ تا ۳ دارای انتقال و دریافت اطلاعات و ارزش حفظ بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها بودند.

واژه‌های کلیدی: انتقال اطلاعات، بارش سالانه، درون‌یابی، زمین‌آمار، شبکه باران‌سنجی

مقدمه

است (۱). تراکم و توزیع بهینه باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی نقش به‌سزایی در موفقیت بیشتر طرح‌های آبی و استفاده مؤثر از اطلاعات ایفا می‌کند (۱۲). یک شبکه باران‌سنجی قابل اطمینان، داده‌های بارندگی سریع و دقیق را ارائه می‌دهد که برای طراحی سازه‌های هیدرولیکی قابل اجرا و اقتصادی در کنترل سیل بسیار مهم است (۱). بنابراین شبکه باران‌سنجی با طراحی خوب باید شامل تعداد کافی باران‌سنج باشد که نشان‌دهنده تنوع مکانی و زمانی بارندگی (۳۶) و قادر به تخمین بهتر بارش با تعداد مناسب ایستگاه‌ها در حوضه آبریز باشد (۲۱). این درحالی است که استفاده از داده‌های نادرست بارش ممکن است منجر به خطاهای قابل توجهی در طراحی پروژه‌های منابع آب و در نهایت منجر به خسارات جانی و مالی قابل توجهی شود. بنابراین، شناسایی و انتخاب بهترین پیکربندی شبکه با داشتن تعداد و مکان‌های مطلوب ایستگاه‌های باران‌سنجی، تنها هدف طراحی شبکه است (۱). می‌توان با حذف ایستگاه‌های اضافی برای به

داده‌های بارندگی، کاربردهای مختلفی در مدیریت منابع آب از جمله تجزیه و تحلیل و ارزیابی بودجه آب، تجزیه و تحلیل و پیش‌بینی فرکانس سیل، تخمین جریان رودخانه و طراحی سازه‌های هیدرولیکی دارند. هیدرولوژیست‌ها معمولاً ملزم به تخمین میزان متوسط بارش در گستره حوضه آبریز و/یا بارندگی نقطه‌ای در مکان‌های نمونه‌برداری نشده، از اندازه‌گیری‌های نمونه مشاهده شده در مکان‌های همسایه هستند. این کار با یک شبکه باران‌سنجی طراحی شده امکان‌پذیر

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد
(*)- نویسنده مسئول:

(Email: kabdolla@sku.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.72310.1086

حداقل رساندن هزینه یا با گسترش شبکه با نصب ایستگاه‌های اضافی برای کاهش عدم قطعیت برآورد، مشکلات را برطرف نمود (۲۱).

به‌طور کلی برای ارزیابی و طراحی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی از روش‌های آماری، درون‌یابی مکانی، تئوری مبتنی بر اطلاعات و ترکیبی استفاده می‌گردد (۲۴). کاربرد روش‌های درون‌یابی زمین‌آمار در سه دهه گذشته با استفاده از مقادیر نقطه‌ای یا مقادیر منطقه‌ای، با در نظر گرفتن کوواریانس بوده است. تکنیک درون‌یابی مکانی، امکان تخمین داده‌ها را در هر مکان در حوزه آبخیز فراهم می‌کند (۵، ۱۷ و ۱۸). روش کریجینگ^۱ به‌دلیل کاربردی بودن و فراهم نمودن واریانس تخمین بیشتر موردتوجه بوده است (۱) و با توجه به مختصات مکانی می‌تواند به‌صورت غیرخطی استفاده گردد (۶). این روش در طراحی شبکه باران‌سنجی کاربردهای گسترده‌ای دارد. از ویژگی‌های مهم این روش ارائه خطای کریجینگ است که مبنای طراحی شبکه باران‌سنجی تشکیل می‌دهد. پیکربندی بهینه شبکه را می‌توان با به حداقل رساندن خطای کریجینگ که شامل یک فرآیند جستجوی علمی برای یافتن ترکیبی بهینه از تعداد و مکان مناسب ایستگاه‌های تولیدکننده حداقل خطای کریجینگ است، به‌دست آورد (۱). چهار هدف مختلف در طراحی و ارزیابی مطلوب شبکه باران‌سنجی با استفاده از روش زمین آماری مبتنی بر کریجینگ شامل گسترش شبکه باران‌سنجی موجود با ایستگاه‌های اضافی برای دستیابی به تراکم شبکه مناسب برای کاهش عدم قطعیت برآورد (۴، ۸، ۲۶ و ۳۳)، شناسایی و استقرار مکان بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی اضافی در شبکه برای بهبود دقت تخمین (۹ و ۲۷)، اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی با توجه به سهم آن‌ها در کاهش خطا در شبکه (۱۰، ۱۴ و ۳۶) و انتخاب زیرمجموعه‌ای از ایستگاه‌های بهینه از شبکه باران‌سنجی متراکم موجود برای دستیابی به اطلاعات مطلوب بارندگی (۲۹) می‌باشند. روش پرکاربرد دیگر، تئوری آنتروپی^۲ است که به‌طور خاص از دهه ۱۹۷۰ به‌طور گسترده‌ای برای طراحی شبکه جمع‌آوری داده‌های هیدرولوژیکی و ارزیابی عدم قطعیت پذیرفته شده است (۱۵). در بسیاری از مطالعات، روش کریجینگ به تنهایی برای طراحی شبکه باران‌سنجی استفاده شده است (۱۰، ۱۴، ۲۶ و ۳۳). برخی مطالعات نیز از روش کریجینگ در ترکیب با روش‌های دیگر مانند آنتروپی (۹ و ۳۶) و تحلیل عاملی چند متغیره (۲۹) برای طراحی شبکه استفاده کردند. کسایی رودسری و همکاران (۱۳) تراکم شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان‌های خراسان رضوی، شمالی و جنوبی را در دو حالت مجزا و پیوسته با استفاده از

روش زمین آماری بررسی نمودند. زندکریمی و همکاران (۳۸) به‌منظور تحلیل مکانی و بهینه‌سازی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی استان کردستان از روش‌های زمین‌آمار بر مبنای واریانس خطای کریجینگ استفاده نمودند. شهیدی و همکاران (۳۰) در طراحی شبکه پایش ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، روش آنتروپی را به کار بردند و با رتبه‌بندی ایستگاه‌های شبکه، انتقال و دریافت اطلاعات ایستگاه‌ها را بررسی نمودند. در مطالعه ولی‌پور و همکاران (۳۴) به‌منظور بهینه‌سازی شبکه باران‌سنجی حوضه آبریز شرق دریاچه ارومیه از آنتروپی اطلاعات استفاده و ایستگاه‌های مهم حوزه‌آبخیز را تعیین نمودند. میسرا و کولیالی (۲۲) با استفاده از سه اصطلاح آنتروپی (حاشیه‌ای، مشترک و انتقال اطلاعات) طراحی شبکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری جریان رودخانه را در حوزه‌های آبخیز مختلف کانادا بررسی کردند. یه^۳ و همکاران (۳۶) به‌منظور اصلاح شبکه باران‌سنجی در تایوان از دو روش آنتروپی و کریجینگ استفاده نمودند. شقاقیان و عابدینی (۲۹) برای اولویت‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی از نظر محتوای اطلاعات در منطقه دشتی واقع در استان‌های کهگیلویه-بویراحمد و خوزستان، ترکیبی از ابزارهای زمین‌آمار و تجزیه به عامل را همراه با یک روش خوشه‌بندی به کار بردند. آدهیکاری و همکاران (۱) با استفاده از روش کریجینگ یک شبکه باران‌سنجی مطلوب در حوضه آبریز رودخانه یارا میانه در ویکتوریا، استرالیا طراحی نمودند که کاهش خطای کریجینگ به‌عنوان شاخصی برای موقعیت مکانی بهینه ایستگاه‌ها در نظر گرفته شد. خو و همکاران (۳۵) رویکردی را براساس کریجینگ و آنتروپی برای تعیین یک طراحی مطلوب شبکه در شهر شانگهای، چین پیشنهاد کردند. این رویکرد نه تنها از روش کریجینگ به‌عنوان یک روش درون‌یابی برای تعیین داده‌های بارندگی در مکان‌های فاقد آمار استفاده می‌کند بلکه دارای حداقل خطای استاندارد کریجینگ و حداکثر محتوای اطلاعات خالص (NI)^۴ است.

کاربردهای متعددی در تئوری آنتروپی در علوم زمین موجود است اما در این مطالعه به حالت مقایسه‌ای این تئوری در کنار زمین‌آمار برای شناخت طرح شبکه‌های باران‌سنجی استفاده شده است. در استان چهارمحال و بختیاری به‌عنوان سرمنشاء دو رود بزرگ کارون و زاینده‌رود بارش عنصر علمی مهمی است و به لحاظ کاربرد نیز در بخش‌هایی از استان تراکم ایستگاهی نامطلوب و در برخی مناطق ایستگاه‌های مازاد وجود دارد که من حیث هزینه ساخت و نگهداری قابل توجه است. لذا هدف از مطالعه حاضر، ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تئوری آنتروپی در

3- Yeh

4- Net Exchange Information

1- Kriging

2- Entropy

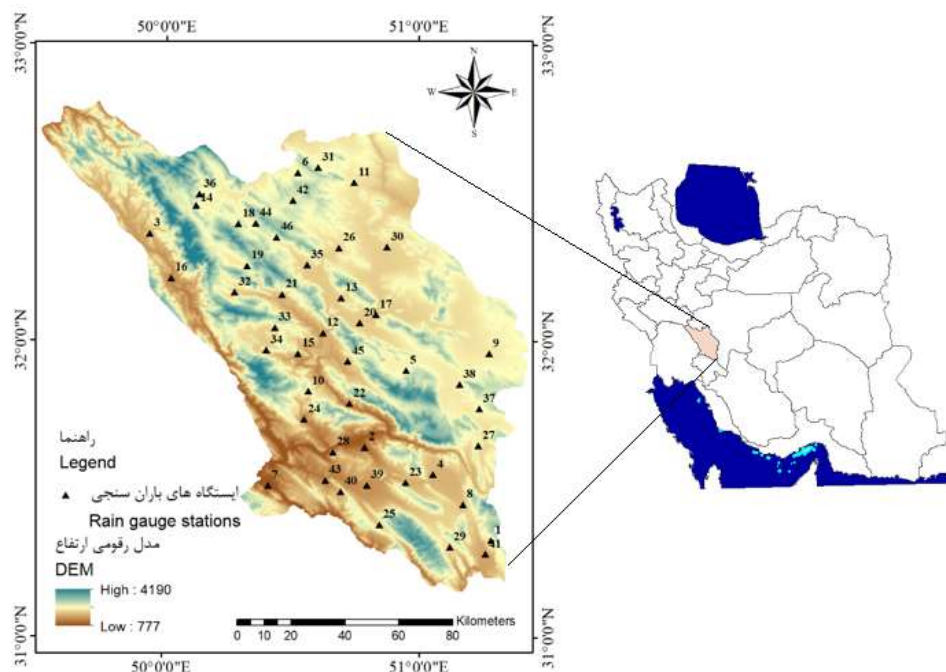
متر می‌باشد. براساس تقسیم‌بندی کوپن، اقلیم این استان در نواحی شرقی معتدل و سرد با تابستان‌های گرم و خشک، در ارتفاعات ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متری معتدل سرد و تابستان‌های خشک، در نواحی غربی نیمه گرمسیری با تابستان‌های گرم و خشک و در ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متری اقلیم ارتفاعات می‌باشد که پوشیده از برف‌های دائمی است. در مرکز استان (شهرکرد) ۱۷ روز از سال همراه با برف یا مخلوط برف و باران و بیشترین فراوانی این پدیده در کوه‌رنگ با ۵۳ روز از سال می‌باشد. تعداد روزهای یخبندان در سال در نواحی مختلف استان متفاوت است، کمترین آن به مدت ۸۳ روز به‌طور متوسط سالیانه در لردگان و بیشترین آن در دزک با ۱۴۰ روز می‌باشد (۷). همچنین میانگین بارندگی سالانه ۵۶۰ میلی‌متر است که می‌تواند بین ۲۵۰ میلی‌متر در شرق و جنوب شرقی و ۱۴۰۰ میلی‌متر در شمال غربی استان متغیر باشد. میانگین دمای سالانه نیز بین ۹ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد، حداکثر دمای مطلق ۴۶ درجه سانتی‌گراد (در لردگان) و حداقل دمای مطلق ۳۳- درجه سانتی‌گراد (در چلگرد) می‌باشد (۳۹).

استان چهارمحال و بختیاری می‌باشد. با حذف هر ایستگاه و تهیه نقشه‌های خطای درون‌یابی کریجینگ، سهم هر ایستگاه در کاهش یا افزایش خطا در شبکه باران‌سنجی بررسی و در مناطق با خطای زیاد نصب ایستگاه جدید پیشنهاد می‌گردد. همچنین با محاسبه مقادیر شاخص‌های آنتروپی و شاخص اطلاعات خالص تبدیلی ایستگاه‌های دارای انتقال و دریافت اطلاعات و ارزش حفظ بیشتر مشخص می‌شوند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۳۲۸ کیلومترمربع در جنوب غربی ایران و بین ۴۹°۲۸' تا ۵۱°۲۵' طول شرقی و ۳۱°۰۹' تا ۳۲°۴۸' عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این منطقه از سمت شمال و شرق به استان اصفهان، از غرب به استان خوزستان، از جنوب به استان کهگیلویه و بویراحمد و از شمال غرب به استان لرستان محدود شده است. حداقل و حداکثر ارتفاع در این منطقه ۷۷۷ و ۴۱۹۰



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های باران‌سنجی
Figure 1- The location map of rain gauge stations in the study area

۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ به‌عنوان پایه زمانی مشترک و ۴۶ ایستگاه باران‌سنجی دارای آمار کامل‌تر برای انجام پژوهش انتخاب شدند. همگنی داده‌ها با استفاده از روش‌های آزمون جرم مضاعف و رسم هیستوگرام در نرم‌افزارهای اکسل و SPSS بررسی شد. در هیستوگرام داده‌ها، اگر

به‌منظور انجام این مطالعه داده‌های بارش در مقیاس روزانه از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان چهارمحال و بختیاری واقع در شهرکرد جمع‌آوری و بعد از آزمون‌های آماری، سری زمانی سالانه داده‌ها تهیه شد. با بررسی وضعیت آماری ایستگاه‌ها، دوره آماری

که در آن، N تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی لازم، C_v ضریب تغییرات بارندگی منطقه بر اساس تعداد ایستگاه‌های موجود و داده‌های آماری آن‌ها، E درصد اشتباه مجاز در تخمین میانگین بارندگی منطقه، S انحراف از معیار و $\bar{P}$ متوسط بارندگی سالانه، n تعداد ایستگاه‌های موجود، $\bar{P}^2$ متوسط مجذورات بارندگی سالانه، P مقدار بارندگی سالانه در هر ایستگاه و $\sum P$ مجموع بارندگی سالانه در ایستگاه‌های موجود می‌باشند (۲).

روش زمین‌آمار

داده‌های باران‌سنجی، مربوط به اندازه‌گیری باران در یک نقطه بوده (بارش نقطه‌ای) که این داده‌ها باید به کل محدوده پوشش‌دهنده تعمیم داده شوند. از خطاهایی که بر روی داده‌های نقطه‌ای بار می‌شود، خطای نحوه درون‌یابی آن‌ها برای تهیه نقشه‌های رستری و بیش‌تر به دلیل انتخاب روش نامناسب درون‌یابی است. از جمله روش‌های درون‌یابی شامل درون‌یابی خطی^۱، وزن‌دهی معکوس فاصله^۲، کریجینگ و کوکریجینگ^۳ می‌باشد. این روش‌ها توسط محققان بسیاری بررسی شده است که غالب آن‌ها روش کریجینگ را مناسب‌ترین روش معرفی کرده‌اند (۳). ویژگی منحصر به فرد این روش برآورد خطا علاوه بر تخمین متغیر است. با مشخص شدن قسمت‌های دارای خطای بیش‌تر، برای کاهش خطا می‌توان در این قسمت‌ها از داده‌های بیش‌تری استفاده کرد (۲۰). کریجینگ یک برآوردگر خطی است که رابطه آن به صورت زیر است:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i z(x_i) \quad (9)$$

که در آن، Z مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده شده در نقطه و w_i وزن آماری اختصاص داده شده به نمونه x_i و n تعداد نمونه‌های قرار گرفته در همسایگی نقطه مورد نظر می‌باشند. به منظور درون‌یابی داده‌های بارش از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جامع آب و زمین ILWIS^۴ و روش کریجینگ ساده و از بین مدل‌های مختلف دایره‌ای، نمایی، گاوسی، توانی، درجه دوم گویا، کروی و موجی از مدل کروی استفاده شد. مزیت استفاده از این روش و نرم‌افزار ILWIS ایجاد نقشه‌های رستری خطای درون‌یابی است. در مجموع ۷۵۶ نقشه به همراه نقشه‌های خطای آن‌ها برای ۱۷ سال تهیه و برای بررسی سهم هر ایستگاه در مقدار خطا، در هر گام یکی از ایستگاه‌ها حذف و نقشه‌ها تهیه شدند. سپس میانگین نقشه‌های

تعداد داده‌هایی که در یک بازه مشخص قرار می‌گیرند از بقیه بازه‌ها بیشتر باشد، هیستوگرام تک نمایی می‌باشد که نشان می‌دهد داده‌ها همگن و مربوط به یک جامعه آماری هستند. نما، بازه‌ای است که بیشترین تعداد داده‌ها را در خود جای می‌دهد (۲). سپس وجود یا عدم وجود روند در سری زمانی داده‌ها بررسی شد. در اغلب مطالعات هیدرولوژیکی روش‌های ناپارامتری به دلیل مناسب بودن برای سری داده‌های با توزیع غیرنرمال و یا دارای داده‌های گمشده استفاده شده‌اند. این روش‌ها بر خلاف روش‌های پارامتری حساسیت زیادی به داده‌های پرت ندارند که این یکی دیگر از مزایای این روش‌ها می‌باشد (۲۵). یکی از آزمون‌های ناپارامتری، آزمون اسپیرمن است که در اوایل دهه ۱۹۰۰ میلادی توسط چارلز اسپیرمن توسعه داده شد. در این آزمون، بعد از مرتب‌سازی داده‌ها به صورت صعودی، برای هر کدام رتبه از ۱ تا n در نظر گرفته می‌شود. سپس داده‌ها به صورت تاریخی مرتب و رتبه‌های هر کدام $(R(X_i))$ مقابل آن‌ها درج می‌شود. مقدار آماره D برای مجموعه داده‌ها و آماره اسپیرمن (Z_{SR}) با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود که در آن D دارای توزیع نرمال است (۳۷):

$$D = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n [R(X_i) - i]^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

$$V(D) = \frac{1}{n-1} \quad (2)$$

$$Z_{SR} = \frac{D}{\sqrt{V(D)}} \quad (3)$$

فرض صفر یکنواختی توزیع و مستقل بودن داده‌ها و فرض مقابل آن روند افزایشی یا کاهش داده‌ها در نظر گرفته می‌شود. بعد از مقایسه مقدار آماره t با مقدار بحرانی حاصله از جدول (با توجه به درجه آزادی $n-2$ و سطح معنی‌داری) چنانچه مقدار قدرمطلق آماره اسپیرمن از مقدار t جدول بزرگتر بوده فرض صفر رد شده و داده‌ها دارای روند خواهد بود، در غیر این صورت داده‌ها فاقد روند معنی‌دار هستند. در مرحله بعد، کفایت تعداد باران‌سنج‌ها در شبکه باران‌سنجی بررسی می‌گردد. تعداد کم باران‌سنج‌ها در یک منطقه، تخمین غیردقیق بارندگی و تعداد بیش از حد، مخارج اضافی را در بر دارد خواهند داشت. بسته به درجه دقت تخمین بارندگی، رابطه (۴) برای تعیین تعداد مطلوب ایستگاه‌های باران‌سنجی استفاده می‌شود (۲):

$$N = \left(\frac{C_v}{E}\right)^2 \quad (4)$$

$$C_v = \frac{100 S}{\bar{P}} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{n}{n-1} [\bar{P}^2 - (\bar{P})^2]} = \sqrt{\frac{\sum (P - \bar{P})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$\bar{P}^2 = \frac{\sum P^2}{n} \quad (7)$$

$$\bar{P} = \frac{\sum P}{n} \quad (8)$$

1- Linear Interpolation

2- Inverse Distance Weighted

3- Co- Kriging

4- Integrated Land and Water Information System

$$T(x, y) = H(x) - H(x|y) \quad (14)$$

$$T(x, y) = H(x) + H(y) - H(x, y) \quad (15)$$

$$T(y, x) = H(y) - H(y|x) \quad (16)$$

$$T(y, x) = H(y) + H(x) - H(y, x) \quad (17)$$

انتقال اطلاعات با استفاده از شاخص انتقال اطلاعات نرمال (ITI) نیز بیان می‌شود که نشان‌دهنده میزان اطلاعات استاندارد منتقل شده از یک مکان به مکان دیگر است. طبقه‌بندی میزان انتقال اطلاعات در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

$$ITI = \frac{T(x, y)}{H(x, y)} \quad (18)$$

اطلاعات دریافتی x از y به صورت $R(x, y)$ و اطلاعات ارسالی از x به y به صورت $S(x, y)$ و اطلاعات دریافتی و ارسالی ایستگاه i ام $R(i)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(x)} \quad (19)$$

$$S(x, y) = \frac{T(x, y)}{H(y)} \quad (20)$$

$$R(i) = R(x(i), \hat{x}(i)) \quad (21)$$

$$x(i) = a(i) + \sum_{j=1}^{I-1} y_j(i) \times b_j(i) \quad (22)$$

که $y(i)$ ماتریس داده‌ها از تمام ایستگاه‌های دیگر و $a(i)$ و $b(i)$ پارامترهای رگرسیون بین ایستگاه i ام و تمام ایستگاه‌های دیگر می‌باشد که به صورت خطی برازش داده شده است. مقادیر بزرگتر $R(i)$ و $S(i)$ به ترتیب نشان‌دهنده دریافت و ارسال بیشتر اطلاعات بین ایستگاه i ام و سایر ایستگاه‌های شبکه و ارزش بیشتر ایستگاه یاد شده هستند که حفظ و نگهداری ایستگاه مزبور توصیه می‌گردد (۲۸). در نهایت شاخص اطلاعات خالص تبدیلی ($N(i)$) است که ارزش هر ایستگاه را می‌سنجد. کمترین میزان $N(i)$ ، کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه پایش به خود اختصاص خواهد داد (۱۹).

$$N(i) = S(i) - R(i) \quad (23)$$

در این پژوهش با استفاده از تئوری آنتروپی، ارزش و اهمیت ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری مورد ارزیابی قرار گرفت.

خطا با استفاده از ابزار Mean Calc در نرم‌افزار بیلان آب WetSpas-M محاسبه شد.

روش تئوری آنتروپی

مفهوم آنتروپی برای اولین بار توسط شانون در سال ۱۹۴۸ معرفی شد که طبق تعریف برای دو متغیر گسسته x و y که $x_i, i=1,2,3, \dots, n$ و $y_j, j=1,2,3, \dots, m$ در همان فضای احتمال باشند، هر کدام یک احتمال گسسته وقوع $p(x_i)$ ، احتمال وقوع مشترک $x_i, y_j p(x_i, y_j)$ و احتمال رخ دادن x_i به شرط $y_j p(x_i | y_j)$ دارند (۳۱).

$$E(I(x)) = H(x) = - \sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) \ln p(x_i) \quad (10)$$

$E(I(x))$ امید ریاضی داده‌ها و $H(x)$ معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌ها است. اگر X یک متغیر قطعی باشد، احتمال اینکه مقدار خاصی را به خود اختصاص دهد یک و احتمال سایر مقادیر جایگزین دیگر صفر است. لذا $H(x)=0$ می‌تواند به عنوان حد پایین مقادیر توابع آنتروپی فرض شود، یعنی عدم قطعیت وجود ندارد و سیستم کاملاً نظم‌یافته است (۳۲). آنتروپی مشترک بیانگر اطلاعاتی است که در x و در y وجود دارند و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$H(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln p(x_i, y_j) \quad (11)$$

آنتروپی شرطی برای دو متغیر تصادفی x و y بیانگر اطلاعاتی از متغیر x است که در متغیر y موجود نمی‌باشد (۲۳).

$$H(x|y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i | y_j) \ln p(x_i | y_j) \quad (12)$$

آنتروپی انتقال اطلاعات، کاهش در عدم قطعیت در x با توجه به آگاهی از متغیر تصادفی y است و می‌تواند به عنوان اطلاعاتی از x تعریف شود که در y موجود هستند (۲۳).

$$T(x, y) = - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} p(x_i, y_j) \ln \left(\frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i)p(y_j)} \right) \quad (13)$$

$p(x)$ احتمال وقوع x و $p(x, y)$ احتمال وقوع مشترک x و y هستند. لازم به ذکر است که $T(x, y) = T(y, x)$ (۱۱) که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر شاخص انتقال اطلاعات

Table 1- Classification of information transfer index values

مقادیر شاخص	درجه اهمیت منطقه
Index values	The degree of importance for the region
0-0.2	کمبود شدید Severe deficit
0.2-0.4	کمبود Deficit
0.4-0.6	متوسط Medium
0.6-0.8	بالای متوسط Above average
>0.8	مازاد Surpluse

بروجن) نشان داد که با وصل کردن نقاط حاصله، خطی مستقیم حاصل می‌شود که نشان‌دهنده همگنی داده‌های بارندگی ایستگاه گندمان، نسبت به ایستگاه مجاور خود بود.

طبق نتایج آزمون اسپیرمن، داده‌های همه ایستگاه‌ها در دوره آماری موردبررسی، در سطح اطمینان ۹۹ درصد فاقد روند معنی‌دار بودند. از آنجا که داده‌های بارش بازسازی نشدند و در برخی سال‌ها به دلیل سال تأسیس متفاوت آن‌ها فاقد آمار بودند، باتوجه به تعداد داده‌های هر ایستگاه و متفاوت بودن درجه آزادی آن‌ها، مقادیر t متفاوتی داشتند. برای درجه آزادی‌های ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب t برابر ۳/۱۷، ۳/۱۱، ۳/۰۱، ۲/۹۸ و ۲/۵۰ بود. به‌طور کلی محدوده مقادیر D بین ۰/۶۱ تا ۰/۲۳ و Z_{SR} بین ۰/۸۷ تا ۰/۷۵ بود که از t جدول کوچکتر و نشان‌دهنده یکنواختی توزیع و مستقل بودن داده‌های این ایستگاه‌ها بود. نتایج بررسی تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی لازم نیز با مقادیر متوسط بارندگی سالانه ۶۲۳/۲ و ضریب تغییرات ۳۹/۱۴ نشان داد که اگر درصد اشتباه مجاز را ۵ درصد در نظر بگیریم، تعداد ۶۱ ایستگاه باران‌سنجی لازم است. با توجه به اینکه ۴۶ ایستگاه برای این پژوهش موجود بوده، ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی دیگر مورد نیاز است.

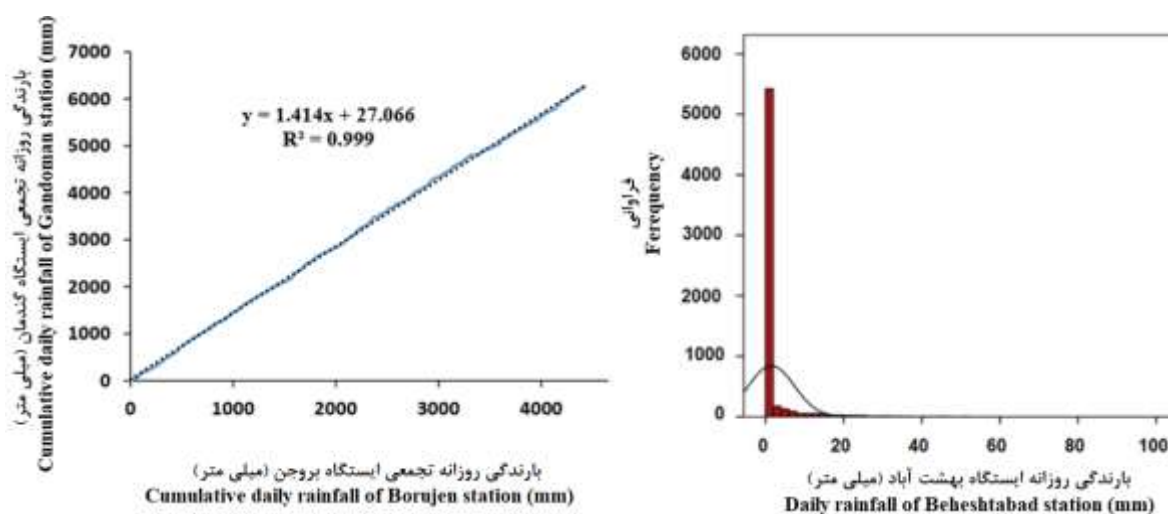
ارزیابی شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی با روش آنتروپی

جدول ۲ مقادیر محاسباتی شاخص‌های آنتروپی را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار $H(x)$ در داده‌های ایستگاه ارمند (۳/۲۶) و کمترین مقدار آن در ایستگاه عباس‌آباد (۲/۲۸) مشاهده شد.

بدین ترتیب تعداد ایستگاه‌های باران‌سنجی بهینه در منطقه مورد مطالعه جهت سنجش تغییرات بارندگی در منطقه مشخص می‌گردد. اولین گام صورت گرفته در این قسمت، تعیین رابطه خطی بین هر ایستگاه با سایر ایستگاه‌ها بود که با استفاده از روش حداقل کردن مربعات خطا با روش برنامه‌ریزی خطی در نرم‌افزار اکسل صورت گرفت. بنابراین برای هر ایستگاه باران‌سنجی یک رابطه خطی به صورت $y = B + C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n$ به دست آمده که در آن y مقدار تخمینی بارش در ایستگاه موردنظر برحسب میلی‌متر، $X_1, X_2, \dots, X_n$ مقادیر بارش در سایر ایستگاه‌ها برحسب میلی‌متر، $B, C_1, C_2, \dots, C_n$ نیز ضرایب ثابت هر معادله می‌باشند. سپس مقادیر شبیه‌سازی شده بارندگی سالانه هر ایستگاه با استفاده از رابطه مربوط به همان ایستگاه محاسبه شد. در مرحله بعد، کد محاسبات روش آنتروپی در نرم‌افزار برنامه‌ریزی Matlab اجرا و با استفاده از خروجی‌های این برنامه، شاخص‌های آنتروپی در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی همگنی داده‌ها با دو روش هیستوگرام و جرم مضاعف همگنی داده‌های بارندگی همه ایستگاه‌ها را نشان داد. به دلیل زیاد بودن تعداد ایستگاه‌ها از هر روش یک نمودار در شکل ۲ ارائه شده است. طبق شکل هیستوگرام ایستگاه بهشت‌آباد تک‌نمایی و نشان‌دهنده همگنی داده‌ها می‌باشد. در بررسی همگنی داده‌ها با استفاده از روش جرم مضاعف فرض شده است که داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک همگن هستند. نمودار بارندگی تجمعی ایستگاه‌های گندمان و ایستگاه سینوپتیک مجاور خود (ایستگاه



شکل ۲- نمودارهای هیستوگرام بارندگی ایستگاه‌های بهشت‌آباد و گندمان
Figure 2- Rainfall histogram charts for the Beheshtabad and Gandoman stations

مورد انتقال اطلاعات بارندگی دریافت کردند که نشان‌دهنده انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر یا ارزش حفظ بیشتر نسبت به ایستگاه‌های دیگر است. از طرفی ایستگاه‌های دورک اناری، آب ترکی و چلو کمترین ارزش و اعتبار را از نظر تبادل اطلاعات بارندگی کسب کردند.

از آنجا که $H(x)$ معیاری برای سنجش عدم قطعیت داده‌هاست، لذا عدم قطعیت در داده‌های ایستگاه ارمند بیشتر و در ایستگاه عباس‌آباد کمتر است. کمترین مقدار شاخص Ni ، کمترین رتبه و اهمیت را در شبکه باران‌سنجی دارد. لذا مقادیر این شاخص به‌ترتیب نزولی مرتب و به هر ایستگاه یک رتبه اختصاص داده شد. ایستگاه‌های بارده، بره مرده و دزک‌آباد به‌ترتیب رتبه‌های ۱ تا ۳ را در

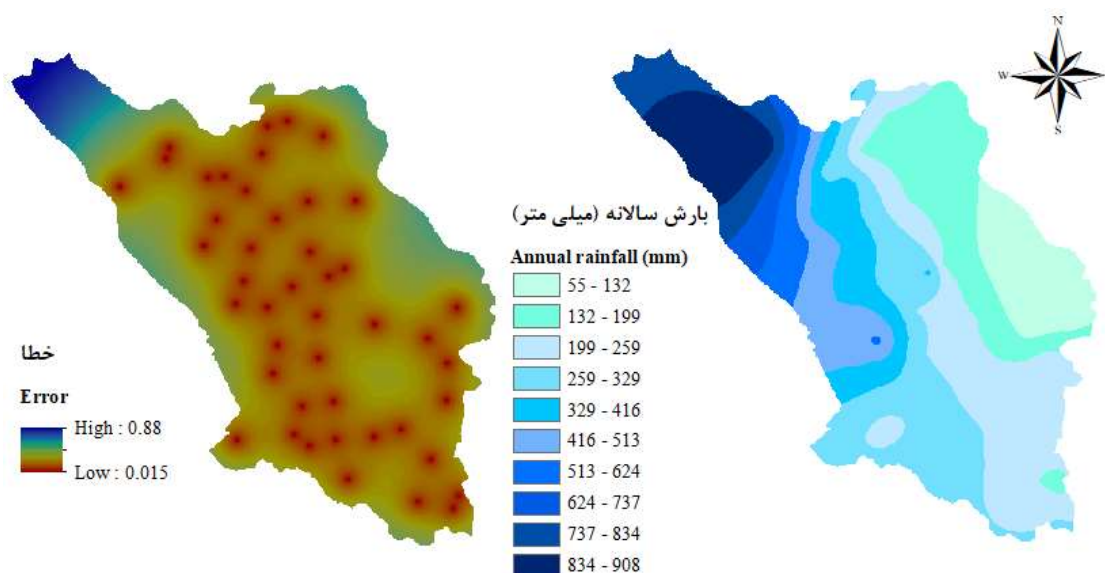
جدول ۲- مقادیر برخی شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی در منطقه بر اساس شاخص Ni
Table 2- Values of some entropy indices along with ranking of rain gauge stations related to the Meteorological Organization in the area based on the Ni index

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	H(x)	T(x,y)	ITI	Ni	رتبه	
Station number	Station name					Rank	
1	ابواسحاق	Abooesagh	2.63	2.32	0.76	-0.037	38
2	ارمند	Armand	3.26	3.01	0.87	0.01	13
3	آب ترکی	Abtorki	2.71	2.56	0.84	-0.055	42
4	آلونی	Aloni	3.13	2.70	0.76	-0.004	27
5	آورگان	Avargan	3.12	3.12	1.00	0	19
6	بارده	Bardeh	3.23	2.33	0.62	0.093	1
7	بارز	Barez	3.00	2.55	0.73	-0.016	33
9	بروجن	Borujen	3.13	2.51	0.67	0.001	17
10	بره مرده	Bare mordeh	2.93	2.14	0.63	0.084	2
11	بن	Ben	3.13	2.39	0.63	0.014	11
12	بهشت آباد	Beheshtabad	3.06	2.72	0.80	-0.005	30
13	جونقان	Joneghan	2.80	2.56	0.86	0.014	10
14	چلگرد	Chelgerd	3.14	2.87	0.86	0.021	8
15	چلو	Chelo	2.59	2.05	0.62	-0.048	41
17	خراجی	Kharaji	2.75	2.32	0.73	-0.001	23
18	دره زری	DareZari	2.67	2.16	0.66	-0.025	35
19	دزک آباد	Dezakabad	3.09	2.32	0.63	0.038	3
20	دستنا	Dastena	2.89	2.67	0.85	-0.008	31
21	دشتک	Dashtak	2.76	2.28	0.71	0	20
22	دورک اناری	Dorak anari	2.54	2.05	0.63	-0.064	43
23	زرین درخت	Zarin derakht	3.08	2.82	0.85	0	21
24	سرخون	Sarkhoon	3.09	2.55	0.71	0.006	14
25	سردشت	Sardasht	2.75	2.19	0.68	0.024	6
26	سورشجان	Soresgjan	2.44	1.99	0.72	0.035	4
27	سولگان	Solegan	3.13	2.19	0.55	0.016	9
28	سید محمد	seyed mohammad	2.78	2.50	0.83	0.023	7
29	شاه نجف	Shah najaf	2.75	2.46	0.81	0.001	18
30	شهرکرد	Shahrekord	3.12	2.65	0.74	0	22
31	شیخ شبان	Sheikh shaban	2.72	2.68	0.92	-0.047	40
32	صمصامی	Samsami	3	2.71	0.79	-0.036	37
33	عباس آباد	Abasabad	2.28	1.59	0.55	0.024	5
34	عزیزآباد	Azizabad	2.74	2.64	0.93	-0.001	24
35	فارسان	Farsan	3.13	2.40	0.62	0.001	16
36	قلعه تک	Ghaletak	3.05	2.82	0.86	-0.005	29
37	کردشامی	Kordshami	3.14	2.74	0.77	-0.002	25

ادامه جدول ۲- مقادیر برخی شاخص‌های آنتروپی و رتبه‌بندی ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی در منطقه بر اساس شاخص Ni

Continuation of Table 2- Values of some entropy indices and ranking of rain gauge stations related to the Meteorological Organization in the area based on the Ni index

رتبه Rank	Ni	ITI	T(x,y)	H(x)	نام ایستگاه Station name	شماره ایستگاه Station number
39	-0.038	0.73	2.57	2.98	Gandoman	گندمان 38
26	-0.002	0.76	2.66	3.08	Lordegan	لردگان 39
15	0.005	0.64	2.38	3.04	Lirabi	لیرابی 40
12	0.014	0.60	2.29	3.09	Malkhalifeh	مالخلیفه 41
26	-0.027	0.68	2.39	2.90	Marghmalek	مرغملک 42
34	-0.019	0.73	2.60	3.06	monj	منج 43
32	-0.016	0.56	2.11	2.92	Miheh	می‌هه 44
28	-0.004	0.70	2.57	3.11	Hirgan	هیرگان 46



شکل ۳- نقشه درون‌یابی بارش و خطای آن مربوط به ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری در سال ۱۳۸۶

Figure 3- Rainfall interpolation map and its error related to rain gauge stations in Chaharmahal and Bakhtiari province in 2007

تحلیل نتایج روش زمین‌آمار

به دلیل زیاد بودن تعداد نقشه‌های تولید شده در این پژوهش، به عنوان نمونه، نقشه‌های درون‌یابی بارش سال ۱۳۸۶ و خطای آن در شکل (۳) ارائه شده است. از منظر پراکنش مکانی بیشترین مقدار بارش در سال ۱۳۸۶ در بخش شمال غربی استان (بخش‌های کوهستانی) با مقدار ۹۰۸/۳۳ میلی‌متر و کمترین مقدار در بخش شرقی استان (نواحی مسطح و دشتی) با مقدار ۵۵/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین کمترین مقدار خطا در محل باران‌سنج‌ها و نواحی نزدیک به آن‌هاست و بیشترین مقدار خطا در قسمت‌هایی است که هیچ ایستگاه باران‌سنجی وجود ندارد (شمال غربی استان چهارمحال و بختیاری).

مقادیر خطای نقشه‌های درون‌یابی بارندگی سالانه در حالت بدون حذف هیچ ایستگاه و حذف تک ایستگاه در جدول ۳ ارائه شده است. یک بار بدون حذف هیچ ایستگاهی خطای درون‌یابی کریجینگ برای داده‌های بارش در هر سال محاسبه شده، سپس در هر مرحله فقط یک ایستگاه حذف شده و با محاسبه خطا، سهم هر ایستگاه در افزایش یا کاهش خطا نسبت به حالت بدون حذف ایستگاه تعیین می‌شود. به عنوان مثال در مورد ردیف دوم جدول ایستگاه‌های ۱ و ۲۰ باهم حذف نمی‌شوند بلکه یک بار ایستگاه ۱ حذف و مقادیر خطا در نقشه‌های سالانه محاسبه می‌گردد و بار دیگر ایستگاه ۲۰ و به دلیل یکسان بودن نتایج برخی از ایستگاه‌ها با هم در یک ردیف مشخص شده‌اند.

جدول ۳- مقادیر خطای نقشه‌های درون‌یابی بارش سالانه ایستگاه‌های باران‌سنجی

Table 3- Error values after interpolating the spatial distribution of annual rainfall data

حذف ایستگاه Remove station	2000- 2001	2002	2003- 2004	2005- 2006	2007	2008	2009	2010- 2014	2015- 2016
1, 20	-	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64
2	0.63	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.59	0.61	0.64
3	0.67	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.64	0.64	-
4, 5, 6, 12, 19, 23, 24, 27, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 42, 45, 46	0.63	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
7	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.64
8, 10, 13, 15, 17, 18, 21, 22, 25, 28, 29 , 34	-	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.61
9, 30	0.64	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.64
11	0.63	0.62	0.62	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
41	0.64	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	0.64
16	-	0.62	0.61	0.61	-	-	0.61	0.61	0.65
26	-	0.61	0.61	0.61	0.62	0.62	0.61	0.61	-
33	-	-	-	0.61	0.61	0.62	0.61	0.61	0.64
14, 39, 40, 43, 44	0.63	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64
بدون حذف No removal	0.63	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.64

آماري ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۵ تهیه شدند. مزیت نقشه خطا، شناسایی مناطق با خطای زیاد است که بعد از بازدیدهای صحرایی و بررسی منطقه از نظر شیب، کاربری و توپوگرافی اقدامات لازم جهت نصب باران‌سنج جدید صورت گیرد. همان‌طور که نتایج نشان داد با توجه به وسعت منطقه و در نظر گرفتن درصد اشتباه مجاز ۵ درصد ایستگاه‌های این منطقه کافی نیستند لذا حذف هیچ ایستگاهی توصیه نمی‌شود، هرچند برخی ایستگاه‌ها در فرآیند حذف و محاسبه خطای کریجینگ نشان دادند که سهم قابل توجهی در افزایش خطا ندارند. در مورد اضافه نمودن ایستگاه‌های اضافی با توجه به اینکه ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی دیگر موردنیاز است، توصیه می‌شود با توجه به نقشه‌های خطا و پس از بازدید صحرایی برای بررسی شرایط منطقه از نظر توپوگرافی و استانداردهای فنی این امر صورت گیرد. بهتر است در درجه اول ایستگاه‌هایی در قسمت شمال غربی (مناطق دارای بیشترین خطای درون‌یابی) در اولویت قرار داده شود. در درجه بعد در بخش‌هایی از شمال شرقی، شرق، جنوب شرقی، غرب و جنوب غربی که فاقد ایستگاه‌های باران‌سنجی هستند، اقدام به احداث ایستگاه‌های باران‌سنجی اضافی گردد. در مناطق با تراکم کم ایستگاه‌ها اهمیت قابل توجهی دارند مانند ایستگاه آب ترکی (واقع در شمال غرب استان چهارمحال و بختیاری)، لذا در درجه اول این ایستگاه و پس از آن ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز در شبکه باران‌سنجی اهمیت بالایی دارند. ایستگاه‌های چمن‌گلی و بن را نیز با توجه به تراکم ایستگاه‌ها در منطقه و نقشه‌های خطا می‌توان جزو ایستگاه‌های مؤثر در خطا در نظر گرفت. به‌طور مشابه نتایج روش تئوری آنتروپی نیز در

البته برخی ایستگاه‌ها در برخی سال‌ها داده ندارند که با خط تیره مشخص شده‌اند و ایستگاه‌های فاقد داده در این سال‌ها در مقدار خطا اثر می‌گذارند، زیرا نداشتن داده به منزله نبود ایستگاه است. به‌منظور نمایش ساده‌تر نتایج، بیشترین افزایش خطا با رنگ سبز، افزایش خطا با رنگ آبی و کاهش خطا با رنگ قرمز مشخص شده است. در سال ۱۳۸۸ با حذف ایستگاه ارمند مقدار خطا ۰/۰۲ کاهش یافته است. در حالت کلی با حذف ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز میانگین خطای نقشه‌های درون‌یابی بارندگی نسبت به حالتی که هیچ ایستگاهی حذف نشده، به میزان ۰/۰۱ و با حذف ایستگاه آب ترکی به مقدار ۰/۰۳ و در سال‌هایی که بعضی ایستگاه‌ها فاقد داده هستند به مقدار ۰/۰۴ افزایش یافته است. بنابراین، در درجه اول ایستگاه آب ترکی و سپس ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن و بارز از اهمیت بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها برخوردارند. طبق شکل ۱ ایستگاه آب ترکی در شمال غرب منطقه مورد مطالعه که کمبود ایستگاه وجود دارد، واقع شده است لذا این ایستگاه در شبکه باران‌سنجی باید حفظ گردد.

نتیجه‌گیری

استان چهارمحال و بختیاری منطقه‌ای کوهستانی است که در این مناطق تراکم شبکه باران‌سنجی بیشتری مورد انتظار است. در این مطالعه، به روش مقایسه‌ای شبکه باران‌سنجی ایستگاه‌های وزارت نیرو در این استان با استفاده از روش‌های زمین‌آمار مبتنی بر کریجینگ و تئوری آنتروپی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور نقشه‌های بارش سالانه و خطای کریجینگ در این استان طی دوره

شهیدی و همکاران (۳۰) نیز جهت بررسی و پایش شبکه باران‌سنجی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص اطلاعات خالص تبدیلی، ایستگاه‌های با ارزش و انتقال و دریافت اطلاعات بیشتر مشخص شدند. کاربرد نتایج مطالعه حاضر به‌منظور برنامه‌ریزی صحیح و مدیریت منابع آب توسط سازمان‌های ذی‌ربط مانند وزارت نیرو، سازمان هواشناسی و ... می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آتی از سایر روش‌های زمین آمار در ترکیب با روش‌های دیگر به‌منظور افزایش دقت و ترکیب ایستگاه‌های باران‌سنجی متعلق به سازمان هواشناسی و وزرات نیرو استفاده گردد.

سپاسگزاری

بدینوسیله از شرکت سهامی آب منطقه‌ای، اداره کل هواشناسی استان چهارمحال و بختیاری جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات، هماهنگی پروژه سرکار خانم زهرا اسلامی تشکر می‌گردد.

ارزیابی شبکه باران‌سنجی مؤثر بود. به‌طوری که با محاسبه شاخص رتبه‌بندی، مشخص شد که ایستگاه‌های بارده، بره مرده و دزک‌آباد بیشترین انتقال اطلاعات بارندگی را داشتند، لذا ارزش حفظ بیشتری نسبت به ایستگاه‌های دیگر داشتند. نتایج این مطالعه در گزارش توانایی روش‌های زمین‌آمار و آنتروپی به‌منظور ارزیابی وضعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی و بررسی ارزش و اهمیت هر یک از ایستگاه‌ها با نتایج برخی مطالعات همخوانی دارد. از جمله مطالعه چن و همکاران (۹) که با ترکیب روش کریجینگ و آنتروپی، تعداد و توزیع مکانی بهینه ایستگاه‌های باران‌سنجی در شمال تایوان را تعیین و با محاسبه آنتروپی انتقال اطلاعات و آنتروپی مشترک درجه اهمیت ایستگاه‌ها را مشخص نمودند. همچنین مطالعه خلیفه (۱۶) در ارزیابی شبکه باران‌سنجی حوزه آبخیز زهره فارس که با در نظر گرفتن شاخص‌های آنتروپی مرزی، مشترک، اطلاعات ارسال شده و دریافت شده توسط هر ایستگاه و شاخص انتقال اطلاعات و در نهایت با رتبه‌بندی، ایستگاه‌های دارای اهمیت بیشتر تعیین شدند. در مطالعه

منابع

- 1- Adhikary S.K., Yilmaz A.G., and Muttil N. 2015. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes* 29(11): 2582-2599.
- 2- Alizadeh A. 2015. *Applied Hydrology*. Astan Quds Razavi Publication, Mashhad. (In Persian)
- 3- Asadi A., and Jalali M. 2016. Review and Evaluation of Geostatistical Method of Kriging in the spatial distribution precipitation (Case Study: North West of Iran). *Geographic Space* 15(52): 187-204. (In Persian)
- 4- Barca E., Passarella G., and Uricchio V. 2008. Optimal extension of the raingauge monitoring network of the Apulian regional consortium for cropprotection. *Environmental Monitoring and Assessment* 145: 375-386.
- 5- Bechler A., Vrac M., and Bel L. 2015. A spatial hybrid approach for downscaling of extreme precipitation fields. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(10): 4534-4550.
- 6- Biau G., Zorita E., Von Storch H., and Wackernagel H. 2010. Estimation of precipitation bykriging in the EOF space of the Sea level pressure field. *Journal of Climate* 12(12): 1070-1085.
- 7- Chaharmahal-Bakhtiari Meteorological Administration. Available at <http://www.chbmet.ir> (visited 27 September 2021).
- 8- Chebbi A., Bargaoui Z.K., and Cunha M.D.C. 2011. Optimal extension of raingauge monitoring network for rainfall intensity and erosivity index interpolation. *Journal of Hydrologic Engineering* 16: 665-676.
- 9- Chen Y.C., Wei C., and Yeh H.C. 2008. Rainfall network design using kriging and entropy. *Hydrological Processes* 22: 340-346.
- 10- Cheng K.S., Lin Y.C., and Liou J.J. 2008. Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes* 22: 2554-2564.
- 11- Jessop A. 1995. *Informed Assessments, an Introduction to Information, Entropy and Statistics*. Ellis Horwoo, New York.
- 12- Karimi Hosseini A., Bozorg Haddad O., Hoorfar A.H., and Ebrahimi K. 2010. Rainfall Network Design Using Entropy Approach. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 4(11): 1-12. (In Persian with English abstract)
- 13- Kasaei Roodsari B., Ghahreman B., and Sharifi M.B. 2010. Study of rain-gauge network density using geostatistical methods (Case study: Northern, Eastern and Razavi Khorasan Provinces). *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering* 4(10): 35-44. (In Persian with English abstract)
- 14- Kassim A.H.M., and Kottegoda N.T. 1991. Rainfall network design through comparative kriging methods. *Hydrological Sciences Journal* 36: 223-240.
- 15- Kawachi T., Maruyama T., and Singh V.P. 2001. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology* 246: 36-44.
- 16- Khalifeh S. 2014. Evaluation of monitoring network density using discrete entropy theory. *Journal of Water Science Engineering* 4(10): 19-36. (In Persian)
- 17- Kilibarda M., Hengl T., Heuvelink G.B.M., Graler B., Pebesma E., Percec Tadic M., and Bajat B. 2014. Spatio-

- temporal interpolation of daily temperatures for global landareas at 1 km resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(5): 2294-2313.
- 18- Manz B., Buytaert W., Zulkafli Z., Lavado W., Willems B., Robles L.A., and Rodriguez-Sanchez J.P. 2016. High-resolution satellite-gauge merged precipitation climatologies of the Tropical Andes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(3): 1190-1207.
- 19- Markus M., Knapp H.V., and Tasker G.D. 2003. Entropy and generalized least square methods in assessment of the regional value of stream gages. *Journal of Hydrology* 283: 107-121.
- 20- Marofi S., Golmohammadi G., Mohammadi K., and Zare Abyaneh H. 2010. Evaluation of Geostatistical Methods for Estimating Spatial Distribution of Annual Rainfall Using GIS. *Water and Soil Science* 19.1(2): 147-164. (In Persian)
- 21- Mishra A.K., and Coulibaly P. 2009. Developments in hydrometric network design: a review. *Reviews of Geophysics* 47(2): 2415-2440.
- 22- Mishra A.K., and Coulibaly P. 2010. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology* 380: 420-437.
- 23- Mogheir Y., and Singh V.P. 2003. Specification of information needs for groundwater management planning in developing country. *Groundwater Hydrology*. Balema Publisher, Tokyo.
- 24- Moss M.E. and Tasker G.D. 1991. An intercomparison of hydrological network-design technologies. *Hydrological Sciences Journal* 36(3): 209-221.
- 25- Nazeri Tehrani M., and Ramazani Y. 2018. River drought analysis using time series. Birjand University Press, Birjand. (In Persian)
- 26- Papamichail D.M., and Metaxa I.G. 1996. Geostatistical analysis of spatial variability of rainfall and optimal design of rain gauge network. *Water Resources Management* 10: 107-127.
- 27- Pardo-Iguzquiza E. 1998. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology* 210: 206-220.
- 28- Ramazani Y., Pourreza-Bilondi M., Yaghoobzadeh M., and Nazeri Tahrudi M. 2018. Qualitative Monitoring of Drinking Water Using Entropy Indices (Case Study: Central Aquifer of Birjand Plain). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 12(3): 556-568. (In Persian with English abstract)
- 29- Shaghaghian M.R., and Abedini M.J. 2013. Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques. *Scientia Iranica* 20(2): 259-269.
- 30- Shahidi A., Khashei Siuki A., Ramazani Y., and Nazeri-Tahrudi M. 2019. Designing Monitoring Network for Rain Gauge Stations Using Irregularity Theory (Case Study: Urmia Lake Basin). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 2(13): 296-308. (In Persian with English abstract)
- 31- Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
- 32- Singh V.P. 2013. Entropy theory and its application in environmental and water engineering. John Wiley and Sons, Hoboken. New Jersey.
- 33- Tsintikidis D., Georgakakos K.P., Sperflage J.A., Smith D.E., and Carpenter T.M. 2002. Precipitation uncertainty and rain gauge network design within Folsom Lakewatershed. *Journal of Hydrologic Engineering* 7: 175-184.
- 34- Valipour E., Ghorbani M.A., and Asadi E. 2020. Rainfall Network Optimization using Information Entropy and Fire Fly Algorithm Case Study: East Basin of Urmia Lake. *Journal of Watershed Management Research* 11(21): 11-23. (In Persian with English abstract)
- 35- Xu P., Wang D., Singh V.P., Wang Y., Wu J., Wang L., Zou X., Liu J., Zou Y., and He R. 2018. A kriging and entropy-based approach to rain gauge network design. *Environmental Research* 161: 61-75.
- 36- Yeh H.C., Chen Y.C., Wei C., and Chen R.H. 2011. Entropy and kriging approach to rainfall network design. *Paddy and Water Environment* 9(3): 343-355.
- 37- Yue S., Pilon P., and Cavadias G. 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology* 259: 254-271.
- 38- Zandkarimi A., Mokhtari D., and Zandkarimi S. 2018. The spatial analysis and optimization of rain gauging station network in Kurdistan Province using the Kriging Error Variance. *Geographical Data* 27(105): 115-126. (In Persian)
- 39- Zarei A., Asadi E., Ebrahimi A., Jafari M., Malekian A., Mohammadi Nasrabad H., Chemura A., Maskell G. 2020. Prediction of future grassland vegetation cover fluctuation under climate change scenarios. *Ecol. Indic.* 119, 106858.



Evaluation of Chaharmahal va Bakhtiari Rain Gauge Stations Network Using Kriging and Entropy

S. Bayati¹- K. Abdollahi^{2*}

Received: 08-09-2021

Accepted: 08-10-2021

Introduction: Rainfall data are required for planning, designing, developing and managing water resources projects as well as hydrological studies. Some previous studies have suggested increasing the density of the rain gauge network to reduce the estimation error. However, more operational stations require more installation costs and monitoring. Some common techniques including statistical methods, spatial interpolation, information-based theory and combination are used to evaluate and design the network. Chaharmahal va Bakhtiari province is a mountainous region; hence, a denser rainfall network is expected in this mountainous environment. The aim of this study was to evaluate the condition of rain gauge stations in Chaharmahal va Bakhtiari province using two approaches, i.e. geostatistical methods and entropy theory.

Materials and Methods: The main required data set for this study is a time series of rainfall data. These data were collected on a daily scale from the Regional Water Company of Chaharmahal va Bakhtiari. After performing statistical tests, the annual data series was prepared for 46 rain gauge stations. A statistical period of 2000 to 2016 was used. The homogeneity of data was investigated by double mass test and histogram drawing methods using Excel and SPSS software, and the existence of trend in the time series of data was investigated by applying a Spearman test. Then, the adequacy of rain gauges in the gauging network was investigated. Annual rainfall interpolation maps and their standard error maps were prepared using the kriging method. Contribution of each station in reducing or increasing the error in the rain gauge network was investigated by removing each station in a cross validation procedure. The efficiency of the rain gauge network was evaluated using the concept of discrete entropy and the values of entropy indices. The value of keeping the rain gauge stations was determined using the net exchange information index.

Results and Discussion: There was no homogeneity problem and significant trend in the data series. Considering the permissible error percentage of 5%, there is a need to add 15 new rain gauge stations to the network. To apply the geostatistical method, we applied it once without deleting any station; then, the kriging interpolation error was calculated for the precipitation data. Then, only one station was removed at each stage, and both the error and the contribution of each station in increasing or decreasing the error compared to the case without Station deletion were obtained. The results indicated that Ab-Turki, Shahrekord, Borujen and Barez stations were more important than other stations. Two stations namely Chaman-Goli and Ben stations can also be considered as the influential stations in error due to the density of stations in the region and error maps. Similarly, the results of the entropy theory method were found effective in evaluating the design of the rain gauge network. The highest value of $H(x)$ was observed in the data of Armand station (3.26) and the lowest value was observed in Abbasabad station (2.28). Since $H(x)$ shows the uncertainty of measuring data, the maximum and minimum uncertainty were found for Armand and Abbasabad sites, respectively. Based on the Net Exchange Information Index, Bardeh, Bareh Mardeh and Dezkabad stations were ranked 1 to 3, respectively, indicating that they transmit and receive more information than other stations. On the other hand, a number of stations including Dorak anari, Abtorki and Chelo stations had the lowest values.

Conclusion: Due to the vast extent of the area and also considering the permissible error percentage of 5%, the number of the stations in this area was found to be insufficient. Thus, although calculating the kriging error maps showed that some stations do not have a significant share in increasing the error, removing the stations is not recommendable. Regarding the new stations, new 15 rain gauge stations are needed to check out the error maps. According to the field observations, the higher priority should be given to the northwestern area (which

1 and 2- Ph.D. Student and Assistant Professor, Department of Natural Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Shahrekord, respectively.

(*- Coressponding Author Email: kabdolla@sku.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2021.72310.1086

had the largest interpolation error) in the first place. For the regions with lower error, such as northeast, east, southeast, west and southwest that do not have rain gauge stations, additional rain gauge stations should be constructed.

Keywords: Annual rainfall, Geostatistical, Information transfer, Interpolation, Rain gauge network

Contents

Assessment the Effective Factors on Production and Transportation of Suspended Sediments using Gamma Test and PCA Techniques	625
A. Mosaedi – E. Ramezanipour -M. Mesdaq – M. Tajbakhshian	
Simulation of Growth and Development of Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) under Drought Stress: - Simulation of Water Productivity, Above Ground Biomass and Yield	643
E. Farrokhi - M. Nassiri Mahallati- A. Koocheki- S.A. Beheshti	
Investigating the Source and Factors Affecting Sulfate Concentration and Isotopic (δS and $\delta^{18}O$) Variations in Water Resources of Sarpol-e Zahab Region	658
H. Mohammadzadeh - M. Bonyabadi- F. Jangjoo	
The Effect of Different Probability Levels in Estimating the Net Water Requirement of Rice in the Northern Provinces of Iran	671
E. Asadi Oskoue – S. Kouzegaran - M.R. Yazdani - A. Rahmani	
Investigation of the Role of Sand- Geotextile-Zeolite Composite Filters on some Wastewater Properties	687
H. Shirvani Ichi - M. Ghobadinia - N. Nourmahnad- S.H. Tabatabaei	
Effect of Bio-Nutrition and Seed Priming on Growth and Yield of Chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.) Kaboli Type	701
H. Auobi - J. Nabati - A. Nezami - M. Kafi	
Application of FAO Agro-ecological Model for Locating Areas Prone to Pistachio Cultivation in East Azerbaijan Province	717
A. Farajnia - K. Moravej- P. Alamdari- M. Eslahi	
Modeling the Vertical Soil Calcium Carbonate Equivalent Variation by Machine Learning Algorithms in Qazvin Plain	734
S.R. Mousavi - F. Sarmadian - M. Omid - P. Bogaert	
Investigating the Effect of Heat Waves on the Intensification of Thermal Islands in Sanandaj City From 1989 to 2008	747
R. Maleki Meresht - B. Sobhani - M. Moradi	
Evaluation of Chaharmahal va Bakhtiari Rain Gauge Stations Network Using Kriging and Entropy	761
S. Bayati - K. Abdollahi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 35

No. 5

2021

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
Khorassani, R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabriz University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).