



عنوان مقالات

- شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) در شرایط تنش خشکی:
۱- محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوبی ۳۹۹
اسماعیل فرخی- مهدی نصیری محلاتی- علیرضا کوچکی- سید علیرضا بهشتی
- برآورد حداقل جریان آب زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه کارون در بالادست و پایین‌دست سد بهشت‌آباد ۳۱۹
فاطمه حیات غیبی- ناصر شاهنوشی- بیژن قهرمان- حسین صمدی بروجنی- محمد قربانی- محمود صبوخی صابونی
- بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری ۳۳۵
رضا سعیدی
- بهینه‌سازی الگوی کشت در راستای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و DE ۳۴۹
مهدی کاماسی- امیر علیزاده فرد
- تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش ۳۶۵
حمزه سعیدیان- حمید رضا مرادی
- مطالعه ژنتیکی و میکرومورفولوژی خاک‌های واقع بر سطوح مختلف ژئومورفیک در پلایای جازموریان ۳۷۹
صالح سنجری- محمدهادی فرپور- مجید محمودآبادی- سعید برخوری
- تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد و تهیه جدول نیازهای رویشی پرتقال در مناطق انتخابی کشور ایران ۳۹۵
علی زین الدینی- میرناصر نویدی- علی اسدی کنگرشاهی- مهناز اسکندری- سیدعلیرضا سیدجلالی- آناهید سلمان‌پور- جواد سیدمحمدی- مالک قاسمی- سید علی غفاری نژاد- غلامرضا زارعیان
- تأثیر شکست سری زمانی داده‌های بارش بر تغییرات مشخصه‌های خشکسالی (مطالعه موردی شهرهای تبریز و اراک) ۴۰۹
منصوره غزنوی- ابوالفضل مساعدی- محمد قبانی سوق
- مدل‌سازی میانگین رطوبت نسبی هوای طلوع تا غروب با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف در ایران ۴۲۷
پناه میرکاماندار- حسین ثنائی نژاد- حجت رضایی پزند- محبوبه فرزندی
- شناسایی رژیم بارش ناحیه خزری ۴۴۵
حسین عساکره- نسرين ورناسری قندعلی

Contents

- Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: 1- Simulation of Soil Water Content, Evapotranspiration, and Green Canopy Cover 318
E. Farrokhi - M. Nassiri Mahallati- A. Koocheki- S.A. Beheshti
- Environmental Flow Assessment of Karun River in Upstream and Downstream of Beheshtabad Dam 333
F. Hayatgheibi - N. Shahnoushi- B. Ghahreman- H. Samadi Borujeni- M. Ghorbani- M. Sabouhi Sabouni
- Investigation of the Intra-Seasonal Sensitivity of Maize Evapotranspiration to Water Stress, at Different Irrigation Levels 348
R. Saeidi
- Optimization of Cropping Pattern through Groundwater Resources Management Using DE and PSO Algorithms 364
M. Komasi - A. Alizadefard
- Sediment Estimation Using Different Erosion Components 378
H. Saeidiyan - H.R. Moradi
- Genesis and Micromorphology of Soils Located on Different Geomorphic Surfaces in the Jazmoorian Playa 394
S. Sanjari - M.H. Farpoor- M. Mahmoodabadi- S. Barkhori
- Effect of Soil Characteristics on Yield and Preparing the Crop Requirements Table of Oranges in Selected Areas of Iran 407
A. Zeinadini - M.N. Navidi- A. Asadi Kangarshahi- M. Eskandar- S.A. Seyed Jalali- A. Salmanpour- J. Seyedmohammadi- M. Ghasemi- S.A. Ghaffarinejad- Gh. Zareian
- The Impact of Breakpoints in Rainfall Time Series on Drought Characteristics Changes (Case Study: Tabriz and Arak Stations, Iran) 425
M. Gaznavi - A. Mosaedi - M. Ghabaei Sough
- Modeling Average Relative Humidity of Sunrise to Sunset Using Values Measured at Different Hours in Iran 443
B. Mirkamandar - H. Sanacinejad - H. Rezaee-Pazhand- M. Farzandi
- Identifying the Precipitation Regime of the Iranian Coast of Caspian Sea 459
H. Asakereh - N. Varnaseri Ghandali

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 3 مرداد - شهریور 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 ولیزاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)	اوستان، شاهین
استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)	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

- 299 شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی (*Lycopersicon esculentum* Mill.) در شرایط تنش خشکی: - محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی
اسماعیل فرخی - مهدی نصیری محلاتی - علیرضا کوچکی - سید علیرضا بهشتی
- 319 برآورد حداقل جریان آب زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه کارون در بالادست و پایین‌دست سد بهشت‌آباد
فاطمه حیات غیبی - ناصر شاهنوشی - بیژن قهرمان - حسین صمدی بروجنی - محمد قربانی - محمود صبوحی صابونی
- 335 بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری
رضا سعیدی
- 349 بهینه‌سازی الگوی کشت در راستای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و DE
مهدی کماسی - امیر علیزاده فرد
- 365 تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش
حمزه سعیدیان - حمید رضا مرادی
- 379 مطالعه ژنتیکی و میکرومورفولوژی خاک‌های واقع بر سطوح مختلف ژئومورفیک در پلایای جازموریان
صالح سنجرى - محمدهادی فرپور - مجید محمودآبادی - سعید برخوری
- 395 تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد و تهیه جدول نیازهای رویشی پرتقال در مناطق انتخابی کشور ایران
علی زین الدینی - میرناصر نویدی - علی اسدی کنگرشاهی - مهناز اسکندری - سیدعلیرضا سیدجلالی - آناهید سلمان‌پور - جواد سیدمحمدی - مالک قاسمی - سید علی غفاری نژاد - غلامرضا زارعیان
- 409 تأثیر شکست سری زمانی داده‌های بارش بر تغییرات مشخصه‌های خشکسالی (مطالعه موردی شهرهای تبریز و اراک)
منصوره غزنوی - ابوالفضل مساعدی - محمد قبائی سوق
- 427 مدل‌سازی میانگین رطوبت نسبی هوای طلوع تا غروب با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در ساعات مختلف در ایران
بهاره میرکماندار - حسین ثنائی نژاد - حجت رضایی پژند - محبوبه فرزندی
- 445 شناسایی رژیم بارش ناحیه خزری
حسین عساکره - نسرین ورناصری قندعلی



مقاله پژوهشی

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

خشکی: ۱- محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

چکیده

مطالعه حاضر با هدف شبیه‌سازی محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد با استفاده از مدل آکواکراپ در شرایط آب و هوایی مشهد به اجرا درآمد. آزمایش به صورت کرت‌های خردشده در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد در دو سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ اجرا شد. عامل کرت اصلی شامل کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله رویشی و عامل کرت فرعی شامل کم‌آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه در مرحله زایشی بود. مدل آکواکراپ با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده واسنجی و صحت‌سنجی گردید. به طور کلی، محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی با دقت قابل قبولی توسط مدل آکواکراپ صحت‌سنجی شد، با این وجود کارایی مدل با افزایش تنش آب کاهش پیدا کرد. میانگین مربعات خطای نرمال شده بدست آمده برای محتوای آب خاک و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی در همه تیمارهای آبیاری ۱۳/۳۶ و ۱۳/۸۷، ۱۶/۲۵ و ۱۲/۸۷ درصد به ترتیب برای مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بود، که این نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک و پوشش کانوپی در طول دوره رشد گوجه‌فرنگی می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکواکراپ می‌تواند در شرایط تنش آبی در سطح قابل قبولی واسنجی شود و به عنوان ابزاری سودمند برای تصمیمات حمایتی در زمان و میزان آبیاری گوجه‌فرنگی تبدیل شود.

واژه‌های کلیدی: آکواکراپ، کراپ وات، کم‌آبیاری، مدل‌سازی، موازنه آب خاک

مقدمه

در پاسخ به فشارهای رو به رشد به منابع آب محدود در جهان، اقدامی فوری جهت افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی نیاز است (۳۸، ۴۳ و ۳۶) و مقابله با این چالش مستلزم درکی صحیح از واکنش‌های فیزیولوژیک عملکرد گیاه به آب می‌باشد (۴۰). ارتباط بین عملکرد گیاه و تأمین آب براساس توابع تولید تجربی رایج استوار است (۱۰)، این در حالی است که از این توابع در مناطقی به غیر از مناطقی که در آن توسعه یافته‌اند، نمی‌توان با اطمینان استفاده کرد. از این رو، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی واسنجی شده در محدوده وسیعی از شرایط محیطی و مدیریتی به عنوان راه‌حلی

جایگزین برای ارزیابی سریع عملکرد گیاهان در واکنش به محدودیت آب، به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است (۲۱، ۱۸، ۴۸ و ۱۶).

آکواکراپ مدلی است چند گیاهی که عملکرد انواع گیاهان زراعی یکساله را در شرایط مختلف مدیریتی و فیزیولوژیکی در واکنش به محدودیت آب شبیه‌سازی می‌کند (۳۵ و ۴۱). آکواکراپ در مقایسه با سایر مدل‌های گیاهی بوسیله چندین ویژگی منحصر به فرد متمایز می‌شود. اول، برای شبیه‌سازی رشد و گسترش کانوپی از پوشش سبز کانوپی به جای شاخص سطح برگ استفاده می‌کند. مزیت چنین رویکردی این است که خروجی‌های شبیه‌سازی شده مدل به راحتی می‌توانند به کمک مشاهدات چشمی و یا سنجش از دور مستقماً مورد ارزیابی قرار گیرند. مطابق با نتایج برخی مطالعات، شاخص‌های

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: mnassiri@um.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

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

DOI: [10.22067/jsw.2021.15011.0](https://doi.org/10.22067/jsw.2021.15011.0)

۱۸/۴۵ و ۲۶/۶ درصد بود.

صحت مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاهان مختلف در محیط‌های متفاوت توسط محققان سراسر جهان تأیید شده است (ع، ۵۰ و ۴۰). اگرچه از زمان توسعه مدل آکوواکراپ مطالعاتی در زمینه ارزیابی کارکرد مدل در شبیه‌سازی اثر کم آبیاری بر محصولات مختلف انجام گرفته است ولی تمرکز بر این نکته که مدل نسبت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد چه واکنشی دارد، تحقیقات جامعی صورت نگرفته است. با وجودیکه در ایران نیز مطالعاتی بر روی مدل آکوواکراپ انجام گرفته است اما به نظر می‌رسد تاکنون مطالعه‌ای به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی در ایران صورت نگرفته است. اکثر مطالعات انجام گرفته بر روی گوجه‌فرنگی در جهان نیز در مورد گوجه‌فرنگی‌های مخصوص فراوری می‌باشد که ویژگی مهم آن‌ها این است که تنها یک بار آن هم با دستگاه مکانیزه برداشت صورت می‌گیرد. بنابراین لزوم بررسی مدل آکوواکراپ در شرایط آب و هوایی ایران و بر روی گوجه‌فرنگی‌های مصرف تازه که چندین برداشت آن هم به صورت دستی دارند امری ضروری به نظر می‌رسد. بنابراین هدف از مطالعه حاضر، شبیه‌سازی رشد و نمو گوجه‌فرنگی و همچنین پارامترهای مهمی از جمله محتوای رطوبت خاک، تبخیر و تعرق گیاه و پوشش کانوپی در واکنش به شرایط کم آبیاری در مراحل مختلف رشد گیاه در اقلیم مشهد با استفاده از مدل آکوواکراپ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل آکوواکراپ

آکوواکراپ شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی نمی‌کند. در عوض، رشد شاخ و برگ به عنوان پوشش سبز کانوپی^۲ (CC) بیان می‌شود که کسری از سطح خاک است که توسط کانوپی پوشانده شده است. CC بین صفر (قبل از سبزشدن) تا حداکثر میزان خود (CCx) که بسته به نوع محصول و تراکم بوته می‌تواند تا نزدیک به ۱۰۰ درصد باشد، متفاوت است. CC به روش‌های مختلف از جمله الف) با استفاده از تصاویر دیجیتال که در فاصله یک هفته‌ای از توسعه کانوپی بدست آمده است؛ ب) با استفاده از اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (معادله ۱) و ج) با استفاده از نسبت مقادیر اندازه‌گیری شده تشعشع فعال فتوسنتزی (PAR) بالا و پایین کانوپی (معادله ۲) برآورد می‌شود (۱۳). با توجه به نتایج بدست آمده از مطالعات متعدد مبنی بر ثابت نبودن مقدار ضریب خاموشی نور در طول دوره رشد بوته هنگامی که گیاه در معرض تنش آبی قرار دارد، در مطالعه حاضر به منظور برآورد دقیق‌تر CC، از روش سوم (معادله ۲) استفاده شد.

$$CC = 1 - e^{(-k \cdot LAI)} \quad (1)$$

رویشی^۱ بدست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای با پوشش سبز کانوپی همبستگی قوی دارد (۸، ۲۵ و ۲۶). امکان استفاده از چنین شاخص‌هایی (مانند NDVI) سرعت عمل بیشتر را برای واسنجی و صحت‌سنجی خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده مدل آکوواکراپ در مقیاس‌های مکانی وسیع منطقه‌ای فراهم می‌آورد (۲۸). دوم، آکوواکراپ طیف وسیع‌تری از تأثیر تنش آب بر تعرق را نسبت به سایر مدل‌های گیاهی آب محور بررسی می‌کند. به طور خاص، آکوواکراپ تأثیر تنش آب بر تعرق را نه تنها به دلیل بسته شدن روزنه‌ها بلکه به دلیل کاهش در گسترش برگ و پیری زودرس کانوپی نیز مدنظر قرار می‌دهد (۱۷).

آکوواکراپ در مناطق مختلف جهان به منظور بررسی واکنش گیاه به تنش آب (۵، ۲۰ و ۴۴)، ارزیابی افزایش پتانسیل بهره‌وری گیاه از طریق مدیریت مزرعه (۱، ۳۰، ۳۱، ۳۹، ۴۶، ۴۷ و ۵۱)، توسعه برنامه‌های کم آبیاری (۱۹)، بهبود مدیریت آبیاری مزرعه (۱۸)، ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر تولید محصول (۵۱) و توسعه ابزارهای حمایتی تصمیم‌گیری در عملیات زراعی مزرعه (۹) مورد استفاده قرار گرفته است.

مطالعات متعددی با مدل آکوواکراپ در ایران انجام شده است. اندرزبان و همکاران (۴) با بررسی صحت‌سنجی و آزمون مدل آکوواکراپ تحت شرایط کم آبیاری و آبیاری کامل در گندم در شرایط اقلیمی اهواز بیان کردند که مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق محتوی آب خاک ناحیه ریشه، زیست‌توده محصول و عملکرد دانه با جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE) کم‌تر از ۱۰ درصد، بود. توکلی و همکاران (۴۲) با ارزیابی مدل آکوواکراپ برای تولید جو تحت شرایط کم آبیاری و دیم در شرایط اقلیمی لرستان گزارش کردند که مدل با دقت بالا قادر به شبیه‌سازی درصد پوشش کانوپی، محتوی آب خاک و عملکرد دانه بود. احمدی و همکاران (۳) با مدل‌سازی عملکرد و محتوی آب خاک ذرت با مدل آکوواکراپ تحت مدیریت‌های آبیاری مختلف در شرایط آب و هوایی شیراز به این نتیجه رسیدند که دقت مدل در تیمارهای کم آبیاری با شدت متوسط نسبت به تیمارهای با شدت بالا، بهتر بود. بهمنی و اقبالیان (۷) با شبیه‌سازی پاسخ تولید نیشکر به کم آبیاری با استفاده از مدل آکوواکراپ در شرایط اقلیمی خوزستان نتیجه گرفتند که مدل قادر به شبیه‌سازی عملکرد (NRMSE = 1.89%) و بهره‌وری آب (NRMSE = 1.44%) با دقت بالا بود. پیرمادیان و دعوت‌گر (۳۴) با شبیه‌سازی تأثیرات نوسانات اقلیمی بر آب آبیاری مورد نیاز برنج با استفاده از مدل آکوواکراپ در شرایط آب و هوایی گیلان گزارش دادند که مدل قادر به شبیه‌سازی پوشش کانوپی، زیست‌توده، تبخیر و تعرق برنج و نفوذ عمقی به ترتیب با جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده ۸/۸، ۷/۰، ۸/۸،

زودرس در برگ‌ها شود. اثر تنش آب بر پوشش کانوپی توسط ضریب تنش (KS) توصیف می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی رشد و نمو محصول، آکواکراپ به داده‌های آب و هوایی، گیاهی، خاک و روش‌های مدیریتی به عنوان داده‌های ورودی نیاز دارد. روش رایج و توصیه شده برای تعیین پارامترها در مدل‌های شبیه‌سازی، برآورد در طی الیبراسیون است. این روش در مورد مدل اکواکراپ نیز توصیه شده و در مطالعات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (۲۴ و ۳۵). لازم به ذکر است که روش برآورد پارامترها در این پژوهش نیز قبلاً توسط فرخی و همکاران (۱۴) توضیح داده شده است.

محل اجرای آزمایش

پژوهشی مزرعه‌ای در دو سال متوالی (۹۶-۱۳۹۵) در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متری از سطح دریا واقع در استان خراسان رضوی اجرا شد. مشهد دارای اقلیم نیمه خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۲۱۸/۹ میلی‌متر می‌باشد، این در حالی است که در طول اجرای این آزمایش بارندگی بسیار ناچیز بود و تنها در اوایل فصل رشد میزان اندکی بارندگی اتفاق افتاد. بارندگی تجمعی در طول فصل رشد در سال اول آزمایش ۲۹/۹ و در سال دوم ۸/۳ میلی‌متر 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 مترمربع کاشته شدند. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۱/۵ متر و فاصله بین نشاءها ۰/۲۵ متر در نظر گرفته شد. به منظور جلوگیری از نشست آب بین کرت‌های تیمارهای مختلف، فاصله بین کرت‌های اصلی ۳ متر، کرت‌های فرعی ۱/۵ متر و تکرارها ۲/۵ متر در نظر گرفته شد.

$$CC = 1 - (PAR_{below}) / (PAR_{above}) \quad (۲)$$

که در این معادلات، k ضریب خاموشی نور، LAI شاخص سطح برگ، PAR_{below} و PAR_{above} به ترتیب مقدار تشعشع فعال فتوسنتزی بالا و پایین کانوپی می‌باشند.

آکواکراپ CC روزانه، در طول توسعه کانوپی و در طول کاهش کانوپی در انتهای فصل رشد را به ترتیب با استفاده از معادلات ۳ تا ۵ محاسبه می‌کند.

$$CC = CC_0 - e^{(CGC.t)} \quad \text{If } CC \leq CC_x/2 \quad (۳)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} e^{(-t CGC)} \quad \text{If } CC > CC_x/2 \quad (۴)$$

$$CC = CC_x \times \{1 - 0.05 \times [e^{\frac{(3.33 CGC)}{CC_x + 2.29} t} - 1]\} \quad (۵)$$

در این معادلات CC_0 پوشش کانوپی اولیه، CGC ضریب رشد کانوپی، CDC ضریب کاهش کانوپی و t تعداد روز بعد از کاشت می‌باشد. پوشش کانوپی در مرحله جوانه زنی (CC_0) بسیار کند است (به طور کلی حدود ۱ درصد). در طول مرحله گسترش کانوپی CC افزایش می‌یابد که با استفاده از ضریب رشد کانوپی توصیف می‌شود (CGC). حداکثر پوشش کانوپی (CC_x) که در اواسط فصل رشد به دست می‌آید، بسته به نوع محصول و تراکم کاشت متفاوت است (به طور کلی حدود ۷۵ تا ۱۰۰ درصد). در اواخر فصل رشد پوشش سبز کانوپی به دلیل پیری شروع به کاهش می‌کند. که این عمل توسط ضریبی به عنوان ضریب کاهش کانوپی توصیف می‌شود.

CC_0 ، CGC، و CC_x زمان لازم برای رسیدن به حداکثر پوشش کانوپی را تعیین می‌کنند. اگر CC_0 و CGC بزرگ باشند، حداکثر پوشش کانوپی (CC_x) زودتر حاصل می‌شود. اگر توسعه رشد محصول با CC_0 کوچکی شروع شود، دوره رسیدن به حداکثر پوشش کانوپی بیشتر خواهد بود. ضریب کاهش کانوپی (CDC) سرعت کاهش کانوپی سبز را در اواخر فصل رشد تعیین می‌کند.

تعرق گیاه از حاصلضرب قدرت تبخیر جو در ضریب گیاهی (K_{cTr}) و با در نظر گرفتن تنش آب (KS) و تنش دما (K_{sTr}) محاسبه می‌شود (معادله ۶).

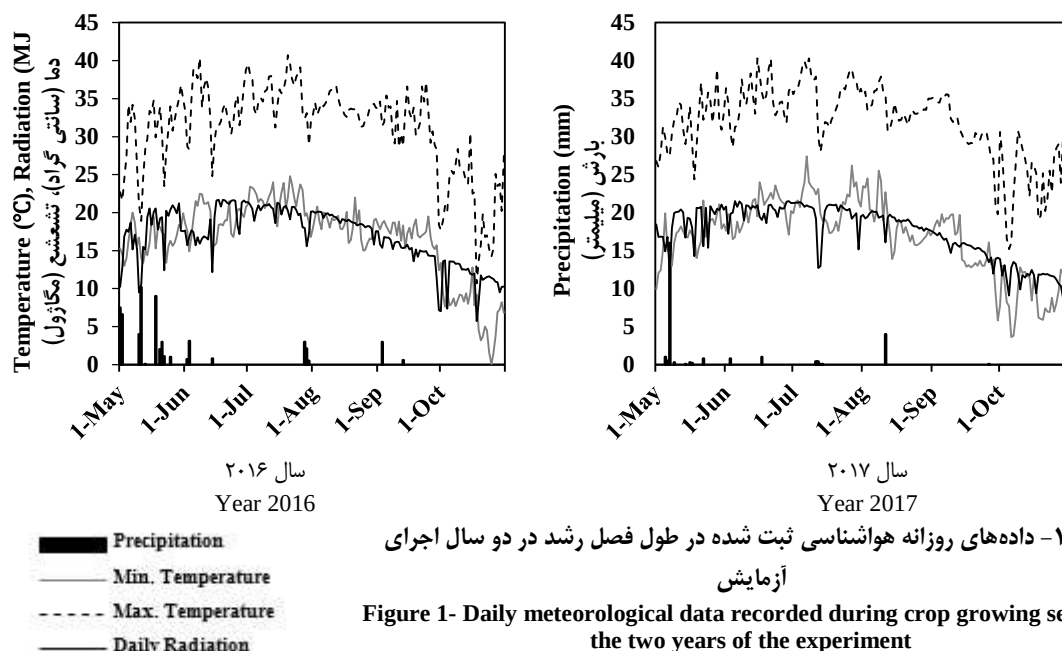
$$Tr = K_s K_{sTr} (K_{cTr,x} CC^*) ET_0 \quad (۶)$$

در این معادله قدرت تبخیر جو (ET_0) بوسیله تبخیر و تعرق گیاه مرجع که توسط معادله پنمن-مونتیث فائو برآورد می‌شود، بیان می‌شود. همچنین CC^* پوشش کانوپی سبز تنظیم‌شده با روند جذب تشعشع روزانه توسط کانوپی و ($K_{cTr,x} CC^*$) ضریب گیاهی می‌باشد. اجرای شبیه‌سازی توسعه کانوپی در شرایط بدون محدودیت و شرایط دارای محدودیت کاملاً متفاوت است. تنش آبی ممکن است بر گسترش برگ‌ها تاثیر بگذارد و حتی ممکن است منجر به پیر شدن

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه محل آزمایش

Table 1- Physical and chemical characteristics of the soil

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



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

Figure 1- Daily meteorological data recorded during crop growing season in the two years of the experiment

قطره ای، مقدار خالص آب مورد نیاز گوجه‌فرنگی در شرایط آب و هوایی مشهد و مزرعه تحقیقاتی دانشگاه فردوسی مشهد، ۸۲۴/۵ میلی‌متر و کل آبیاری ناخالص، ۱۲۰۴/۵ میلی‌متر محاسبه شد. به منظور آبیاری گیاهان از روش آبیاری قطره‌ای استفاده شد.

به منظور برآورد دقیق تر تأثیر تیمارها در آزمایش و ایجاد شرایط یکسان در شروع اعمال همه تیمارها، 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.

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 ارزیابی شدند.

آزمایش به نحوی اجرا شد که اثر کم‌آبیاری 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 می‌باشد. تیمارهای آزمایش در جدول ۲ نشان داده شده است. برای تنظیم حجم آب مورد نیاز در هر نوبت آبیاری از کنتورهای حجمی که در ابتدای محور آبیاری تعبیه شده بودند، استفاده شد. فرض شد که از کاشت تا تشکیل ۱۰ درصد گل‌ها در هر کرت به عنوان مرحله رویشی و از ۱۰ درصد گل‌دهی تا پایان دوره رشد به عنوان مرحله زایشی در نظر گرفته شود.

قبل از اجرای آزمایش، نیاز آبی گیاه گوجه‌فرنگی با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات ۰/۸ محاسبه شد. براساس داده‌های ۳۰ ساله هواشناسی و با در نظر گرفتن راندمان آبیاری ۹۰ درصد در آبیاری

نسبی، ساعت آفتابی، سرعت باد و بارندگی که اصلی‌ترین داده‌های مورد نیاز مدل آکواکراپ می‌باشند در بازه سی‌ساله از ایستگاه هواشناسی مشهد بدست آمد.

داده‌های مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در مدل آکواکراپ 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 آکواکراپ برآورد شدند.

نمونه‌برداری از ۴۵ روز بعد از انتقال^۱ نشاء (DAT) تا ۱۴۵ روز بعد از انتقال نشاء ادامه یافت. به منظور لحاظ اثر حاشیه نمونه‌برداری‌ها از دو ردیف میانی در هر کرت انجام گرفت. 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 با استفاده از دستگاه سپتومتر خطی (AccuPAR-LP80, Decagon Devices, USA) 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.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی شامل حداقل و حداکثر دمای روزانه، رطوبت

جدول ۲- توصیف تیمارهای آزمایش

Table 2- Description of experimental treatments

تیمار (رژیم‌های 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

1- Day After Transplanting (DAT)

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

داده‌های ورودی مدل

در این مطالعه از نسخه ۶/۱ آکوواکراپ (۱۲) 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).

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 (ET_o) می‌باشد. در مطالعه حاضر، مقدار پیش فرض غلظت دی اکسید کربن استفاده شد. پارامترهای گیاهی شامل تراکم کشت، تاریخ کشت، بهره‌وری آب نرمال‌سازی شده برای تبخیر و تعرق مرجع و غلظت دی اکسید کربن 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.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

تمامی داده‌های ورودی مورد نیاز بر اساس داده‌های به دست آمده از فصل کشت اول (۱۳۹۵) وارد مدل شد. پس از وارد کردن داده‌های اولیه شامل داده‌های اقلیمی، خاک، آبیاری و مدیریتی مدل اجرا گردید.

بر اساس خروجی‌های به دست آمده واسنجی مدل برای گیاه گوجه‌فرنگی آغاز شد. مدل ابتدا برای شرایط پتانسیل و بدون محدودیت آب واسنجی شد. سپس از طریق تأثیر ضرایب تنش آب، مدل برای تیمارهای تنش واسنجی شد. مرحله واسنجی با استفاده از روش سعی و خطا تا رسیدن به بهترین توافق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده ادامه پیدا کرد. مقادیر پارامترهای گیاهی نهایی واسنجی شده در جدول ۴ ارائه شده است.

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 اندازه‌گیری شده متناظر در آزمایش مزرعه‌ای مقایسه شد.

تحلیل حساسیت به منظور بررسی حساسیت مدل نسبت به پارامترهای به کار رفته در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعاً انجام تحلیل حساسیت می‌تواند به شناخت دقیق‌تر مدل کمک کند البته در مورد مدل اکواکراپ قبلاً آنالیز حساسیت با حجم زیادی از داده‌ها و با دامنه تغییرات مکانی و زمانی گسترده صورت گرفته و پارامترهای تأثیرگذار و بی‌تأثیر مشخص شده‌اند (۴۷) در نتیجه واسنجی و تعیین پارامترهای مدل با سهولت بیشتری انجام خواهد شد و در مورد پارامترهای بی‌تأثیر استفاده از پیش فرض مدل نتیجه مطلوبی به همراه خواهد داشت.

ارزیابی مدل

ارزیابی مدل، اثبات کارایی مدل به منظور استفاده آتی می‌باشد. به منظور ارزیابی دقت مدل آکوواکراپ در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق ویلموت (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط ۷ تا ۱۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- مقایسه بین مقادیر پیش‌فرض در آکوواکراپ برای گوجه‌فرنگی و مقادیر واسنجی شده در مزرعه آزمایشی

Table 4- Comparison between the default and calibrated parameter values contained in the AquaCrop files for Tomato at field experiment

واحد	پیش فرض	واسنجی شده	پارامتر
Unit	Default	Calibrated	Parameter value
°C	7	8	دمای پایه Base temperature
°C	28	35	حداکثر دما Upper temperature

تراکم گیاه	2.7	3.3	Plant/m ⁻²
Plant density			
ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل در شرایط بدون محدودیت آب (K _{CTr})	1.25	1.10	
Maximum crop transpiration coefficient			
پوشش کانوپی اولیه (CC ₀)	0.53	0.67	%
Initial canopy cover			
ضریب رشد کانوپی (CGC)	10	11.8	%
Canopy growth coefficient			
ضریب کاهش کانوپی (CDC)	0.38	0.40	%
Canopy decline coefficient			
حداکثر پوشش کانوپی (CC _x)	91	0.75	%
Maximum canopy cover			
درجه روز رشد تا استقرار نشاءها	70	43	°C
GDD to recovery after transplanting			
درجه روز رشد تا حداکثر پوشش کانوپی	1503	1009	°C
GDD to maximum canopy cover			
درجه روز رشد تا شروع دوره پیری	2490	1553	°C
GDD to start senescence			
درجه روز رشد تا رسیدگی	2774	1933	°C
GDD to maturity			
درجه روز رشد تا شروع گلدهی	973	525	°C
GDD to start flowering			
طول دوره گلدهی	1657	750	°C
Length of the flowering			
حداکثر عمق مؤثر ریشه	1	1	m
Maximum effective rooting depth			
حداقل عمق مؤثر ریشه	0.25	0.30	m
Minimum effective rooting depth			
بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)	18	18	g/m ⁻²
Normalized water productivity			
شاخص برداشت مرجع (HI ₀)	41	63	%
Reference Harvest index			
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (P _{upper})	0.02	0.15	
Upper threshold for canopy expansion			
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی (P _{lower})	0.30	0.55	
Lower threshold for canopy expansion			
ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش کانوپی گیاه	0.5	3.0	
Shape factor for stress coefficient for canopy expansion			
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها (P _{upper})	0.38	0.50	
Upper threshold for stomal closer			
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها	3.4	3.0	
Shape factor for stress coefficient for stomal closer			
آستانه بالای تنش آبی خاک برای پیری کانوپی (P _{upper})	0.45	0.70	
Upper threshold for canopy senescence			
ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری کانوپی	1.4	3.0	
Shape factor for stress coefficient for canopy senescence			

تمام طول دوره رشد رطوبت در حد ظرفیت زراعی و یا بالاتر قرار داشت. در مواردی که پایین تر از حد ظرفیت زراعی قرار گرفته بود نیز با اجرای آبیاری، مجدداً به حالت قبل برگشت. در اوایل فصل رشد تقریباً در همه تیمارها حتی تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی، رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی مانده بود. دلیل آن می‌تواند جذب کمتر آب به علت عدم توسعه ریشه گیاه باشد. وقتی گیاه شروع به رشد کرد، مقدار جذب آب هم زیادتر شده است، که این روند با افزایش تبخیر و تعرق گیاه مطابقت داشت (شکل نشان داده نشده است). با گذشت زمان و رسیدن به حداکثر پوشش کانوپی، جذب آب از خاک زیادتر شده و رطوبت در خاک پایین تر رفته است. پایین افتادگی رطوبت روندی افزایشی داشته و در اواخر فصل رشد به دلیل کاهش مصرف آب توسط گیاه تا حدودی دوباره از حالت نزولی خارج گردیده است. آخرین آبیاری در ۱۳۵ روز بعد از کاشت انجام شد، بنابراین با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که از این تاریخ تا پایان فصل رشد (۱۴۵ روز بعد از کاشت) رطوبت خاک روندی کاملاً نزولی را طی می‌کند.

با توجه به شاخص‌های آماری محاسبه‌شده براساس مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده درصد محتوای رطوبت خاک در طول دو فصل کشت (جدول ۵)، مدل با جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در محدوده ۸/۴۷ تا ۱۸/۶۵ درصد، کارایی مدل در محدوده ۰/۷۷ تا ۰/۹۶، شاخص توافق در محدوده ۰/۷۶ تا ۰/۹۹، ضریب تبیین در محدوده ۰/۷۹ تا ۰/۹۹، دارای دقت قابل قبولی در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در طول دوره رشد در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در مدیریت‌های مختلف آبیاری بود.

با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ و مقایسه مقادیر مشاهده‌ای، مدل در مرحله صحت‌سنجی از دقت بالایی برخوردار بود. با توجه به مقادیر به دست آمده از محاسبه شاخص خطای نسبی (RE) (جدول ۵)، در مرحله واسنجی در بیشتر تیمارها به جز تیمارهای ۱۰۰۷-۵۰R، ۵۰V-۱۰۰R و ۵۰V-۷۵R مقادیر پیش‌بینی شده محتوای رطوبت خاک از مقادیر واقعی کوچکتر بود. در مرحله صحت‌سنجی در همه تیمارها به جز تیمارهای ۷۵V-۷۵R و ۵۰V-۷۵R تمایل مدل به برآورد کمتر مقادیر شبیه‌سازی شده به مشاهده شده بیشتر بود.

به طور کلی، با مقایسه مقادیر محتوای رطوبت خاک شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده همه تیمارها با NRMSE حدود ۱۳ درصد و R^2 حدود ۹۰ درصد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل توانایی بالایی در پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی داشت (شکل ۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}_i} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i|)^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{(\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

در معادله‌های فوق P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، $\bar{P}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مدل آکووکراپ مقدار پارامتر موردنظر را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل در برآورد پارامتر موردنظر عدد کوچک‌تری به دست داده 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 موازنه آب خاک

آکووکراپ عملکرد قابل حصول گوجه‌فرنگی را به عنوان تابعی از میزان آب مصرفی در شرایط آبیاری مختلف شبیه‌سازی می‌کند. آکووکراپ مدلی آب محور است بنابراین به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول ابتدا رطوبت آب خاک و در ادامه تبخیر و تعرق گیاه را شبیه‌سازی می‌کند.

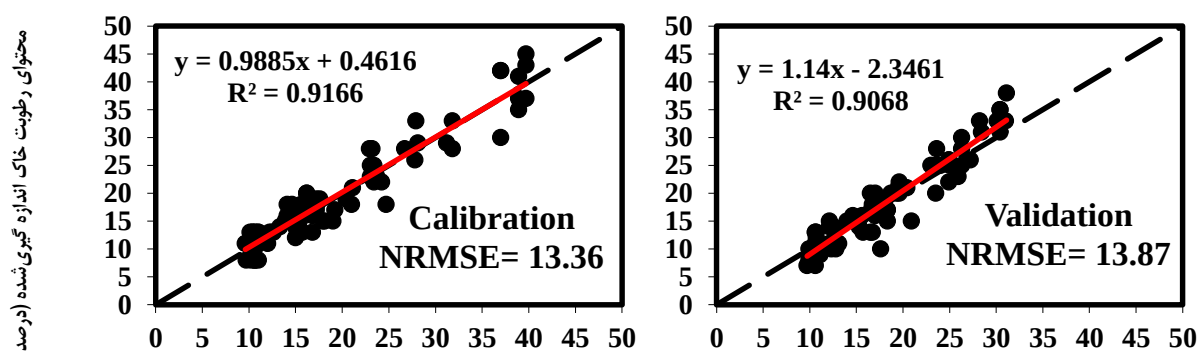
مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده میزان رطوبت خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متری در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی مربوط به مرحله واسنجی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی، محتوای رطوبت آب خاک را در طول فصل رشد گوجه‌فرنگی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری با دقت بسیار خوبی پیش‌بینی کرد (جدول ۵).

روند تغییرات رطوبت در شکل ۳ نشان می‌دهد که نوسان تغییرات رطوبت در عمق بالای خاک زیاد بود. در تیمار آبیاری کامل تقریباً در

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی محتوای رطوبت خاک تا عمق ۱۵ سانتی‌متر در تیمارهای مختلف آبیاری

Table 5- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model in predicting soil water content till 15 cm depth in different irrigation treatments

رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	واسنجی Calibration					صحت سنجی Validation				
	میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	کارایی مدل- سازی	شاخص توافق ویلومت	خطای نسبی	ضریب تبیین	میانگین مربعات خطای نرمال‌شده	کارایی مدل- سازی	شاخص توافق ویلومت	خطای نسبی	ضریب تبیین
	NRMSE	ME	d	RE	R ²	NRMS E	ME	d	RE	R ²
100V-100R	8.47	0.94	0.99	0.80	0.95	11.66	0.86	0.96	-1.37	0.89
100V-75R	11.82	0.93	0.99	3.35	0.97	10.15	0.92	0.99	-6.97	0.98
100V-50R	14.40	0.93	0.98	-4.97	0.95	15.45	0.92	0.97	-6.73	0.99
75V-100R	12.82	0.87	0.97	1.47	0.90	10.21	0.87	0.96	-6.44	0.95
75V-75R	11.27	0.95	0.99	2.89	0.97	13.58	0.89	0.97	4.67	0.97
75V-50R	15.52	0.90	0.98	4.83	0.93	18.65	0.77	0.94	5.43	0.79
50V-100R	15.08	0.87	0.96	-11.7	0.96	16.17	0.87	0.96	-0.88	0.90
50V-75R	17.96	0.90	0.96	-5.43	0.93	10.04	0.91	0.96	-0.47	0.92
50V-50R	17.41	0.96	0.76	0.07	0.91	14.62	0.87	0.96	-0.88	0.90



محتوای رطوبت خاک اندازه‌گیری شده (درصد)
Simulated soil water content (%)

شکل ۲- مقایسه مقادیر محتوای رطوبت خاک مشاهده‌شده و شبیه‌سازی شده همه تیمارها در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی
Figure 2- Comparison between measured and simulated values of soil water content of all water treatments for calibration and validation

نوترونی بعد از فاصله زمانی کوتاه بعد از آبیاری که ممکن است حد بالای محتوای آب خاک را به خوبی قرائت نکند، توضیح داد. نیاکودیا و استروس‌نیجدر (۳۲) مشاهده کردند که مدل آکوواکراپ تمایل به بیش‌برآورد کل رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مقادیر RMSE ۱۱/۵ و ۱۷/۲ و مقادیر EF ۰/۷۸ و ۰/۰۴ داشت. در مطالعه‌ای دیگر، پاردس و همکاران (۳۳) گزارش کردند که آکوواکراپ با وجود دقت بالا در پارامتریزه کردن مدل، قادر به شبیه‌سازی دقیق محتوای آب

شواهد به دست آمده از مطالعات نشان می‌دهد که عملکرد مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی محتوای آب خاک ضعیف است (۳۷). شاو و همکاران (۲۴) گزارش کردند که کل آب خاک شبیه‌سازی شده در طول زمان در مقایسه با داده‌های مشاهده شده کمتر کاهش پیدا کرد، که نتیجه آن بیش‌برآورد مدل با بیش از ۸۰ میلی‌متر در تخمین کل رطوبت خاک بود. آنها همچنین بیان کردند که برخی از آریبی‌ها^۱ را می‌توان با خطاهای تصادفی در اندازه‌گیری‌هایی مانند خواندن میله

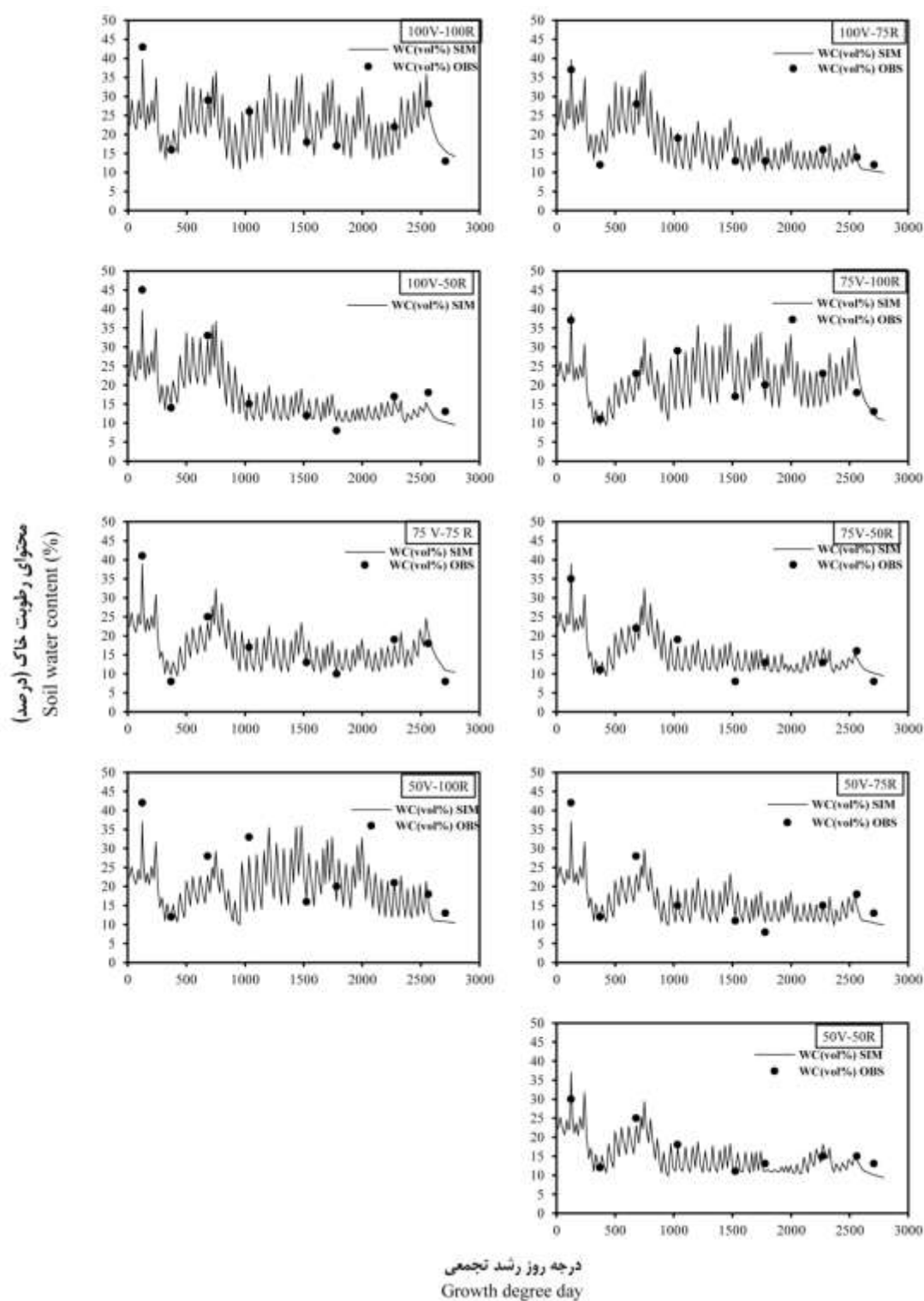
شبیه‌سازی تبخیر (E) و تعرق (Tr)

از آنجایی که زیست‌توده روزانه مستقیماً از بهره‌وری آب واسنجی‌شده و تعرق شبیه‌سازی شده محاسبه می‌شود بنابراین شبیه‌سازی دقیق تبخیر و تعرق واقعی (ET_a) و تقسیم‌بندی آن به تعرق و تبخیر به منظور پیش‌بینی زیست‌توده گیاه بسیار حائز اهمیت است (۱۳). هنگامی که پوشش کانوپی به درستی شبیه‌سازی شود، پارامتریزه کردن تبخیر و تعرق واقعی و زیست‌توده، به تعیین آستانه بسته‌شدن روزنه‌ها ($Threshold\ p\ value$) و شکل آن ($Shape$ factor) محدود می‌شود. در این آزمایش، مناسب‌ترین مقدار آستانه تخلیه رطوبتی خاک (Pupper) برای بسته شدن روزنه‌ها ۰/۳۸ با شکل تابع (f_{shape}) ۳/۴ تعیین شد (جدول ۴). نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه گوجه‌فرنگی در مرحله واسنجی نشان داد که همه تیمارها در طول فصل رشد روند یکسانی دارند، این در حالی است که گیاهانی که میزان آب بیشتری دریافت کرده‌اند تعرق بیشتری نیز داشته‌اند (شکل ۴). زیست توده تولید شده و به طبع آن عملکرد بدست آمده، متناسب با میزان تعرق تجمعی (ΣTr) در طول فصل رشد می باشد (۳۵). بررسی روند ET در دوسال آزمایش نشان داد که در اوایل دوره رشد میزان تبخیر و تعرق در سال اول نسبت به سال دوم بیشتر بوده است، به طوری که واکنش‌های متفاوتی در عملکرد گوجه فرنگی در هر دو سال آزمایش مشاهده شد. تفاوت عملکرد بین دو فصل رشد را می توان با تفاوت در شرایط اقلیمی توضیح داد. بارندگی در طول دوره رشد در سال اول نسبت به سال دوم به خصوص در مرحله رویشی بیشتر بود و سال دوم به طور کلی سال خشک تری بود، بنابراین چنین می توان نتیجه گرفت که افزایش عملکرد در سال اول به خصوص در تیمارهایی که شامل تنش آبی در طول دوره رویشی بودند به دلیل بارندگی بیشتر بوده است (۱۵). میزان تبخیر و تعرق گیاه در طول فصل رشد از ۷۱۶/۶۷ میلی‌متر در تیمار 100V-100R تا ۳۴۲/۸ میلی‌متر در تیمار 50V-50R متغیر بود. هر چند عوامل متعددی بر میزان تبخیر و تعرق همچون سرعت باد و میزان تشعشع تأثیرگذار هستند (۳۷) اما در این آزمایش نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی تبخیر و تعرق بیشتر متأثر از میزان پوشش کانوپی می‌باشد. در واقع تیمارهای با پوشش کانوپی بیشتر، میزان تبخیر و تعرق بیشتری نسبت به تیمارهای با پوشش کانوپی کمتر نشان دادند. ساند‌ها و ایرماک (۳۷) نیز نشان دادند که تیمارهایی که به میزان کمتری آبیاری شده بودند، تبخیر و تعرق کمتری داشتند و دلیل آن را کاهش در میزان پوشش کانوپی گیاه ذرت بیان کردند.

خاک نیست ($R^2 < 0/88$ ، $RMSE < 0/59$ ، $EF < 0/72$) و نمی‌تواند برای اهداف برنامه‌ریزی آبیاری مورد استفاده قرار بگیرد. آنها روندی بیش‌برآورد برای تخمین محتوای رطوبت خاک مشاهده کردند و نتیجه گرفتند که تفکیک نادرست تبخیر و تعرق توسط مدل باعث ایجاد آریبی در تخمین محتوای رطوبت خاک شده است. آنها پیشنهاد کردند که اگر مدل به جای منحنی CC از منحنی ضریب گیاهی کلاسیک برای تنظیم ضریب گیاهی پایه برای تعرق استفاده کند، شبیه‌سازی کل رطوبت خاک بهبود می‌یابد، این محققین نتیجه حاصل از این پیشنهاد را چنین بیان کردند که به جای تغییرات روزانه در محتوای آب خاک، تنها تنش آب در طول دوره رویشی بر منحنی CC تأثیر بگذارد. این پیشنهاد ممکن است در مطالعه حاضر نیز معتبر باشد، زیرا شدت تنش آب بر محتوای رطوبت خاک تأثیرگذار است و کل رطوبت خاک توسط مدل شبیه‌سازی می‌شود. در مقابل علی‌رغم اندکی بیش‌برآوردی، احمدی و همکاران (۳) تخمین‌های خوبی از محتوای آب خاک بدست آوردند.

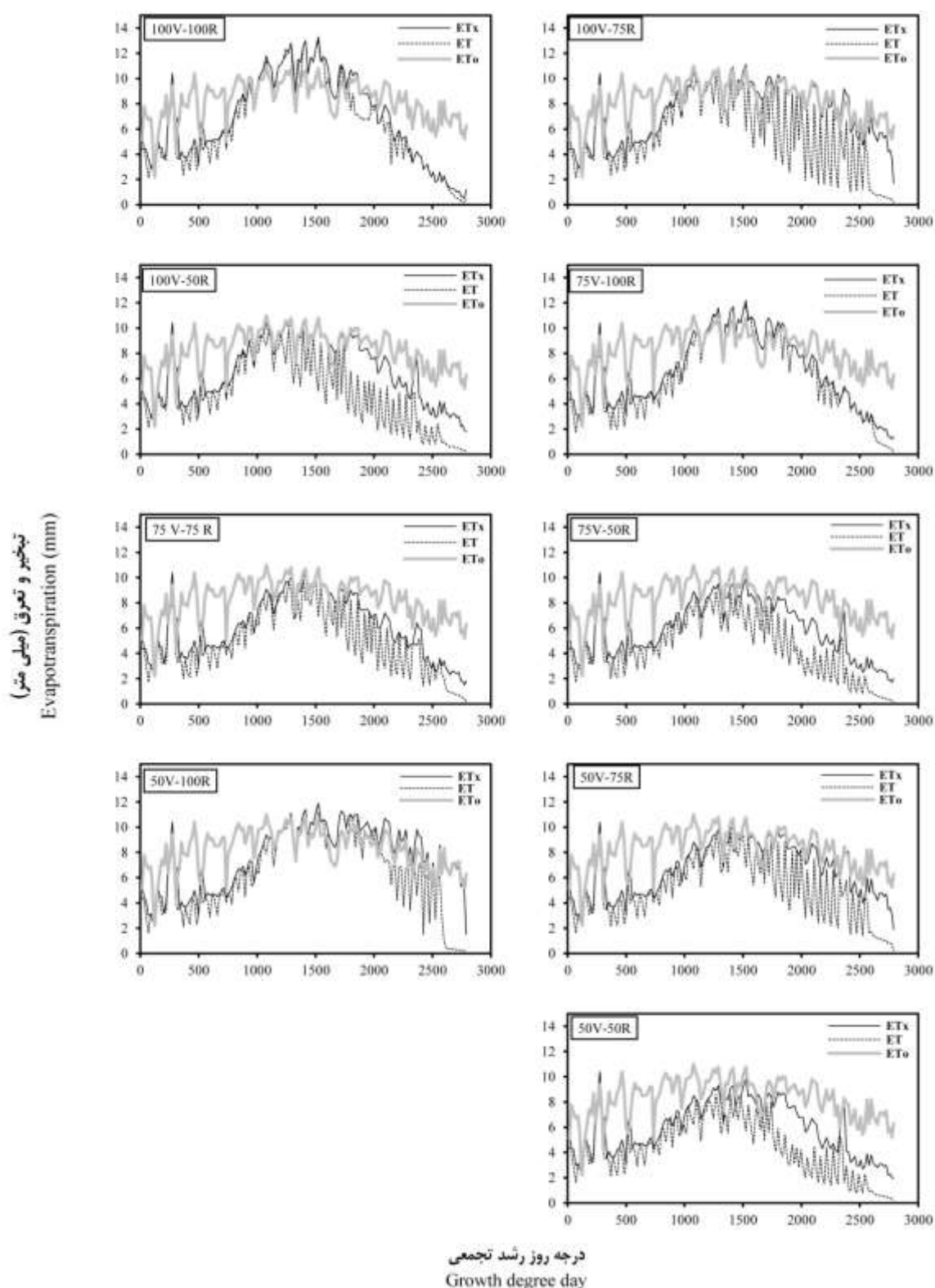
معمولاً حداکثر جذب آب توسط ریشه‌ها از لایه‌های بالایی سطح خاک صورت می‌گیرد (یعنی ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری خاک) و فرض می‌شود که جذب به تدریج با افزایش عمق کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود برای درک مناسب از تراکم

ریشه و الگوی استخراج آب، شبیه‌سازی دقیق محتوای رطوبت خاک در این ناحیه ضروری باشد (۳۷). برای خاک سیلتی لوم (شبیه خاک مزرعه مورد آزمایش در این مطالعه) جامان و ایرماک (۳۷) گزارش کردند که تحت شرایط تنش آبی، جذب آب از لایه‌های عمیق‌تر خاک نیز امکان‌پذیر است. آنها همچنین دریافتند که به طور کلی استخراج آب خاک با افزایش عمق خاک کاهش یافت و جذب آب از لایه بالایی خاک (۰-۳۰ سانتی‌متری) بیشترین سهم را در کل آب استخراج شده در طول فصل رشد به خود اختصاص داد به گونه‌ای که ۳۹، ۴۱، ۴۸، ۵۱ و درصد استخراج آب به ترتیب در تیمارهای ۵۰، درصد آبیاری کامل، ۶۰ درصد آبیاری کامل، ۷۵ درصد آبیاری کامل و آبیاری کامل از لایه بالایی خاک بود. به طور کلی عمیق‌ترین لایه خاک (۱/۵ تا ۱/۸ متر) تنها ۵ تا ۸ درصد در استخراج کل آب فصلی نقش داشت. مبانه و همکاران (۲۹) گزارش کردند که بیشترین میزان خطا در شبیه‌سازی محتوای آب خاک در لایه‌های میانی خاک (۵۰ و ۸۰ سانتی) و پس از آن در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک رخ داد، نتیجه‌گیری آنها از این مشاهدات این بود که تراکم بیشتر ریشه‌ها در این لایه‌ها بر خطاهای شبیه‌سازی تأثیرگذار است. آنها همچنین بیش‌برآورد مقادیر محتوای رطوبت خاک برای ذرت دیم به خصوص در سال‌های خشک را گزارش کردند. بنابراین به نظر می‌رسد که بالا بودن دقت مدل آکواکراپ در پیش‌بینی رطوبت خاک در تحقیق حاضر به این دلیل است که مقادیر اندازه‌گیری شده مربوط به لایه بالایی خاک یعنی صفر تا ۱۵ سانتی‌متری بوده‌اند.



شکل ۳- مقادیر محتوای رطوبت خاک مشاهده‌شده (WC, (vol%) OBS) و شبیه‌سازی شده (WC, (vol%) SIM) تا عمق ۱۵ سانتی‌متری تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در طول فصل رشد جهت واسنجی (سال ۱۳۹۵)

Figure 3- Observed and simulated values of soil water content till 15 cm depth under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016)



شکل ۴- مقایسه تبخیر و تعرق گیاه گوجه‌فرنگی و تبخیر و تعرق گیاه مرجع شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی (۱۳۹۶).

ETx تبخیر و تعرق حداکثر گیاه، ET تبخیر و تعرق گیاه، ET0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع

Figure 4- Comparison between simulated values of tomato evapotranspiration and reference evapotranspiration for calibration stage (2016)

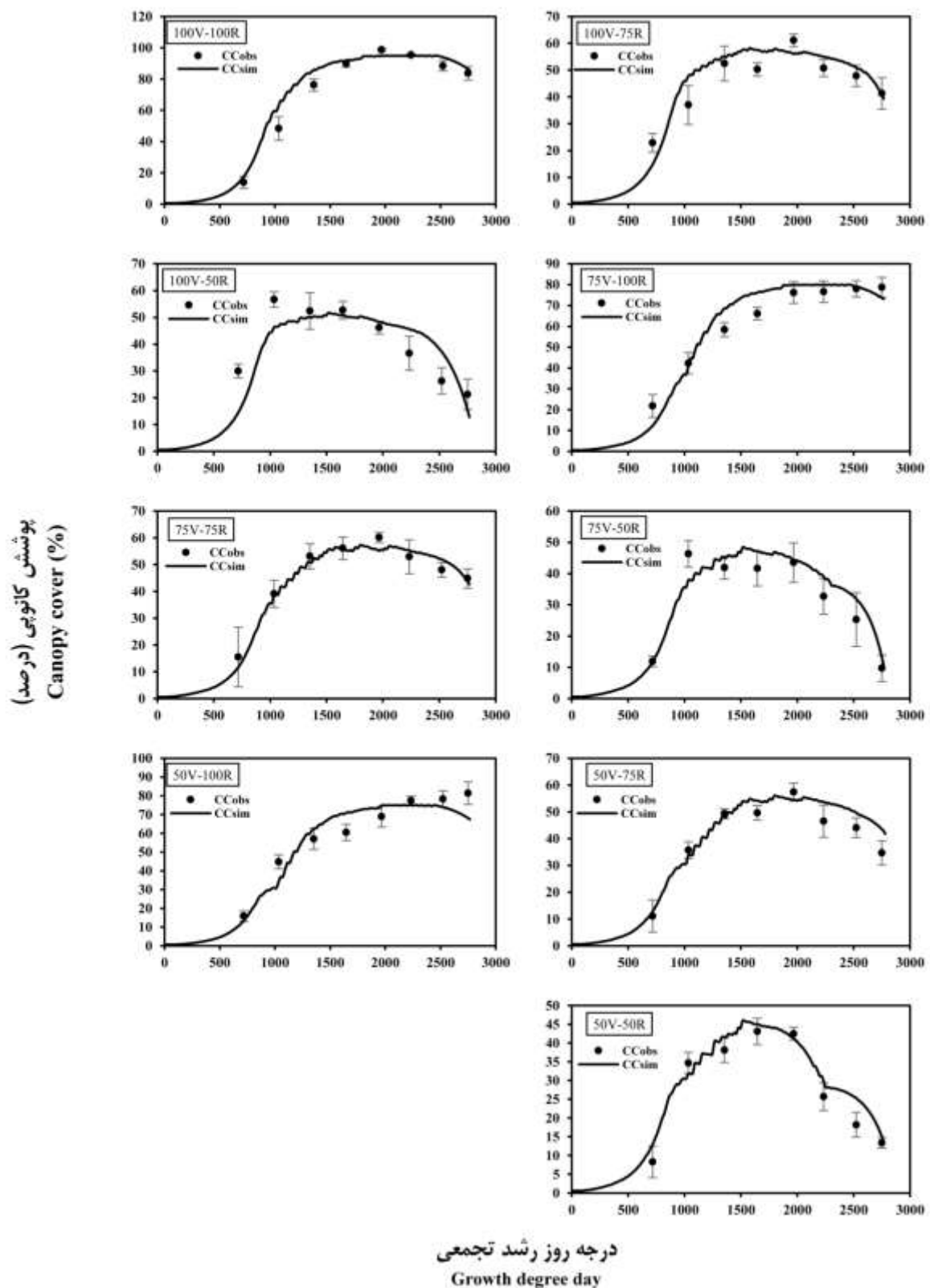
شبیه‌سازی توسعه پوشش کانوپی (CC)

در مدل آکواکراپ برآورد مناسب منحنی CC به منظور تخمین دقیق تبخیر خاک، تعرق گیاه، زیست‌توده و عملکرد محصول بسیار مهم است (۳۷). به منظور برآورد تولید شاخ و برگ و شبیه‌سازی منحنی CC، مدل با استفاده از داده‌های آزمایشی سال ۱۳۹۵ واسنجی و با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۶ صحت‌سنجی شد. مقادیر واسنجی‌شده و صحت‌سنجی شده CC تحت رژیم‌های مختلف آبیاری به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. شاخص‌های آماری نشان‌دهنده عملکرد مدل نسبت پیش‌بینی منحنی CC در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۶ نشان داده شده است. روند منحنی CC در طی زمان گرمایی یا درجه روز رشد (GDD) در همه تیمارها در هر دو سال مشابه بود و مدل واسنجی‌شده به خوبی این روند را در طول فصل رشد شبیه‌سازی کرد. ساکماکیس و همکاران (۴۵) با بررسی عملکرد مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی رشد پنبه (*Gossypium herbaceum*) دریافتند که هنگامی که مدل در حالت درجه روز رشد اجرا شد با دقت خیلی بالا (≥ 0.93) ضریب تبیین و ≥ 0.91 کارایی مدل) توانست الگوی رشد ریشه، پوشش کانوپی، زیست‌توده و محتوای آب خاک را شبیه‌سازی کند، اما هنگامی که مدل در حالت تعداد روز اجرا شد شبیه‌سازی الگوی رشد ریشه رضایت بخش نبود و در واقع با شکست مواجه شد در حالی که شبیه‌سازی

پوشش کانوپی، زیست‌توده و محتوای آب خاک قابل قبول (≥ 0.75) ضریب تبیین و ≥ 0.72 کارایی مدل) بود. به طور کلی نتایج واسنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه CC در همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا (> 0.87)، EF قابل قبول (> 0.61)، خطای پایین (RMSE، دامنه‌ای بین ۴/۵ تا ۹/۲) و مقادیر d بالا (> 0.92) نشان داد. RMSE پایین نشان‌دهنده استحکام مدل در شبیه‌سازی CC پس از انجام یک واسنجی قابل قبول تحت رژیم‌های مختلف آبیاری می‌باشد. پایین‌ترین دقت در تخمین CC در سال ۹۵ برای تیمار 50V-50R و بعد از آن برای تیمار 50V-75R یعنی جایی که بیشترین تنش آبی به گیاه وارد شده است، مشاهده شد. تأثیر تنش آب بر داده‌های مشاهده شده در این تیمارها بعد از ۱۰۰ روز پس از کاشت آشکارتر شد به صورتی که در این مرحله CC به سرعت کاهش پیدا کرد. با این حال مدل میزان CC را در مرحله پیری برای تیمارهای 50V-50R و 50V-75R کمی بالاتر پیش‌بینی کرد. از این جنبه در نظر گرفتن زمان شروع مرحله پیری کانوپی در هنگام واسنجی بسیار مهم است. با توجه به گفته استدئوتو و همکاران (۴۰)، زمان پیری کانوپی باید هنگامی باشد که برگ‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای شروع به پیر شدن (زرد شدن) کنند که در این زمان شاخص سطح برگ بیشتر از ۳ تا ۴ نیست.

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی (درصد) در تیمارهای مختلف آبیاری
Table 6- Statistical indices derived for evaluating the performance of AquaCrop model for predicting canopy cover (%) in different irrigation treatments

مرحله شبیه‌سازی Simulation	رژیم‌های آبیاری Irrigation regimes	شاخص‌های ارزیابی مدل Model evaluation indices						
		میانگین مربعات خطا RMSE	میانگین مربعات خطای نرمال‌شده NRMSE	کارایی مدل EF	شاخص توافق ویلومت d	ضریب تبیین R^2	خطای نسبی RE	کارایی مدل‌سازی ME
واسنجی Calibration	100V-100R	4.5	6	0.97	0.99	0.99	1.73	0.97
	100V-75R	7	15	0.64	0.93	0.92	7.40	0.63
	100V-50R	7.1	17.8	0.61	0.92	0.88	-0.84	0.61
	75V-100R	8.4	13.5	0.82	0.97	0.97	-1.64	0.82
	75V-75R	6.6	14.7	0.75	0.95	0.93	-5.88	0.75
	75V-50R	6.6	20.7	0.77	0.94	0.88	-4.18	0.77
	50V-100R	9.2	15.6	0.78	0.95	0.93	-3.17	0.78
	50V-75R	7.5	18.1	0.72	0.93	0.87	0.33	0.71
	50V-50R	6.3	24.9	0.77	0.93	0.90	11.80	0.76
میانگین Average		7.02	16.25	0.78	0.92	0.92	0.62	0.75
صحت‌سنجی Validation	100V-100R	6.9	9.3	0.93	0.98	0.98	5.72	0.93
	100V-75R	6.1	13.4	0.69	0.94	0.90	3.93	0.69
	100V-50R	8.6	21.4	0.54	0.89	0.81	-4.44	0.53
	75V-100R	6.6	10.6	0.88	0.98	0.97	2.55	0.88
	75V-75R	2.9	6.2	0.95	0.99	0.98	-1.68	0.95
	75V-50R	5.1	16.1	0.86	0.69	0.94	6.84	0.86
	50V-100R	7.9	13	0.85	0.96	0.93	-2.33	0.85
	50V-75R	5	12.1	0.86	0.96	0.95	6.64	0.86
	50V-50R	3.8	13.7	0.91	0.97	0.97	8.35	0.91
میانگین Average		5.88	12.87	0.83	0.93	0.94	2.84	0.82



شکل ۵- پوشش کانوپی شبیه‌سازی شده (CCsim) و مشاهده شده (CCobs) در هر یک از تیمارها در مرحله واسنجی (۱۳۹۵)
Figure 5- Observed (CCobs) and simulated (CCsim) values of canopy cover under different irrigation regimes during growing season for calibration (2016)

مدل آکوواکراپ را برای منطقه‌ای گرمسیری در تایوان ارزیابی کردند و گزارش دادند که مدل توسعه کانوپی را کمتر از داده‌های مشاهده شده پیش‌بینی کرد و همچنین تمایل مدل به کم برآوردی میزان CC مشهود بود و دقت مدل هنگام اجرای تنش آب کاهش یافت که باعث حصول مقادیر R^2 ، NRMSE، d و EF به ترتیب در محدوده ۰/۹۲ تا ۰/۹۸، ۶/۴ تا ۱۶/۰ درصد، ۰/۹۲ تا ۰/۹۹ و ۰/۶۰ تا ۰/۹۴ شد. کاترجی و همکاران (۲۷) نیز نشان دادند که مدل آکوواکراپ CC را در شرایط بدون تنش نسبت به شرایط تنش برای گیاه گوجه‌فرنگی با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرد.

نتیجه‌گیری

نسخه ۶/۱ آکوواکراپ برای شبیه‌سازی محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق گیاه و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی تحت شرایط رژیم‌های مختلف آبیاری در مراحل مختلف رشد و اسنجی و صحت‌سنجی شد. مرحله و اسنجی با موفقیت و دقت بالا انجام شد که حاصل آن بدست آمدن نتایجی با خطاهای پایین و اختلافات کم بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی بود. توافق بسیار خوبی بین مقادیر محتوای رطوبت خاک اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود داشت که باعث عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی میزان تبخیر و تعرق گیاه شد. به طور کلی نتایج و اسنجی توافق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده شده برای توسعه CC در همه تیمارها با مقادیر R^2 بالا ($0/87 <$)، EF قابل قبول ($0/61 <$)، خطای پایین (RMSE، دامنه‌ای بین ۴/۵ تا ۹/۲) و مقادیر d بالا ($0/92 <$) نشان داد. همچنین مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده در دامنه ۸/۴۷ تا ۱۷/۹۶ درصد برای پیش‌بینی محتوای رطوبت خاک در محدوده قابل قبول بود.

بنابراین مطابق با بسیاری از مطالعات انجام شده مبنی بر کاهش کارایی مدل آکوواکراپ در شرایط تنش آبی، مطالعه حاضر نیز علی‌رغم تأیید کارایی و دقت مناسب مدل آکوواکراپ در شبیه‌سازی رشد و نمو و پیش‌بینی محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گوجه‌فرنگی در شرایط کم آبیاری، نشان داد که کارایی مدل آکوواکراپ با افزایش شدت تنش نسبت به شرایط بدون تنش، کاهش می‌یابد. اما به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که مدل آکوواکراپ با سطح اطمینان قابل قبولی می‌تواند محتوای آب خاک، تبخیر و تعرق و پوشش کانوپی گیاه گوجه‌فرنگی تحت سناریوهای مختلف آبیاری را شبیه‌سازی کند.

در این مطالعه مشاهدات بصری نشان داد که تا حداقل ۱۲۵ روز پس از کاشت (۲۳۶۵ درجه روز رشد (GDD)) همه برگ‌ها سبز بودند بنابراین حداقل تا ۱۲۵ روز پس از کاشت پیری شروع نشده بود. در نتیجه، برای رسیدن به زردی قابل

توجه برگ‌ها، زمان شروع پیری کانوپی برای واسنجی مدل ۱۳۵ روز بعد از کاشت (۲۴۹۰ روز درجه رشد) در نظر گرفته شد.

با این حال، تنش شدید به‌کار برده شده در مزرعه باعث پیری زودتر با شدت بیشتر شد که می‌تواند دلیل کاهش بیشتر CC در داده‌های مشاهده شده نسبت به شبیه‌سازی شده در تیمارهایی که در مرحله زایشی تحت تنش بوده‌اند، باشد. بیش برآورد کردن مدل در مرحله واسنجی در زمان پیری در مطالعه ساندها و ایرماک (۳۷) نیز گزارش شده است. به طور کلی نتایج حاصل از مدل در شبیه‌سازی CC در مرحله واسنجی از نظر آماری قابل قبول بود. در طول مرحله صحت‌سنجی، مدل قادر بود روند توسعه CC را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. بالاترین خطا در شبیه‌سازی در تیمار 100V-50R مشاهده شد یعنی در تیماری که گیاه پس از دریافت آب کامل در دوره رویشی با تنش شدید آب در مرحله زایشی مواجه شد و سطح برگ با شدت و سرعت بیشتری کاهش پیدا کرد که در نتیجه مدل میزان CC را در مرحله انتهایی رشد بیش از داده‌های واقعی مشاهده شده در مزرعه پیش‌بینی کرد. بنابراین مدل تمایل به بیش برآورد داده‌ها تحت تأثیر تنش آب نسبت به داده‌های مشاهده‌شده دارد. تیمارهایی که در مرحله زایشی آب کامل دریافت کردند، به ویژه هنگامی که در زمان رویشی هم آب کامل یا حداقل با کاهش ۲۵ درصدی دریافت کردند، با دقت بسیار بالا با مقادیر $R^2 > 0/97$ ، $EF > 0/88$ ، $RMSE < 6/6$ و $d > 0/98$ شبیه‌سازی شدند.

نتایج CC در این مطالعه با گزارش‌های هنگ و همکاران (۲۳) برای ذرت آبیاری شده و کم‌آبیاری شده در سه منطقه تگزاس، فلوریدا و اسپانیا با شرایط محیطی متفاوت، مطابقت داشت. آنها مقادیر NRMSE و EF را به ترتیب در محدوده ۵/۱ تا ۳۴/۵ درصد و ۲/۰ تا ۰/۹۸ بدست آوردند و عدم تطابق جزئی در CC مرحله پیری با کاهش شدیدتر برای تگزاس و کندتر برای فلوریدا در مقایسه با CC مشاهده شده را گزارش کردند. پاردس و همکاران (۳۳) نیز مقادیر R^2 ، NRMSE و EF برای منطقه آلیپارسه به ترتیب ۰/۹۷، ۶/۶ و ۰/۹۶ و برای منطقه سورایا در مرکز پرتغال به ترتیب ۰/۹۲، ۵/۱ و ۰/۹۱ گزارش کردند و بیان کردند که مدل با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی CC بود. شاو و همکاران (۲۴) به محدودیت مدل‌ها در شبیه‌سازی سرعت کاهش مرحله پیری کانوپی به علت تنش آب پرداخته‌اند. آن‌ها NRMSE مربوط به پیش‌بینی پوشش کانوپی را برای تیمارهای بدون تنش و تحت تنش آب در دیویس ایالت کالیفرنیا در محدوده ۴/۸ تا ۱۳/۶ درصد و d بزرگتر از ۹۵ را گزارش دادند. گریوس و وانگ (۲۲)

منابع

- 1- Abrha B., Delbecque N., Raes D., Tsegay A., Todorovic M., Heng L.E.E., Vanutrecht E., Geerts S.A.M., Garcia-Vila M., and Deckers S. 2012. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) Based on modelled yield response to water with aquacrop. *Experimental Agriculture* 48: 252-271.
- 2- Agricultural Statistics of Iran. 2018. The yearbook of agriculture statistics of Iran. Bureau of statistics and information technology, The ministry of Agriculture, Tehran, Iran. 232 pages. (In persian)
- 3- Ahmadi S.H., Mosallaepour 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.
- 4- Andarzian B., Bannayan M., Steduto P., Mazraeh H., Barati M.E., Barati M.A., and Rahnama A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management* 100: 1-8.
- 5- Araya A., Habtu S., Hadgu K.M., Kebede A., and Dejene T. 2010a. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management* 97: 1838-1846.
- 6- 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.
- 7- Bahmani O., and Eghbalian S. 2018. Simulating the Response of Sugarcane Production to Water Deficit Irrigation Using the AquaCrop Model. *Agricultural Research* 7: 158-166.
- 8- Carlson T.N., and Ripley D.A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 62: 241-252.
- 9- Cusicanqui J., Dillen K., Garcia M., Geerts S., Raes D., and Mathijs E. 2013. Economic assessment at farm level of the implementation of deficit irrigation for quinoa production in the Southern Bolivian Altiplano. *Spanish Journal of Agricultural Research* 11(4): DO - 10.5424/sjar/2013114-4097.
- 10- Doorenbos J., and Kassam A. 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage*, Paper No. 33: 257.
- 11- FAO STAT. 2018. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture (SOLAW)-Managing Systems at Risk. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome and Earth scan, London.
- 12- FAO. 2019. Downloads for AquaCrop (Version 6.1) Standard Window Program and Plug-in Program. <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>.
- 13- Farahani H.J., Izzi G., and Oweis T.Y. 2009. Parameterization and Evaluation of the AquaCrop Model for Full and Deficit Irrigated Cotton. *Agronomy Journal* 101: 469-476.
- 14- Farrokhi E., Nassiri Mahalati M., Koocheki A., Beheshti S.A. 2022. Simulation of growth and development of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under drought stress: 2- simulation of water productivity, above ground biomass and yield. *Water and Soil*. (Accepted). (In Persian with English abstract)
- 15- Farrokhi E., Nassiri Mahalati M., Koocheki A., Beheshti S.A. 2021. Light extinction coefficient and radiation use efficiency in different growth stages of tomato exposed to different irrigation regimes. *Environmental Stresses in Crop Sciences*. (Accepted). (In Persian with English abstract)
- 16- Foster T., Brozović N., and Butler A.P. 2014. Modeling irrigation behavior in groundwater systems. *Water Resources Research* 50: 6370-6389.
- 17- 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.
- 18- García-Vila M., and Fereres E. 2012. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. *European Journal of Agronomy* 36: 21-31.
- 19- Geerts S., Raes D., and Garcia M. 2010. Using AquaCrop to derive deficit irrigation schedules. *Agricultural Water Management* 98: 213-216.
- 20- Geerts S., Raes D., Garcia M., Miranda R., Cusicanqui J. A., Taboada C., Mendoza J., Huanca R., Mamani, A., Condori O., Mamani J., Morales B., Osco V., and Steduto P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with aquacrop. *Agronomy Journal* 101: 499-508.
- 21- Grassini P., Yang H., Irmak S., Thorburn J., Burr C., and Cassman K.G. 2011. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: II. Irrigation management and crop water productivity. *Field Crops Research* 120: 133-141.
- 22- 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.
- 23- 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.
- 24- 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.
- 25- Jiang Z., Huete A.R., Chen J., Chen Y., Li J., Yan G., and Zhang X. 2006. Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment* 101: 366-378.
- 26- Johnson L.F., and Trout T.J. 2012. Satellite NDVI Assisted Monitoring of Vegetable Crop Evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. *Remote Sensing* 4.
- 27- 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.
- 28- Kim D., and Kaluarachchi J. 2015. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management* 149: 143-155.
- 29- Mebane V.J., Day R.L., Hamlett J.M., Watson J.E., and Roth G.W. 2013. Validating the FAO AquaCrop Model for Rainfed Maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal* 105: 419-427.
- 30- Mhizha T. 2010. Increase of yield stability by staggering the sowing dates of different varieties of rainfed maize in Zimbabwe.
- 31- Mhizha T., Geerts S., Vanuytrecht E., Makarau A., and Raes D. 2014. Use of the FAO AquaCrop model in developing sowing guidelines for rainfed maize in Zimbabwe. *Water SA* 40: 233-244.
- 32- Nyakudya I.W., and Stroosnijder L. 2014. Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management* 146: 280-296.
- 33- Paredes P., de Melo-Abreu J.P., Alves I., and Pereira L.S. 2014. Assessing the performance of the FAO AquaCrop model to estimate maize yields and water use under full and deficit irrigation with focus on model parameterization. *Agricultural Water Management* 144: 81-97.
- 34- Pirmoradian N., and Davatgar N. 2019. Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management* 213: 97-106.
- 35- 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.
- 36- Richey A.S., Thomas B.F., Lo M.H., Reager J.T., Famiglietti J.S., Voss K., Swenson S., and Rodell M. 2015. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research* 51: 5217-5238.
- 37- 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.
- 38- Schewe J., Heinke J., Gerten D., Haddeland I., Arnell N.W., Clark D.B., Dankers R., Eisner S., Fekete B.M., Colón-González F.J., Gosling S.N., Kim H., Liu X., Masaki Y., Portmann F.T., Satoh Y., Stacke T., Tang Q., Wada Y., Wisser D., Albrecht T., Frieler K., Piontek F., Warszawski L., and Kabat P. 2014. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 3245-3250.
- 39- Shrestha N., Raes D., Vanuytrecht E., and Sah S.K. 2013. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling. *Agricultural Water Management* 122: 53-62.
- 40- Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., and Raes D. 2012. "Crop yield response to water," fao Rome.
- 41- 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.
- 42- Tavakoli A.R., Mahdavi Moghadam M., and Sepaskhah A.R. 2015. Evaluation of the AquaCrop model for barley production under deficit irrigation and rainfed condition in Iran. *Agricultural Water Management* 161: 136-146.
- 43- Taylor R. 2014. When wells run dry. *Nature* 516: 179-180.
- 44- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.-T. A., Stöckle, C., and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal* 101: 509-521.
- 45- Tsakmakis I.D., Kokkos N.P., Gikas G.D., Pisinaras 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.
- 46- Tsegay, A. 2012. Improving Crop Production by Field Management Strategies Using Crop Water Productivity Modeling: Case Study of Tef (*Eragrostistef* (Zucc.) Trotter) Production in Tigray, Ethiopia. PhD Manuscript.
- 47- Tsegay A., Raes D., Geerts S., Vanuytrecht E., Abraha B., Deckers J., Bauer H., and Gebrehiwot K. 2012. Unravelling crop water productivity of tef (*Eragrostis Tef* (Zucc.) Trotter) through AquaCrop in northern Ethiopia. *Experimental Agriculture* 48: 222-237.
- 48- Van Ittersum M.K., Cassman K.G., Grassini P., Wolf J., Tittonell P., and Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research* 143: 4-17.
- 49- 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.
- 50- Zeleke K.T., Luckett D., and Cowley R. 2011. Calibration and Testing of the FAO AquaCrop Model for Canola. *Agronomy Journal* 103: 1610-1618.
- 51- Zinyengere N., Mhizha T., Mashonjowa E., Chipindu B., Geerts S., and Raes D. 2011. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe. *Agricultural and Forest Meteorology* 151: 1792-1799.



Simulation of Growth and Development of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) under Drought Stress: 1- Simulation of Soil Water Content, Evapotranspiration, and Green Canopy Cover

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

Received: 05-09-2020

Accepted: 17-05-2021

Introduction: The modeling approach for the simulation of the growth and development of tomatoes in Iran has been overlooked. Calibrated crop simulation models, therefore, are increasingly being used as an alternative means for the 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 settings. This study was conducted as a two-year field experiment with the aim of the simulation of soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover of tomato using AquaCrop model under different irrigation regimes at two growth stages in Mashhad climate conditions.

Materials and Methods: A field experiment was conducted over two consecutive seasons (2016-2017) in the experimental field of Ferdowsi University of Mashhad, located in Khorasan Razavi province, North East of Iran. The experiment was laid out in a split-plot design with different irrigation regimes at the vegetative and at the reproductive stage as the main and subplot factors, replicated thrice. In total, 27 plots of 4.5×3 m (13.5 m²) were used at a planting density of 2.7 plants per m². Seedlings were planted in a zigzag pattern into twin rows, with a distance of 1.5 m between them, so there were four twin rows of three meters in each plot. The distance between tomato plants within each twin-row was 0.5 meters. A buffer zone spacing of 3 and 1.5 m was provided between the main plots and subplots, respectively. The following experimental factors were studied: three irrigation regimes (100= 100% of water requirement, 75= 75% of water requirement, 50= 50% of water requirement) and two crop growth stages (V= vegetative stage and R= Reproductive stage). 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. Model accuracy was evaluated using statistical measures, e.g., R², normalized root means square error (NRMSE), model efficiency (E.F.), and d-Willmott. The 2016 and 2017 measured soil and canopy data sets were used for calibration and validation of the AquaCrop model, respectively.

Results and Discussion: For a water-driven model, such as AquaCrop, it is important to evaluate its effectiveness in simulating soil water content. During calibration (2016), the model simulated the soil water content with good accuracy. The simulated soil water content values were close to the observed values during calibration (2016) for all treatments with R² ranging from 0.90 to 0.97, NRMSE in range of 8.47 to 17.96%, d varying from 0.76 to 0.99, and M.E. ranging from 0.87 to 0.96. Validation results indicated the good performance of the model in simulating soil water content for most of the treatments (0.79<R²<0.99, 10.04%<NRMSE<18.65%, 0.77<ME<0.92).

Appropriate parameterization of canopy cover curve is critical for the model to provide accurate estimates of soil evaporation, crop transpiration, biomass, and yield. In general, the calibration results showed good agreement between simulated and observed data for canopy cover development in all treatments with high R² values (>0.87), good E.F. (>0.61), low estimation errors (RMSE, ranging from only 4.5 to 9.2) and high d values (>0.92).

Conclusion: The AquaCrop model (version 6.1) was calibrated and validated for modeling soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover for tomatoes under drought stress conditions. In general, soil water content, evapotranspiration, and green canopy cover of tomato were simulated by AquaCrop model with acceptable accuracy in both calibration and validation stages. However, the model performance was more accurate in no and/or moderate stress conditions than in severe water stress environments. In conclusion, the AquaCrop

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.2021.15011.0

model could be calibrated to simulate the growth and soil water content of tomatoes under temperate conditions reasonably well and become a very useful tool to support the decision on when and how much irrigate.

For R^2 , values > 0.90 were considered very well, while values between 0.70 and 0.90 were considered good. Values between 0.50 and 0.70 were considered moderately well, while values less than 0.50 were considered poor. Root mean square error ranges from 0 to positive infinity and expresses in the units of the studied variable. An RMSE approaching 0 indicates good model performance.

Keywords: AquaCrop model, CropWat, Deficit irrigation, Modelling, Soil water balance



مقاله پژوهشی

برآورد حداقل جریان آب زیست محیطی مورد نیاز رودخانه کارون در بالادست و پایین دست سد بهشت آباد

فاطمه حیات غیبی^۱ - ناصر شاهنوشی^{۲*} - بیژن قهرمان^۳ - حسین صمدی بروجنی^۴ - محمد قربانی^۵ - محمود صبحی صابونی^۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

چکیده

هرچند توسعه منابع آبی در موارد متعددی به افزایش رفاه اقتصادی، بهبود استانداردهای زندگی و بهداشتی، تولید غذا و غیره منجر شده است، اما در برخی از موارد به دلیل عدم توجه کافی به گسترده‌ی حوزه‌ی تأثیرگذاری این طرح‌ها، آثار زیست محیطی و متعاقب آن اجتماعی و حتی اقتصادی جبران ناپذیری بر جامعه تحمیل شده است. توجه به نیاز آب زیست محیطی رودخانه‌ها یکی از موارد بسیار مهم در تصمیم‌گیری‌های مربوط به طرح‌های توسعه منابع آب می‌باشد. بنابراین در مطالعه حاضر تلاش شده است با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، نیاز آب زیست محیطی در بالادست و پایین دست محل در نظر گرفته شده برای احداث سد پروژه جدید انتقال آب بهشت آباد، محاسبه گردد. براساس نتایج حاصل در بالادست محل سد، حداقل جریان زیست محیطی مورد نیاز رودخانه بهشت آباد بین ۱/۲۲ مترمکعب بر ثانیه برای شهرپور تا ۱۶/۷۵ متر مکعب بر ثانیه برای فروردین برآورد شده است. حداقل جریان زیست محیطی برآورد شده برای رودخانه کوه‌رنگ نیز از ۳/۶۹ متر مکعب بر ثانیه برای شهرپور تا ۱۶/۸۱ متر مکعب بر ثانیه برای فروردین متغیر می‌باشد. همچنین در پایین دست سد در محدوده ایستگاه ارمند، رودخانه کارون به حداقل جریان ۲۰/۸ متر مکعب بر ثانیه برای ماه‌های شهریور و مهر تا ۷۳/۲۹ مترمکعب بر ثانیه برای ماه فروردین نیاز دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهد در موارد متعددی به‌ویژه در سال‌هایی که منطقه با خشکسالی خفیف تا متوسط مواجه بوده، جریان آب مشاهداتی رودخانه برای تأمین حداقل نیازهای زیست محیطی آن کافی نبوده است. بر این اساس، به نظر می‌رسد منابع آب محدوده مورد بررسی نمی‌تواند به عنوان منبع پایداری برای انتقال آب در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال آب، رودخانه کارون، روش‌های هیدرولوژیکی، سد بهشت آباد، نیاز آب زیست محیطی

مقدمه

بزرگ و متعددی بر روی رودخانه کارون تأسیس شده و این حوضه با توجه به برآورد آبی مناسب و واقع شدن در نزدیکی دشت‌های کم‌آب مرکزی همواره به عنوان یک گزینه مطرح برای رفع کمبود آب این مناطق مدنظر بوده است. طرح انتقال آب بهشت آباد از جمله طرح‌های جدید مطرح شده برای انتقال بین حوضه‌ای آب از حوضه کارون به زاینده‌رود می‌باشد که از بحث برانگیزترین و مناقشه‌ای‌ترین طرح‌های انتقال آب کشور است.

علی‌رغم این که آثار منفی مختلف برای طرح‌های توسعه منابع آب و انتقال آب شناخته شده است، احداث این طرح‌ها در برخی از موارد به دلایل اقتصادی و اجتماعی اجتناب ناپذیر می‌باشد. یکی از

در بسیاری از مناطق جهان، رشد جمعیت، توسعه جوامع شهری و توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در کنار توزیع غیریکنواخت مکانی و زمانی بارش، به رشد تقاضا برای آب و رقابت برای منابع آب موجود، منجر شده است. ایران نیز از این مسئله مستثنی نمی‌باشد. یکی از راهکارهایی که برای کاهش این مشکل در کشور همواره مطرح بوده و به کار رفته است، انتقال آب درون حوضه‌ای و بین حوضه‌ای می‌باشد. طرح‌های آبی اجرا شده در حوضه آبریز کارون، نمونه‌ی شناخته شده و برجسته‌ای در این خصوص است. سدهای

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

DOI: [10.22067/jsw.2021.67064.0](https://doi.org/10.22067/jsw.2021.67064.0)

۱، ۲ و ۵ - به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه اقتصاد کشاورزی،

دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(Email: Shahnoushi@um.ac.ir)

(*) - نویسنده مسئول:

راهکارهای کاهش این آثار منفی توجه به جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه است. در حالت کلی جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه‌ها برای تأمین اهداف زیر تخصیص داده می‌شود (۷):

- پیشگیری یا به حداقل رساندن آثار منفی طرح‌های جدید توسعه منابع آب

- احیاء و بهبود شرایط سیستم‌هایی که تحت تأثیر طرح‌های موجود قرار گرفته‌اند.

شکست در تأمین این جریان‌ها منجر به کاهش سلامت رودخانه‌ها و اکوسیستم‌های وابسته در بسیاری از نقاط جهان شده است. این امر به طور غیرمستقیم منافع بخش‌های اقتصادی مختلف را نیز که به خدمات آن وابسته‌اند کاهش داده است. برای دستیابی به ترکیبی از گزینه‌های مقرون به صرفه و پیشگیرانه‌ی مدیریتی، ضروری است که تخصیص جریان‌های زیست‌محیطی در کنار سایر اقدامات مدنظر قرار گیرد (۷). جریان‌هایی که با هدف تأمین پایداری زیستگاه‌ها و فرآیندهای اکوسیستم تعیین و تخصیص داده می‌شوند، در ادبیات فنی به "جریان‌های زیست‌محیطی"، "نیاز آب زیست‌محیطی" و "الزامات آب زیست‌محیطی" معروف هستند (۷). در واقع، جریان آب زیست‌محیطی عبارت است از رژیم آب فراهم‌شده برای یک رودخانه، تالاب یا ناحیه ساحلی به منظور حفاظت از اکوسیستم‌ها و منافع آن‌ها، در مواقعی که مصارف رقابت‌کننده وجود دارند و جریان‌ها تنظیم شده‌اند (۲۶).

از جمله مطالعات صورت گرفته در خصوص جریان و نیاز آب زیست‌محیطی می‌توان به اسماختین و همکاران (۲۳) اشاره نمود. آن‌ها در یک تحقیق جهانی با بررسی ۱۲۸ حوضه رودخانه‌های بزرگ، نیاز آبی زیست‌محیطی مورد نیاز برای بقای اکوسیستم‌های آب شیرین را بین ۲۰ تا ۵۰ درصد جریان متوسط سالانه پیشنهاد دادند. این مقادیر با توجه به سطح حفاظتی لازم در هر یک از رودخانه‌ها و بر اساس منطقه مورد مطالعه، متفاوت می‌باشد. کایسی و ال‌جایی (۳) پنج روش هیدرولوژیکی ارزیابی جریان را برای ۷۰ رودخانه در آتلانتیک کانادا مقایسه کرده‌اند. این روش‌ها عبارتند از: (۱) روش تنانت، (۲) ۲۵ درصد میانگین جریان سالانه ($MAF = 25\%$)، (۳) میانه جریان ماهانه (Q_{50}) که شامل جریان پایه آبریزان (ABF) می‌شود، (۴) Q_{90} و (۵) $7Q_{10}$. مقایسه روش‌های مختلف نسبت به $MAF = 25\%$ (روشی که معمولاً در آتلانتیک کانادا مورد استفاده قرار می‌گیرد)، نشان داده است که روش‌های Q_{90} و $7Q_{10}$ جریان بسیار کمی را برای ماه‌های زمستان و تابستان پیش‌بینی می‌کنند و تصمیمات مدیریت منابع بر اساس این پیش‌بینی‌ها می‌تواند عواقب نامطلوبی داشته باشد. روش جریان ماهانه متوسط (Q_{50}) برای حوضه‌های دارای ایستگاه و روش تنانت، $MAF = 25\%$ و روش‌های ABF برای حوضه‌های فاقد ایستگاه توصیه شده است. مازیمای و همکاران (۱۱)، جریان مورد نیاز برای تأمین اهداف زیست‌محیطی ۱۵۱ زیرحوضه در زیمباوه را با استفاده از

روش هیدرولوژیکی بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که با افزایش تغییرات جریان، میزان نیاز زیست‌محیطی کاهش می‌یابد. آن‌ها ۳۰ تا ۶۰ درصد جریان متوسط سالانه را برای رودخانه‌های دائمی و ۲۰ تا ۳۰ درصد جریان را برای رودخانه‌های فصلی در نظر گرفته‌اند. دویی و همکاران (۴) با استفاده از روش انتقال منحنی تداوم جریان، جریان زیست‌محیطی مورد نیاز برای رودخانه نارمادی هند را بر اساس چهار ایستگاه مشخص نموده‌اند. نتایج حاصل از کلاس مدیریت زیستی B یا C به عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی مورد نیاز برای حفظ کیفیت آب و حیات آبریزان در پایین‌دست رودخانه، معرفی شده است. براساس نتایج کلاس B، حداقل جریان مورد نیاز رودخانه در ایستگاه‌های مختلف از $24/3$ درصد تا ۴۶ درصد میانگین رواناب سالانه، متغیر می‌باشد. کیم و چوی (۱۰) مقدار جریان زیست‌محیطی را برای پایین‌دست سد یانگجو در کره با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه، محاسبه و مقایسه کرده‌اند. روش‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده، روش تنانت، روش Q_{90} و روش $7Q_{10}$ می‌باشد. براساس نتایج حاصل، حداقل جریان زیست‌محیطی پیشنهادی توسط روش‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده، بسیار کمتر از مقادیر پیشنهادی توسط روش‌های هیدرولیکی و شبیه‌سازی زیستگاه می‌باشد. همچنین جریان بهینه پیشنهادی توسط روش‌های هیدرولیکی بسیار بیشتر از دو روش دیگر است.

در ایران نیز مطالعات مختلفی برای ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ها صورت گرفته است؛ از جمله شاعری کریمی و همکاران (۲۰) محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه شهرچای با استفاده از روش انتقال منحنی تداوم جریان و مقایسه آن با روش تنانت، شاخص جریان حداقل (جریان حداقل ۷ روزه با دوره بازگشت ۱۰ ساله)، روش تحلیل منحنی تداوم جریان و روش ذخیره رومیزی؛ پورستار (۱۸) ارزیابی جریان زیست‌محیطی رودخانه کارون (از ملاثانی تا دارخوین) با استفاده از چهار روش تنانت، منحنی تداوم جریان، روش ذخیره رومیزی و روش محدوده تغییرپذیری؛ عطایی کچوئی (۱) محاسبه جریان زیست‌محیطی رودخانه دز با استفاده از روش تنانت، منحنی تداوم جریان، شیب منحنی و حداکثر انحنای بیات و همکاران (۲) برآورد جریان محیط‌زیستی دو رودخانه کرج و تالار مازندران برمبنای روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، دبی پایه آبریزان، تسمن، تحلیل منحنی تداوم جریان و انتقال منحنی تداوم جریان؛ حسین‌پور (۸) محاسبه جریان زیست‌محیطی برای برخی از رودخانه‌های حوضه کارون شمالی با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی تنانت، تسمن، منحنی تداوم جریان و تحلیل منحنی تداوم جریان و روش‌های هیدرولیکی محیط خیس‌شده؛ نادری و همکاران (۱۵) تحلیل رژیم جریان مطلوب اکولوژیکی رودخانه زرین‌گل با استفاده از روش‌های هیدرولوژیکی و اکوهیدرولیکی شبیه‌سازی زیستگاه؛ مصطفوی و یاسی (۱۴) تعیین حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه باراندوزچای با استفاده از

روش های اکوهیدرولوژیکی.

جمع بندی مطالعات صورت گرفته در خصوص ارزیابی جریان زیست محیطی رودخانه ها، نشان می دهد روش های متعددی برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است که روش های هیدرولوژیکی به دلیل هزینه کمتر و سرعت اجرای بالاتر جزو روش های متداول مورد استفاده در این زمینه می باشند. با توجه به این که روش های هیدرولوژیکی صرفاً از داده های جریان تاریخی رودخانه ها برای محاسبه جریان آب زیست محیطی مورد نیاز رودخانه استفاده می کنند، گرایش به سمت استفاده از روش های جدیدتر در این گروه مانند روش انتقال منحنی تداوم جریان که با لحاظ کلاس های مدیریت زیستی، جریان زیست محیطی را براساس دید اکولوژیکی و با توجه به شرایط زیستی رودخانه پیشنهاد می کند، افزایش یافته است. براساس پیشینه مطالعات صورت گرفته به نظر می رسد این روش تاکنون در محدوده مبدأ طرح جدید انتقال بین حوضه ای آب از حوضه کارون به زاینده رود (طرح بهشت آباد) مورد بررسی قرار نگرفته است. به دلیل اهمیت و حساسیت این طرح و از آنجایی که بحث های زیست محیطی یکی از مناقشه ترین موضوعات مطرح شده در خصوص اجرای این طرح می باشد و همچنین اهمیت توجه به نیاز آب زیست محیطی رودخانه ها در اجرای کلیه طرح های توسعه منابع آب، هدف مطالعه حاضر بررسی جریان آب زیست محیطی رودخانه کارون در بالادست و پایین دست محل در نظر گرفته شده برای احداث سد طرح انتقال آب بهشت آباد است.

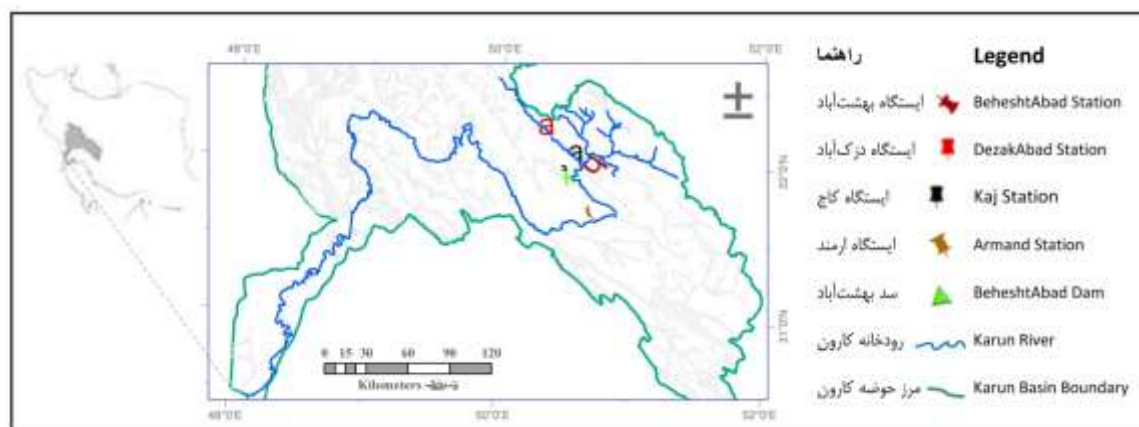
محدوده ی مورد بررسی مطالعه حاضر، بخشی از حوضه آبریز رودخانه کارون واقع در محدوده طرح انتقال آب بهشت آباد می باشد. رودخانه های بهشت آباد و کوهرنگ پس از الحاق به یکدیگر، رودخانه کارون را تشکیل می دهند. طرح بهشت آباد که برای انتقال آب از حوضه کارون به زاینده رود مطرح شده، شامل یک سد در محل الحاق رودخانه های بهشت آباد و کوهرنگ است. ایستگاه هیدرومتری بهشت آباد در نزدیکی خروجی حوضه بهشت آباد و ایستگاه هیدرومتری کاج در نزدیکی خروجی محدوده کوهرنگ واقع شده اند. ایستگاه هیدرومتری ارمند در پایین دست این سد قرار دارد. ایستگاه ارمند با ۶۰ سال آمار جزو ایستگاه های هیدرومتری درجه یک حوضه کارون به شمار می رود. ایستگاه بهشت آباد دارای ۳۵ سال آمار و ایستگاه کاج دارای ۱۷ سال آمار می باشد. با توجه به دوره آماری نسبتاً کوتاه ایستگاه کاج، آبدی در محل ایستگاه دزک آباد در بالادست آن که با ۳۴ سال آمار جزو ایستگاه های مناسب در حوضه می باشد، نیز مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱). جدول ۱، موقعیت مکانی ایستگاه ها و دوره آماری مورد استفاده را نشان می دهد.

روش های هیدرولوژیکی تعیین جریان آب زیست محیطی

به منظور تعیین جریان آب زیست محیطی با توجه به مقیاس مکانی هر مطالعه، داده های موجود، گام زمانی ارزیابی و ظرفیت های فنی و مالی، روش های مختلفی مورد استفاده قرار می گیرد. حدود ۲۰۷ روش مختلف برای تعیین جریان آب زیست محیطی رودخانه ها در ۴۴ کشور از سراسر جهان شناسایی شده است (۷).

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه و ایستگاه های مورد استفاده



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه های هیدرومتری

Figure 1- Study area and location of selected hydrometric stations

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه و دوره زمانی داده‌ها

Table 1- Hydrometric stations location and data time frame

ایستگاه هیدرومتری (Hydrometric station)	موقعیت مکانی (Location)		دوره زمانی Time frame	تعداد سال Years number
	طول (Longitude)	عرض (Latitude)		
بهشت‌آباد (BeheshtAbad)	32-1-50	50-37-47	1984-2017 (1363-1396)	34
دزک‌آباد (DezakAbad)	32-14-56	50-19-18	1985-2017 (1364-1396)	33
کاج (Kaj)	32-3-14	50-34-49	1998-2017 (1377-1396)	20
ارمند (Armand)	31-41-0	50-46-0	1976-2017 (1355-1396)	42

بنابراین جریان‌های معین مرتبط با درجه‌بندی‌های کیفی زیستگاه ماهیان را که برای تعریف جریان مورد نیاز برای حفظ زیستگاه ماهیان با کیفیت مطلوب استفاده شده‌اند، جز به جز شرح می‌دهد. مقادیر مختلف جریان که در این روش برای حفاظت از سطوح مختلف سلامت اکوسیستم پیشنهاد می‌شود، به شرح جدول ۲ است. این جدول به متخصصین اجازه می‌دهد که جریان مورد نیاز را با استفاده از درصد متوسط جریان سالیانه بدون جمع‌آوری داده‌های بیشتر در محل تنظیم کنند. در ایران روش تنانت می‌تواند به عنوان یک مدل برای توسعه سطوح حداقل جریان در سطح برآورد اولیه در حوضه آبریز باشد (۱۲). براساس ابلاغیه شماره ۸۳۴۹/۳۱/م وزارت نیرو، روش مونتانا (تنانت) با کیفیت حیات ماهی در رودخانه در حد قابل قبول به عنوان حداقل نیاز آبی زیست‌محیطی در رودخانه‌ها بایستی مدنظر قرار گیرد. در روش مونتانا (طبق ابلاغیه وزارت نیرو)، مبنای محاسبات جریان زیست‌محیطی، آبدی متوسط سالانه است که به تفکیک برای فصل‌های بهار و تابستان با ضریب ۰/۳ و برای فصل‌های پاییز و زمستان با ضریب ۰/۱ محاسبه می‌گردد. در این روش، طبق دستورالعمل تخصیص - مبنای محاسبات جریان زیست‌محیطی، آبدی متوسط ماهانه است و ضرایب مطابق روش قبل اعمال می‌شود (۱۳).

روش منحنی تداوم جریان: یکی از خصوصیات مربوط به جریان آب که در ارزیابی نوسانات و تغییرپذیری آب رودخانه از نظر زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرد، منحنی تداوم جریان است. منحنی تداوم جریان از مفیدترین روش‌های نمایش محدوده کامل دبی‌های رودخانه از رخدادهای کم‌آبی تا سیلابی می‌باشد. این منحنی نشان‌دهنده رابطه بین شدت جریان آب و درصد زمانی دفعاتی است که از جریان معینی (در طول دوره آماری) برابر یا افزون می‌گردد. جریان‌های بین محدوده ۷۰ تا ۹۹ درصد زمان تجاوز، معمولاً به‌طور گسترده‌ای به عنوان جریان‌های کم‌آبی استفاده می‌شوند. جریان‌های Q_{95} و Q_{90} شاخص‌هایی هستند که اکثر مواقع به عنوان شاخص‌های

موسسه بین‌المللی منابع آب، روش‌های ارزیابی جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه‌ها را در قالب چهار روش متمایز شامل: روش‌های هیدرولوژیکی، روش‌های هیدرولیکی، روش‌های شبیه‌سازی زیستگاه و روش‌های جامع طبقه‌بندی می‌کند. روش‌های هیدرولوژیکی، مبتنی بر داده‌های تاریخی جریان رودخانه می‌باشند. درصد ثابتی از جریان یا دیگر شاخص‌های به‌دست آمده از جریان که اغلب حداقل جریان نامیده می‌شوند، برای نمایش دادن نیازهای جریان زیست‌محیطی مناسب برای حفظ یک خصوصیت برجسته اکوسیستم در یک تراز قابل قبول از قبل پیش‌بینی شده، انتخاب می‌شوند (۷). از جمله روش‌های متداول مبتنی بر شاخص‌های هیدرولوژیکی می‌توان روش تنانت^۱ (یا مونتانا^۲)، روش تگزاس، منحنی تداوم جریان^۳ (FDC)، روش کمبود جریان اکولوژیکی، جریان پایه آبریزان، روش گستره تغییرپذیری^۴ (RVA) و روش ذخیره رومیزی^۵ (DRM) را نام برد. در مطالعه حاضر، با توجه به اطلاعات موجود و محدودیت هزینه و زمان، از روش‌های هیدرولوژیکی برای محاسبه جریان آب زیست‌محیطی استفاده شده است. علت استفاده از این روش‌ها این است که براساس بررسی پیشینه‌ی مطالعات صورت گرفته به‌نظر می‌رسد روش انتقال منحنی تداوم جریان در محدوده مورد مطالعه تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است و استفاده از دو روش دیگر نیز امکان مقایسه نتایج حاصل را فراهم می‌آورد؛ ضمن این‌که روش متداول مورد استفاده در گزارش‌های طرح جامع منابع آب و مطالعات آمایش، روش تنانت می‌باشد.

روش تنانت (مونتانا): این روش یکی از پرکاربردترین روش‌های هیدرولوژیکی است که در حال حاضر دومین روش جریان زیست‌محیطی پرکاربرد در امریکای شمالی می‌باشد (۷). تنانت از میان یک روش نسبتاً پیچیده، روشی ساده برای کاربرد استاندارد که می‌تواند با داده‌های بسیار کم استفاده شود، ارائه کرده است. این تکنیک تنها متوسط جریان سالیانه را برای رودخانه به کار می‌برد.

4- Range of Variability Approach

5- Desktop Reserve Model

1- Tennant

2- Montana

3- Flow Duration Curve

کم آبی به کار می‌روند (۱۹ و ۲۱).

جدول ۲- جریان زیست محیطی پیشنهادی در روش تنانت

Table 2- Environmental flow suggested by Tennant

وضعیت جریان (Description of flows)	درصد های پیشنهادی از میانگین آورد سالانه رودخانه	
	Recommended base flow regimens (percent of mean annual runoff)	
	آوریل - سپتامبر Apr-Sep	اکتبر - مارس Oct-Mar
(Flushing or maximum) شست و شوی سریع یا حداکثر	200	200
(Optimal range) محدوده بهینه	60-100	60-100
(Outstanding) بسیار عالی	60	40
(Excellent) عالی	50	30
(Good) خوب	40	20
(Fair or degrading) قابل قبول	30	10
(Poor) ضعیف	10	10
(Severe degradation) بسیار ضعیف	10<	10<

Reference: Tennant, 1976

مأخذ: تنانت، ۱۹۷۶

تهیه می‌گردد. محور احتمالات منحنی تداوم جریان با نمایش ۱۷ درصد احتمال وقوع (۰/۰۱، ۰/۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ...، ۹۰، ۹۵، ۹۹، ۹۹/۹، ۹۹/۹۹)، در نظر گرفته می‌شود. این نقاط تضمین می‌کنند که تمام محدوده جریان‌ها به قدر کافی پوشش داده شده است. در مرحله بعد، کلاس‌های مدیریت زیستی تعریف می‌شود. کلاس بالاتر به آب بیشتر جهت حفظ و نگهداری اکوسیستم نیاز خواهد داشت. در این روش ۶ کلاس مدیریتی مورد استفاده قرار می‌گیرد که شامل کلاس A: وضعیت طبیعی، کلاس B: اندکی تغییر یافته، کلاس C: نسبتاً تغییر یافته، کلاس D: تا حد زیادی تغییر یافته، کلاس E: به شدت تغییر یافته و کلاس F: به طرز بحرانی تغییر یافته می‌باشد. کلاس A، بیانگر وضعیت دست نخورده یا حداقل تغییرات زیستگاه ساحلی و رودخانه‌ای است در حالی که در کلاس F، اکوسیستم کاملاً دچار تغییرات شده و تقریباً می‌توان گفت زیستگاه طبیعی و بیوتا دچار تخریب کامل شده‌اند که این حالت از نظر مدیریتی قابل قبول نمی‌باشد. شرح کامل توضیح اکولوژیکی و دیدگاه مدیریتی مربوط به کلاس‌های مدیریت زیستی در منابع مختلف موجود است (۲۲). پس از ترسیم منحنی تداوم جریان طبیعی، با استفاده از انتقال عرضی به سمت چپ در طول محور احتمال، منحنی تداوم جریان زیست محیطی برای هر کلاس مدیریتی مشخص می‌شود. انتقال در منحنی تداوم جریان به این معنا است که برای مثال جریانی که در ۹۹/۹۹ درصد مواقع رخ می‌داد، اکنون در ۹۹/۹ درصد رخ می‌دهد. در نهایت می‌توان از طریق یک میان‌یابی فضایی، منحنی‌های تداوم جریان زیست محیطی را به سری‌های زمانی جریان زیست محیطی تبدیل کرد (۲۷). در این مطالعه، محاسبات مربوط به روش انتقال منحنی تداوم

در بسیاری از مراجع بده جریان با احتمال تجاوز ۹۰ درصد (Q_{90})، به عنوان نرم جریان حداقل رودخانه مورد توافق است (۵). جریان میانه ماهیانه (Q_{50}) نیز شاخص تداوم جریان متداول دیگری می‌باشد که در مواردی مانند حفاظت از بیوتای آبی و پیشنهاد جریان‌های فصلی حداقل برای رودخانه‌های نیروی آبی مورد استفاده قرار گرفته است. منحنی تداوم جریان با مرتب کردن داده‌های آماری جریان به صورت نزولی ترسیم می‌شود. جریان‌ها در مقابل مقادیر احتمال (P) قرار داده می‌شوند. احتمال وقوع و تجاوز از هر مقدار دبی مشخص از رابطه ۱ به دست می‌آید:

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

که در آن m، مرتبه دبی در سری زمانی مرتب شده به صورت نزولی و n، کل تعداد فراوانی داده‌ها است.

روش انتقال منحنی تداوم جریان: این روش توسط اسماختین و آنپوتاس (۲۲) به منظور ارزیابی جریان زیست محیطی در سامانه رودخانه معرفی شده است. انتقال منحنی تداوم جریان، یک رژیم هیدرولوژیکی برای حفاظت رودخانه در وضعیت اکولوژیکی مطلوب ارائه می‌دهد. این روش شامل چهار مرحله اصلی می‌باشد:

۱- شبیه‌سازی وضعیت‌های هیدرولوژیکی موجود، ۲- تعریف کلاس‌های مدیریتی زیست محیطی، ۳- تولید منحنی‌های تداوم جریان زیست محیطی، ۴- تولید سری زمانی جریان زیست محیطی ماهیانه

مراحل کامل این روش در مراجع مختلف (۷) موجود می‌باشد؛ بنابراین در این مطالعه تنها به ذکر خلاصه‌ای از آن اکتفا شده است. در مرحله اول منحنی تداوم جریان طبیعی در بازه رودخانه‌ای مورد نظر

جریان، با استفاده از نرم‌افزار GEFC^۱ انجام شده است.

بازسازی و تکمیل داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری: در

مورد تحلیل رژیم هیدرولوژیکی جریان رودخانه‌ها لازم است در هر یک از نقاط کنترلی تعیین شده، حداقل سری زمانی ۲۰ ساله جریان طبیعی رودخانه مورد تحلیل قرار گیرد. علت این امر آن است که تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد با در نظر گرفتن دوره آماری حداقل دو دهه، آثار اقلیمی بین سالی روی پارامترهای هیدرولوژیکی جریان به شدت کاهش می‌یابد (۱۷ و ۲۵). در مواردی که طول آمار موجود کافی نباشد، یا آثار توسعه‌های انسانی بر رژیم جریان حذف نشده باشد، سری زمانی باید با استفاده از الگوهای هیدرولوژیکی-آماري بازسازی شود. برای تکمیل و برآورد داده‌های گمشده ایستگاه‌های هیدرومتری می‌توان از روش‌های مختلف مانند مدل‌های بارش-رواناب، روابط رگرسیونی، ضریب همبستگی و شبکه عصبی استفاده نمود. در مطالعه حاضر، برای تکمیل داده‌های ایستگاه بهشت‌آباد و تطویل داده‌های ایستگاه کاج از روش ضریب همبستگی، رگرسیون و شبکه عصبی استفاده شده است. توضیحات مربوط به این روش‌ها در منابع مختلف موجود می‌باشد (۹ و ۱۶). برای تکمیل داده‌های ایستگاه بهشت‌آباد، آمار دو ایستگاه درکش و رکش و کوه‌سوخته در بالادست این ایستگاه و ایستگاه ارمند در پایین‌دست آن مورد استفاده قرار گرفته است. به این صورت که ابتدا با استفاده از روش‌های مذکور، دبی رودخانه در محل ایستگاه بهشت‌آباد برآورد گردید و نتایج با مقادیر واقعی مقایسه شد. در نهایت مدلی با کمترین خطا (رابطه ۲) انتخاب و مقادیر گمشده ایستگاه براساس آن محاسبه شد.

$$Q_B = 1.51 + 0.86Q_K + 1.39Q_D \quad R^2 = 0.99 \\ RMSE = 1.26 \quad (2)$$

Q_B ، Q_K و Q_D به ترتیب دبی رودخانه در محل ایستگاه بهشت‌آباد، کوه‌سوخته و درکش و رکش است. مقدار خطا (RMSE) براساس رابطه فوق، ۱/۲۶ می‌باشد. برای تطویل آمار ایستگاه کاج نیز از دو ایستگاه دزک‌آباد و ارمند استفاده گردید که در نهایت رابطه همبستگی بین ایستگاه کاج و دزک‌آباد، پیش‌بینی با کمترین خطا را حاصل نمود. ضریب همبستگی دو ایستگاه کاج و دزک‌آباد، ۰/۹۶ و مقدار خطا (RMSE)، ۵/۴۷ محاسبه شده است.

طبیعی‌سازی داده‌های ایستگاه‌ها: همان‌طور که پیش‌تر بیان

شد، در روش‌های هیدرولوژیکی، محاسبات با استفاده از جریان طبیعی رودخانه صورت می‌گیرد. بنابراین لازم است آمار مشاهده‌ای ایستگاه‌های مورد استفاده، طبیعی شوند. برای این منظور از روش حذف روند که در مطالعات بهنگام‌سازی طرح جامع منابع آب کشور (۱۳) نیز پیشنهاد شده، استفاده شده است. اما با توجه به این که در محدوده کوهرنگ، انتقال آب به خارج از حوضه از طریق دو تونل

کوهرنگ ۱ و ۲ صورت می‌گیرد، لازم است مقدار برداشت از این طریق به آبدی مشاهداتی ایستگاه‌های متأثر از آن شامل دزک‌آباد، کاج و ارمند اضافه گردد. پس از طی کلیه مراحل توضیح داده شده، داده‌های حاصل می‌توانند مبنای محاسبه نیاز آب زیست‌محیطی قرار گیرند.

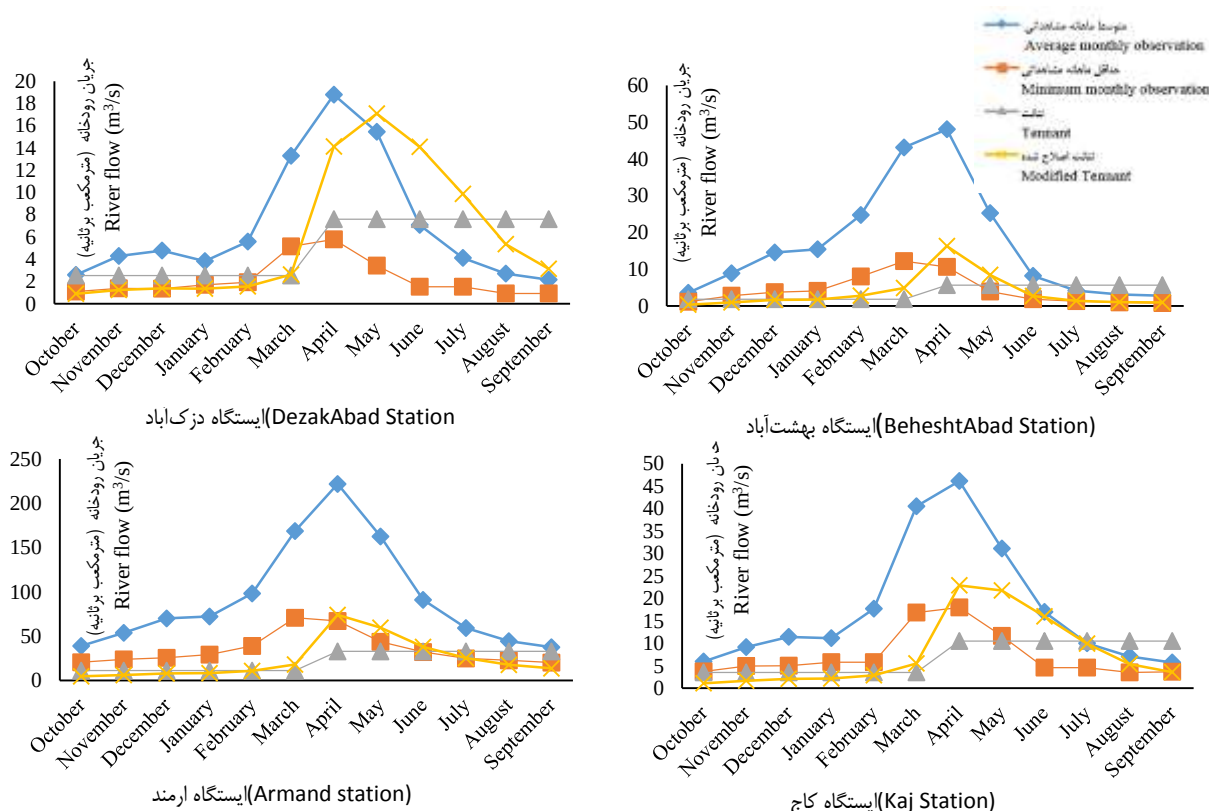
نتایج و بحث

با استفاده از داده‌های دبی جریان ماهانه در محل ایستگاه‌های مشخص شده، جریان آب زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه در محدوده مدنظر محاسبه شده است. جدول ۳ نتایج محاسبه جریان زیست‌محیطی مورد نیاز را براساس روش تنانت و برای وضعیت‌های مختلف نشان می‌دهد. برای وضعیت قابل قبول، حداقل جریان زیست‌محیطی به دو روش تنانت و تنانت اصلاح شده، محاسبه و نتایج حاصل در قالب شکل ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در برخی از موارد حداقل جریان ماهانه کمتر از حداقل جریان برای حفظ اکوسیستم رودخانه در وضعیت قابل قبول است. این مسئله در مورد ایستگاه دزک‌آباد به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. علت این است که بخشی از جریان آب طبیعی رودخانه در بالادست این ایستگاه از طریق تونل ۱ و ۲ کوهرنگ به خارج از حوضه منتقل می‌شود و بنابراین آبدی طبیعی و مشاهداتی آن اختلاف زیادی با یکدیگر دارد. متوسط حداقل جریان زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه به ترتیب براساس روش تنانت و تنانت اصلاح شده برای ایستگاه‌های مختلف عبارت است از: ایستگاه بهشت‌آباد ۳/۸۰ و ۳/۶۲ متر مکعب بر ثانیه، ایستگاه دزک‌آباد ۵/۰۶ و ۶/۰۷، ایستگاه کاج ۶/۹۹ و ۷/۹۱، ایستگاه کاج (با نادیده گرفتن انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ) ۳/۵۵ و ۳/۷۲، ایستگاه ارمند ۲۲ و ۲۳/۶۷ متر مکعب بر ثانیه. نکته قابل توجه این است که هرچند مقادیر متوسط حداقل جریان زیست‌محیطی پیشنهادی با استفاده از این دو روش تقریباً نزدیک به یکدیگر است، اما مقدار ماهانه پیشنهادی توسط آن‌ها در برخی از ماه‌ها اختلاف زیادی با یکدیگر دارد. نتایج ایستگاه کاج (بر روی رودخانه کوهرنگ) نشان می‌دهد در صورتی که انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ به خارج از این محدوده در آبدی طبیعی رودخانه لحاظ نشود، حداقل نیاز آب زیست‌محیطی رودخانه کوهرنگ تقریباً نصف حالت قبل به دست می‌آید.

جدول ۳- جریان زیست محیطی رودخانه ها با استفاده از روش تنانت (m^3/s)

Table 3- River environmental flow based on Tennant method

وضعیت جریان (Description of flows)	رودخانه بهشت آباد (ایستگاه بهشت آباد) BeheshtAbad River (BeheshtAbad Station)		رودخانه کوهرنگ (ایستگاه دزک آباد) Koohrang River (DezakAbad Station)		رودخانه کوهرنگ (ایستگاه کاج) Koohrang River (Kaj Station)		رودخانه کارون (ایستگاه ارمند) Karun River (Armand Station)	
	Oct- Mar		Oct- Mar		Oct- Mar		Oct- Mar	
	Apr- Sep		Apr- Sep		Apr- Sep		Apr- Sep	
شست و شوی سریع یا حداکثر (Flushing or maximum)	38.05	38.05	50.62	50.62	69.91	69.91	220.06	220.06
محدوده بهینه (Optimal range)	11.42-19.03	11.42-19.03	15.18-25.31	15.18-25.31	20.97-34.95	20.97-34.95	66.02-110.03	66.02-110.03
بسیار عالی (Outstanding)	7.61	11.42	10.12	15.18	13.98	20.97	44.01	66.02
عالی (Excellent)	5.71	9.51	7.59	12.65	10.49	17.48	33.01	55.01
خوب (Good)	3.81	7.61	5.06	10.12	6.99	13.98	22.01	44.01
قابل قبول (Fair or degrading)	1.90	5.71	2.53	7.59	3.50	10.49	11.00	33.01
ضعیف (Poor)	1.90	1.90	2.53	2.53	3.50	3.50	11.00	11.00
بسیار ضعیف (Severe degradation)	<1.90	<1.90	<2.53	<2.53	<3.50	<3.50	<11.00	<11.00



شکل ۲- حداقل جریان زیست محیطی رودخانه ها با استفاده از روش تنانت
Figure 2- Minimum environmental flow based on Tennant method

رودخانه در برخی از ماه‌ها اختلاف چندانی با Q_{95} ندارد و حتی در مواردی از آن کمتر شده است. همان‌طور که قبلاً گفته شد در بسیاری از مراجع Q_{90} ، به عنوان نرم جریان حداقل رودخانه مورد توافق است (۵). در مطالعه حسین‌پور (۸) که در حوضه کارون صورت گرفته و ایستگاه‌های بهشت‌آباد، دزک‌آباد و ارمند را نیز مورد بررسی قرار داده، نتایج حاصل از Q_{75} به عنوان حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ها انتخاب شده است؛ بنابراین حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه‌های بهشت‌آباد (ایستگاه بهشت‌آباد)، کوه‌رنگ (ایستگاه دزک‌آباد) و کارون (ایستگاه ارمند) در ماه‌های مختلف به ترتیب در محدوده‌ی $(۲۱/۶ - ۱/۲۹)$ ، $(۸/۵ - ۱/۴)$ و $(۹۸/۳ - ۲۱/۸)$ مترمکعب بر ثانیه پیشنهاد شده است. این نتایج برای ایستگاه بهشت‌آباد و ارمند تقریباً مشابه نتایج حاصل از Q_{95} در مطالعه حاضر می‌باشد. این تفاوت ممکن است به این دلیل باشد که در مطالعه حسین‌پور (۸)، دوره آماری مورد استفاده ۲۲ سال است و همچنین به‌نظر می‌رسد داده‌های دبی رودخانه‌ها، طبیعی‌سازی نشده‌اند. با توجه به برداشتها و تغییراتی که تاکنون در محدوده مورد بررسی صورت گرفته است، استفاده از نتایج Q_{75} که نشان‌دهنده وضعیتی است که تغییرات به صورت جزئی بوده و شرایط تا حد زیادی دست‌نخورده‌اند، برای انتخاب به عنوان حداقل جریان آب زیست‌محیطی پیشنهادی مطالعه حاضر مناسب نمی‌باشد.

جدول ۴ نشان می‌دهد در طول دوره‌های مورد بررسی، در چند درصد از سال‌ها جریان ماهانه رودخانه کمتر از حداقل نیاز زیست‌محیطی آن بوده است. برای مثال در ایستگاه بهشت‌آباد براساس روش تنانت اصلاح شده در حدود ۵/۹ درصد از ۳۴ سال مورد بررسی، در ماه آوریل جریان مشاهداتی در ایستگاه کمتر از نیاز آب زیست‌محیطی برای حفظ رودخانه در شرایط قابل قبول بوده است. با توجه به نتایج حاصل به‌نظر می‌رسد روش تنانت که بر مبنای درصدی از متوسط جریان سالانه، نیاز آب زیست‌محیطی را تعیین می‌کند، حداقل برای استفاده در ماه‌های کم‌آب سال مناسب نیست، زیرا در اکثر سال‌های مورد بررسی مقدار پیشنهادی آن در این ماه‌ها، بیشتر از متوسط جریان ماهانه است و روش تنانت اصلاح شده نتایج واقعی‌تری را حاصل می‌نماید. لازم به ذکر است که بیشتر سال‌هایی که نیاز آب زیست‌محیطی رودخانه تأمین نشده است، سال‌های ۲۰۰۷-۲۰۰۸ به بعد می‌باشد که منطقه با خشکسالی خفیف تا متوسط (براساس شاخص SDI طرح آمایش استان چهارمحال و بختیاری) مواجه بوده است.

در جدول ۵ شاخص‌های منحنی تداوم جریان برای ایستگاه‌های مورد بررسی ارائه شده است. محاسبه این شاخص‌ها به روش مشابه برای ماه‌های مختلف و مقایسه آن با مقادیر جریان مشاهداتی در دوره‌های مورد بررسی (شکل ۳) نشان می‌دهد که متوسط جریان

جدول ۴- عدم تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها براساس روش تنانت (درصد)

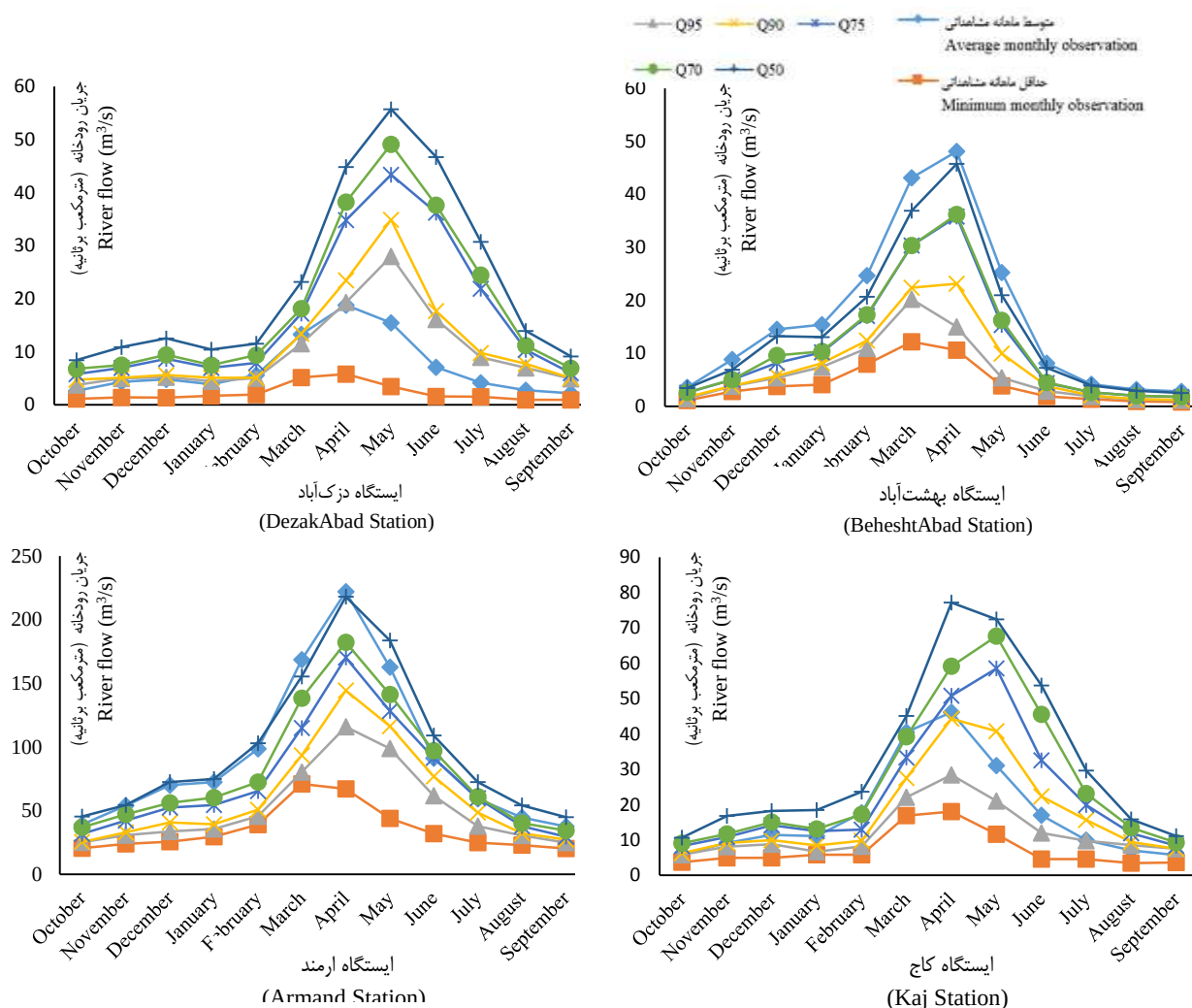
Table 4- Failure to meet the minimum environmental water requirements based on Tennant method (percentage)

ایستگاه (Station)	روش (Method)	مهر Oct	آبان Nov	آذر Dec	دی Jan	بهمن Feb	اسفند Mar	فروردین Apr	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug	شهریور Sep
بهشت‌آباد (BeheshtAbad)	تنانت (Tennant)	17.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	47.1	73.5	88.2	91.2
	تنانت اصلاح‌شده (Modified Tennant)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	8.8	5.9	2.9	8.8	8.8
دزک‌آباد (DezakAbad)	تنانت (Tennant)	69.7	45.5	27.3	30.3	12.1	0.0	9.1	27.3	75.8	90.9	100.0	100.0
	تنانت اصلاح‌شده (Modified Tennant)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	20.0	55.0	65.0	30.0	0.0
کاج (Kaj)	تنانت (Tennant)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	65.0	90.0	100.0
	تنانت اصلاح‌شده (Modified Tennant)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	20.0	55.0	65.0	30.0	0.0
ارمند (Armand)	تنانت (Tennant)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	21.4	31.0	33.3
	تنانت اصلاح‌شده (Modified Tennant)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.38	2.38	4.76	2.38	0.00	0.00

جدول ۵- شاخص‌های منحنی تداوم جریان سالیانه (m^3/s)

Table 5- Indicators of annual flow duration curve (m^3/s)

ایستگاه (Station)	Q_{50}	Q_{70}	Q_{75}	Q_{90}	Q_{95}
بهشت‌آباد (BeheshtAbad)	9.969	4.975	4.360	2.342	1.960
دزک‌آباد (DezakAbad)	17.177	10.361	9.394	6.317	5.101
کاج (Kaj)	23.971	15.640	13.200	9.413	8.320
ارمند (Armand)	82.945	56.296	52.097	37.799	30.620

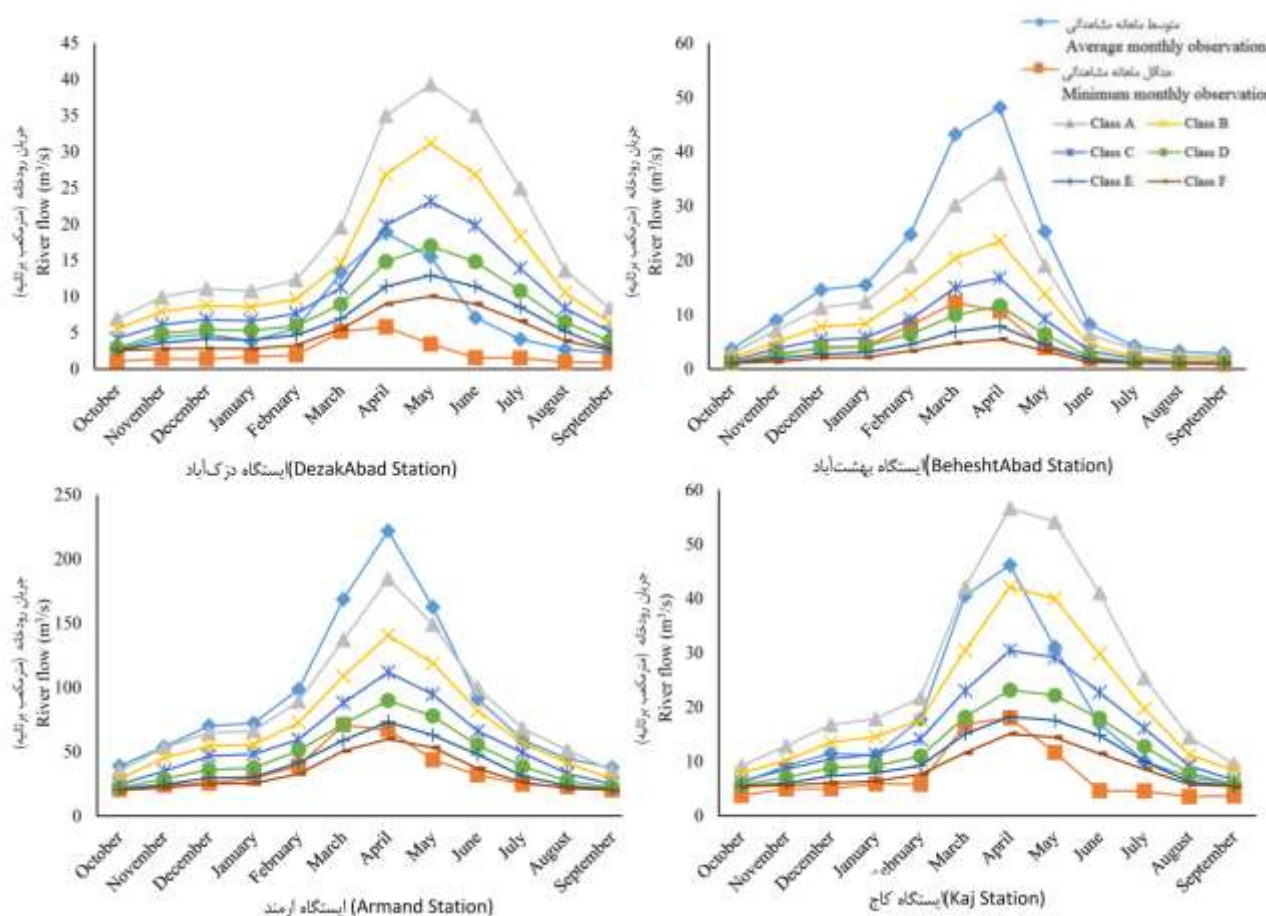


شکل ۳- مقایسه متوسط و حداقل جریان ماهانه مشاهداتی با شاخص‌های منحنی تداوم جریان
Figure 3- Comparison of average and minimum monthly flow with indicators of the flow duration curve

ماه‌های اکتبر، جریان رودخانه کمتر از مقدار آب پیشنهادی برای حفظ رودخانه در وضعیت کلاس C بوده است. نحوه استفاده از نتایج ذیل بسته به هدف مدیریت حوضه می‌تواند متفاوت باشد. در خصوص ایستگاه دزک آباد، علت درصد بالای عدم تأمین نیاز زیست محیطی رودخانه، همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، طبیعی‌سازی داده‌های این ایستگاه براساس برداشت آب در بالادست آن از طریق تونل‌های کوهرنگ و انتقال آب به خارج از حوضه می‌باشد. بنابراین داده‌های مشاهده‌ای در محل این ایستگاه اختلاف زیادی با داده‌های جریان طبیعی رودخانه دارد و از لحاظ مقدار جریان، رودخانه به مقدار زیادی تغییر یافته و تحت تأثیر قرار گرفته است. داده‌های ایستگاه‌های کاج و ارمند نیز تحت تأثیر انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ قرار گرفته‌اند اما به دلیل این که این ایستگاه‌ها در پایین دست ایستگاه دزک آباد قرار دارند و رودخانه‌ها و جریان‌ات دیگری به آن‌ها می‌پیوندند، دبی بیشتری دارند و کمتر متأثر شده‌اند.

با استفاده از روش انتقال منحنی تداوم جریان، می‌توان نیاز آب زیست محیطی رودخانه‌ها را برای کلاس‌های مختلف مدیریتی تعیین نمود. نتایج حاصل از به کارگیری این روش در شکل ۴ نشان داده شده است. در مورد رودخانه بهشت آباد، مقدار حداقل متوسط ماهانه مشاهداتی بیانگر این است که در مواردی وضعیت رودخانه در محدوده ایستگاه بهشت آباد حتی از وضعیت D نیز پایین تر قرار گرفته است. برای این که بتوان مقایسه بهتری داشت، در جدول ۶ مقایسه‌ای بین جریان زیست محیطی پیشنهادی براساس کلاس‌های C به بعد و جریان مشاهده‌ای رودخانه صورت گرفته است. اعداد جدول نشان می‌دهد که در دوره‌های مورد بررسی در چند درصد از موارد، جریان رودخانه کمتر از نیاز زیست محیطی آن بوده است.

همان‌طور که براساس نتایج جدول ۶ مشاهده می‌شود، برای مثال در رودخانه بهشت آباد از ۳۴ سال مورد بررسی، در ۸/۸ درصد از سال‌ها در



شکل ۴- جریان زیست‌محیطی رودخانه براساس روش انتقال منحنی تداوم جریان برای کلاس‌های مختلف زیست‌محیطی
Figure 4- River environmental flow for different environmental management classes based on flow duration curve shifting method

است بخشی از آن به دلیل برداشت آب برای مصارف کشاورزی باشد. با توجه به این‌که مطالعاتی که از روش انتقال منحنی تداوم جریان برای برآورد حداقل جریان زیست‌محیطی رودخانه‌ها در محدوده مدنظر این مطالعه استفاده کرده باشد یافت نشد، امکان مقایسه نتایج وجود ندارد. اما در مطالعات متعدد صورت گرفته در حوضه‌های دیگر، نتایج کلاس C به عنوان حداقل وضعیت اکولوژیکی قابل قبول گزارش شده است (۲، ۴، ۶، ۱۴ و ۱۵). این کلاس بیانگر وضعیت نسبتاً تغییر یافته است که از لحاظ اکولوژیکی زیستگاه‌ها و دینامیک بیوتا مختل شده‌اند اما عملکردهای اساسی اکوسیستم هنوز دست نخورده‌اند (۲۲). در خصوص ایستگاه بهشت‌آباد، نتایج حاصل از کلاس C، با نتایج حاصل از Q_{95} در روش FDC تطابق دارد. متوسط حداقل جریان زیست‌محیطی بر مبنای کلاس مدیریت زیستی C، $6/18$ و براساس Q_{95} ، $6/43$ مترمکعب بر ثانیه به دست آمده است. حداقل جریان پیشنهاد شده برای ماه‌های مختلف از $1/22$ مترمکعب بر ثانیه برای سپتامبر (شهریور) تا $16/75$ متر مکعب بر ثانیه برای آوریل (فروردین)

به منظور بررسی بیشتر، برای ایستگاه کاج محاسبات به دو صورت انجام شده است. در حالت اول آبدهی طبیعی با لحاظ اثر انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ مدنظر قرار گرفته اما در حالت دوم فرض شده است، با توجه به این‌که از اجرای این طرح‌ها سال‌های متمادی می‌گذرد، صرفاً وضعیت سال‌های اخیر رودخانه مدنظر قرار گیرد و آب زیست‌محیطی مورد نیاز با توجه به شرایط ۲۰ سال اخیر محاسبه گردد. مشاهده می‌شود که حتی بدون در نظر گرفتن انتقال آب کوهرنگ، در برخی از سال‌ها مقدار آب رودخانه کوهرنگ در محل ایستگاه کاج برای حفظ شرایط رودخانه در کلاس مدیریت زیستی C و یا حتی در برخی موارد D نیز کافی نبوده است. در خصوص رودخانه کارون، نتایج ایستگاه ارمند نشان می‌دهد که در موارد متعددی جریان مشاهده‌ای رودخانه کمتر از مقدار آب زیست‌محیطی مورد نیاز برای حفظ آن در کلاس زیستی C، بوده است. به نظر می‌رسد بیشترین کمبود آب زیست‌محیطی در محدوده این ایستگاه مربوط به دو ماه ژوئن و ژوئیه (از دهه دوم خرداد تا دهه اول مرداد) است؛ که ممکن

برمبنای کلاس C و ۲۰/۲۴ متر مکعب بر ثانیه برای مارس (اسفند) برمبنای Q₉₅ متغیر است. این نتایج به عنوان حداقل جریان زیست محیطی رودخانه بهشت آباد در نظر گرفته می شوند.

در خصوص ایستگاه دزک آباد، نتایج کلاس C و D نمی تواند به عنوان حداقل جریان زیست محیطی مورد نیاز مورد استفاده قرار گیرد؛ زیرا براساس تغییرات دبی مشاهداتی رودخانه نسبت به جریان طبیعی آن، وضعیت اکوسیستم در این قسمت به شدت تغییر یافته است. مقدار جریان پیشنهادی توسط Q₉₅ نیز در تمامی ماه ها به جز دو ماه پرآب فوریه و مارس (بهمن و اسفند)، بیشتر از متوسط جریان مشاهداتی رودخانه است. بنابراین روش FDC نیز برای این محدوده قابل کاربرد نمی باشد. حداقل نیاز زیست محیطی محاسبه شده برمبنای کلاس E و F در ماه های ژوئن تا سپتامبر (خرداد تا شهریور) و مقادیر محاسبه شده توسط روش تنانت اصلاح شده در ماه های مه تا سپتامبر (اردیبهشت تا شهریور) بیشتر از متوسط جریان مشاهداتی رودخانه در این ماه های می باشد. برای جلوگیری از تغییرات و تخریب بیشتر در این محدوده، می توان نتایج حاصل از کلاس E را به عنوان حداقل جریان زیست محیطی برای این بخش از رودخانه پیشنهاد کرد و با نظر کارشناسان برای ماه های کم آب تعدیل مناسب برای آن در نظر گرفت. اما بهتر است از روش های کامل تر که وضعیت زیستگاه و پارامترهای دیگری غیر از جریان رودخانه را در محاسبات لحاظ می نمایند، برای محاسبه جریان زیست محیطی مورد نیاز در این محدوده استفاده نمود. در مورد ایستگاه کاج، نتایج حاصل از کلاس D تقریباً مشابه نتایج Q₉₅ می باشد. اما همان طور که در جدول ۶ مشخص است، در تعداد زیادی از سال ها مقدار جریان متوسط ماهانه کمتر از حداقل نیاز زیست محیطی محاسبه شده برمبنای این روش می باشد. برآورد مجدد نتایج با نادیده گرفتن انتقال آب از طریق تونل های کوه رنگ و مقایسه آن با نتایج حاصل از جریان طبیعی رودخانه نشان می دهد که در این حالت حداقل نیاز زیست محیطی پیشنهادی برمبنای کلاس A تقریباً مشابه مقادیر پیشنهادی برمبنای کلاس D در حالت قبل (جریان طبیعی) است. حداقل جریانی که می توان برای این بخش از رودخانه در نظر گرفت، وضعیت کلاس C (با نادیده گرفتن اثر انتقال آب) می باشد که تقریباً معادل شرایط بحرانی براساس جریان طبیعی رودخانه است. بر این اساس حداقل جریان زیست محیطی پیشنهادی برای این محدوده (رودخانه کوه رنگ)، از ۳/۶۹ متر مکعب بر ثانیه برای سپتامبر (شهریور) تا ۱۶/۸۱ متر مکعب بر ثانیه برای آوریل (فروردین) متغیر می باشد.

در خصوص ایستگاه ارمند، کلاس C به دلیل تغییرات و

برداشت هایی که در بالادست رودخانه صورت گرفته است نمی تواند مبنای تعیین حداقل جریان زیست محیطی رودخانه کارون در این محدوده قرار گیرد. نتایج حاصل از کلاس D تقریباً با نتایج Q₉₅ مشابه است (به استثنای ماه های پرآب اسفند تا اردیبهشت). اما مقایسه حداقل جریان زیست محیطی پیشنهادی در این کلاس با جریان متوسط ماهانه در سال های مختلف نشان می دهد که در سال هایی که خشکسالی خفیف وجود داشته است در بیش از ۵۰ درصد موارد، متوسط جریان رودخانه در ماه های ژوئن تا اگوست (خرداد تا مرداد) کمتر از حداقل جریان پیشنهادی بوده است. این درصد در شرایط خشکسالی شدید بیش از ۷۰ درصد می باشد. بنابراین نتایج حاصل از کلاس E به عنوان حداقل جریان زیست محیطی رودخانه کارون در این محدوده پیشنهاد می شود که از ۲۰/۸ متر مکعب بر ثانیه برای ماه های سپتامبر و اکتبر (شهریور و مهر) تا ۷۳/۲۹ برای آوریل (فروردین) متغیر است. مقادیر پیشنهادی توسط این روش در ماه های آوریل تا اگوست و در ماه های سپتامبر تا فوریه به ترتیب تقریباً مشابه نتایج روش تنانت اصلاح شده و Q₉₅ می باشد.

نتیجه گیری

براساس نتایج روش های هیدرولوژیکی مورد استفاده در مطالعه حاضر، در بالادست محل در نظر گرفته شده برای سد بهشت آباد، حداقل جریان زیست محیطی مورد نیاز رودخانه بهشت آباد بین ۱/۲۲ متر مکعب بر ثانیه برای شهریور تا ۱۶/۷۵ متر مکعب بر ثانیه برای فروردین (برمبنای کلاس C روش انتقال منحنی تداوم جریان) برآورد شده است. حداقل جریان زیست محیطی برآورد شده برای رودخانه کوه رنگ نیز از ۳/۶۹ متر مکعب بر ثانیه برای شهریور تا ۱۶/۸۱ متر مکعب بر ثانیه برای فروردین متغیر می باشد. در پایین دست سد نیز رودخانه کارون به حداقل جریان ۲۰/۸ متر مکعب بر ثانیه برای ماه های شهریور و مهر تا ۷۳/۲۹ متر مکعب بر ثانیه برای ماه فروردین نیاز دارد (برمبنای کلاس E روش انتقال منحنی تداوم جریان). با توجه به نتایج روش های مختلف مورد استفاده در این مطالعه، درصد تأمین نیاز آب زیست محیطی در ایستگاه های مورد بررسی در سال ها و ماه های مختلف متفاوت بوده و جریان آب پایدار برای تأمین کلیه نیازهای زیست محیطی رودخانه در این محدوده وجود نداشته است؛ بنابراین توجه به نیاز آب زیست محیطی در تصمیم گیری های مربوط به طرح های توسعه و انتقال آب از این محدوده، بسیار حائز اهمیت است.

جدول ۶- عدم تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه‌ها برای کلاس‌های مختلف مدیریت زیست‌محیطی (درصد)

Table 6- Failure to meet the river environmental water requirements in different environmental management classes (percentage)

ایستگاه Station	کلاس Class	مهر Oct	آبان Nov	آذر Dec	دی Jan	بهمن Feb	اسفند Mar	فروردین Apr	اردیبهشت May	خرداد Jun	تیر Jul	مرداد Aug	شهریور Sep
بهشت‌آباد (BeheshtAbad)	C	8.8	17.6	11.8	2.9	5.9	2.9	5.9	8.8	20.6	20.6	11.8	11.8
	D	2.9	0.0	2.9	2.9	0.0	0.0	5.9	5.9	5.9	0.0	8.8	8.8
	E	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.0	0.0	8.8	8.8
	F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	8.8
دزک‌آباد (DezakAbad)	C	97.0	78.8	78.8	90.9	87.9	60.6	63.6	84.8	97.0	97.0	100.0	100.0
	D	78.8	75.8	75.8	78.8	63.6	39.4	42.4	81.8	93.9	97.0	97.0	90.9
	E	72.7	63.6	57.6	63.6	54.5	21.2	24.2	66.7	90.9	93.9	93.9	81.8
	F	69.7	57.6	33.3	36.4	18.2	9.1	18.2	45.5	87.9	90.9	81.8	75.8
کاج (Kaj)	C	60.0	65.0	60.0	65.0	50.0	25.0	20.0	50.0	80.0	90.0	75.0	70.0
	D	60.0	45.0	40.0	45.0	20.0	5.0	10.0	20.0	65.0	70.0	65.0	55.0
	E	45.0	20.0	25.0	40.0	15.0	0.0	5.0	15.0	35.0	65.0	45.0	45.0
	F	45.0	10.0	20.0	25.0	10.0	0.0	0.0	10.0	25.0	50.0	45.0	45.0
کاج (صرف‌نظر از انتقال آب از طریق تونل‌های کوهرنگ) Kaj (ignore Koohrang tunnels)	C	10.0	5.0	20.0	15.0	15.0	0.0	0.0	5.0	15.0	15.0	15.0	5.0
	D	0.0	0.0	5.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0	5.0	10.0	5.0	0.0
	E	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0
	F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	0.0	0.0	0.0
ارمند (Armand)	C	19.0	21.4	26.2	16.7	21.4	14.3	9.5	26.2	33.3	38.1	31.0	21.4
	D	4.8	7.1	7.1	9.5	14.3	2.4	2.4	11.9	28.6	31.0	21.4	7.1
	E	2.4	2.4	2.4	2.4	4.8	0.0	2.4	4.8	23.8	19.0	7.1	4.8
	F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	4.8	2.4	0.0	0.0

وابستگی که در حوضه مقصد به منابع آب انتقالی ایجاد می‌شود، در سال‌هایی که آب برنامه‌ریزی شده برای حوضه مقصد نتواند در حوضه مبدأ تولید شود، آثار منفی و مناقشاتی را در هر دو حوضه به دنبال خواهد داشت. براساس نتایج این مطالعه مشاهده می‌شود که عدم تأمین آب زیست‌محیطی مورد نیاز رودخانه بیشتر در فصل کم‌آب سال اتفاق می‌افتد بنابراین در صورتی که الزام به اجرای طرح‌های توسعه منابع آب باشد، لازم است در تصمیم‌گیری‌های مربوط به تخصیص آب توجه ویژه‌ای به نیاز زیست‌محیطی رودخانه در ماه‌های مربوطه شود.

همچنین لازم است به این مسئله توجه شود که در طی دوره‌ی مورد بررسی، سال‌هایی که منطقه با وضعیت خشکسالی متوسط یا خفیف مواجه بوده، نیاز آب زیست‌محیطی رودخانه به‌طور کامل تأمین نشده است، این مسئله در مواردی که خشکسالی شدیدتری اتفاق افتد، حادثر خواهد بود؛ بنابراین آب مازاد فعلی حوضه ممکن است نتواند منبع پایداری برای انتقال به حوضه دیگر باشد. زیرا در مواردی که آب زیست‌محیطی مورد نیاز تأمین نشود عملکردهای اساسی اکوسیستم تحت تأثیر قرار می‌گیرند و در صورت تداوم آن و عدم تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی، ممکن است تأثیرات مخرب برگشت‌ناپذیری بر اکوسیستم حوضه مبدأ و پایین‌دست داشته باشد. همچنین به دلیل

منابع

- 1- Ataie Kachouie Z. 2018. Calculation and assessment of environmental flow using hydraulic and hydrological methods (Case study: Dez diversion check dam to Karun River). M.Sc thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract)
- 2- Bayat S., Ebrahimi K., Araghinejad Sh., and Yasi M. 2019. Comparison of the environmental flow assessment methods involving case studies of Karaj and Talar Rivers. Iranian Journal of Watershed Management Science 13(45): 77-86. (In Persian with English abstract)
- 3- Caissie D., and El-Jabi N. 1995. Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada. Canadian Journal of Civil Engineering 22(2): 235-246.
- 4- Dubey A., Singh O., Shekhar S., and Pohshna C. 2019. Assessment of environmental flow requirement using environmental management classes-flow duration curve for Narmada River. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 8(1): 891-897.
- 5- DWAf. 1997. White paper on a national Water Policy for South Africa, Pretoria, South Africa, Department of Water Affairs and Forestry.
- 6- Esmaili K., Sadeghe Z., Kaboli A., and Shafaei H. 2018. Application hydrological methods for estimating river environmental water rights (Case Study of Gorganroud River). Journal of Natural Environmental (Iranian Journal

- of Natural Resources) 71(4): 437-451. (In Persian with English abstract)
- 7- Habibi Alagöz S. 2017. River Environmental Flow. Sumer Publisher. Tabriz. (In Persian)
- 8- Hosseinpour D. 2018. Estimation of environmental flow in some rivers of northern Karoun basin using hydrological and hydraulic methods. M.Sc thesis. Shahrekord University. (In Persian with English abstract)
- 9- Isazadeh M., Mohammadi P., and Dinpazhoh Y. 2018. Evaluation of artificial neural network and multiple linear regression models to estimate the daily missing data flow (runoff) (case study: Santez gauging station- Kordestan province). Journal of Water and Soil Science 21(4): 143-159. (In Persian with English abstract)
- 10- Kim S. K., and Choi S.U. 2019. Comparison of environmental flows from a habitat suitability perspective: A case study in the Naeseong-cheon Stream in Korea. Ecohydrology 12(6): e2119.
- 11- Mazvimavi D., Madamombe E., and Makurira H. 2007. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe. Journal of Physics and Chemistry of the Earth 30: 639-647.
- 12- Ministry of Energy. 2012. Guideline for Finding Aquatic Ecosystems Environmental Water Requirement. No 557. (In Persian)
- 13- Ministry of Energy. 2013. Update studies of the comprehensive plan of water resources: Karun basin integration report. (In Persian)
- 14- Mostafavi S., and Yasi M. 2015. Evaluation of environmental flows in rivers using hydrological methods (Case study: The Barandozchi River- Urmia Lake Basin). Journal of Water and Soil 29(5): 1219-1231. (In Persian with English abstract)
- 15- Naderi M.H., Zakerinia M., and Salarijazi M. 2020. Design and analysis of optimal ecological flow regime Zarrin-Gol River using hydrological and ecohydraulic habitat simulation model. Water and Soil 34(3): 515-532.
- 16- Naghidi R., Shayannezhad M., and Sadati Nejad S.J. 2010. Comparison of different methods for estimating of monthly discharge missing data in grand Karoon River basin. Journal of Watershed Management Research 1(1): 59-71. (In Persian with English abstract)
- 17- Poff N.L. 1996. A hydro geography of unregulated streams in United States and an examination of scale-dependence in some hydrological descriptors. Freshwater Biology 36: 71-91.
- 18- Pour Sattar S. 2016. Karun River environmental flow calculation and evaluation from Mollasani to Darkhovin. M.Sc thesis. Shahid Chamran University of Ahvaz. (In Persian with English abstract)
- 19- Pyrcz R. 2004. Hydrological low flow indices and their uses. Watershed Science Centre. WSC Report No. 04, Trent University, Peterborough, Ontario, 33p.
- 20- Shaeri Karimi S., Yasi M., and Eslamian S. 2012. Use of hydrological methods for assessment of environmental flow in a river reach. International Journal of Environmental Science and Technology 9: 549-558.
- 21- Smakhtin V. 2001. Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology 240: 147-186.
- 22- Smakhtin V., and Anpuhas M. 2006. An assessment of environmental flow requirements of Indian River basins. IWMI Research Report 107. International water Management Institute. Colombo, Sri Lanka, 36p.
- 23- Smakhtin V., Revenga C., and Döll P. 2004. A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity. Water International 29(3): 307-317.
- 24- Tennant D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. Fisheries 1(4): 6-10.
- 25- Walker K.F., Sheldon F., and Puckridge J.T. 1995. A perspective on dryland river ecosystems. Regulated Rivers 11: 85-104.
- 26- Wallingford H.R. 2003. Handbook for the Assessment of Catchment Water Demand and Use. 248p.



Environmental Flow Assessment of Karun River in Upstream and Downstream of Beheshtabad Dam

F. Hayatgheibi¹- N. Shahnoushi^{2*}- B. Ghahreman³- H. Samadi Borujeni⁴- M. Ghorbani⁵- M. Sabouhi Sabouni⁶

Received: 25-11-2020

Accepted: 11-04-2021

Introduction: The development of water resources in many cases has led to increased economic welfare, improved living and health standards, food production, etc. However, in some cases due to the insufficient attention to all aspects of these projects, the irreparable environmental effects and subsequent social and economic effects have been imposed on society. Paying attention to environmental water requirements is one of the most important issues in decision making in water resources development plans. The objective of this study is to assess river environmental water requirements in upstream and downstream of Beheshtabad Dam. Beheshtabad Dam has designed to build on the Karun River for water transfer from Karun to Zayanderood basin. But it has not been implemented due to the various problems and challenges.

Materials and Methods: Protecting and restoring river flow regimes and hence, the ecosystems they support by providing environmental flows has become a major aspect of river basin management. Environmental flows describe the quantity, timing, and quality of water flows required to sustain freshwater, estuarine ecosystems, the human livelihoods, and well-being that depend on these ecosystems. Over 200 approaches for determining environmental flows now exist and used or proposed for use in more than 50 countries worldwide. In the present study, hydrological methods have been used. These methods include Tennant and modified Tennant, Flow Duration Curve (FDC) and FDC shifting (for different environmental management classes). For this purpose, four hydrometric stations (three stations upstream and one station downstream of the dam) have been selected.

Results and Discussion: The results of the study showed that the river water flow had not been sufficient to meet environmental water requirements in several cases, especially in years when the region was experiencing mild to moderate drought conditions. According to the Tennant method, the minimum environmental flow requirement averages based on Beheshtabad, DezakAbad, Kaj, and Armand stations data were 3.80, 5.06, 6.99, 22.01 m³/s, respectively. Using the mentioned stations data, the minimum environmental flow requirement averages were 3.62, 6.07, 7.91, 23.67 m³/s based on the modified Tennant method. According to the flow duration curve method, minimum environmental flow requirements (Q₉₅) were 1.96, 5.1, 8.32, 30.62 m³/s, using data collected from Beheshtabad, DezakAbad, Kaj, and Armand stations, respectively. The results of the flow duration curve shifting method indicated that the river water flow did not meet the river environmental water requirements in different environmental management classes in some months and years. Comparative results of different methods revealed that the minimum environmental flow requirement of Beheshtabad River upstream of Beheshtabad Dam was 1.22-16.75 m³/s from September to April (based on FDC shifting method, class C). The estimated minimum environmental flow for Koohrang River was 3.69-16.81 m³/s from September to April. The downstream of the dam, Karun River requires a minimum flow rate of 20.8-73.29 m³/s from September and October to April (based on FDC shifting method, class E).

Conclusion: According to the results of various methods used in this study, the Karun River flow is not enough to meet the minimum river environmental water requirements in some years and months. Therefore, decision-makers must pay attention to the environmental water requirements in decisions related to the development plans and water transfer from this river. It should be noted that the river environmental water requirements have not been met completely when the region has experienced moderate or mild drought, which would be more acute in cases

1, 2, 5 and 6- Ph.D. Student and Professors, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

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

3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University
DOI: 10.22067/jsw.2021.67064.0

of more severe drought conditions. Therefore, the current surplus water of this basin may not be a sustainable source to transfer to another basin.

Keywords: Beheshtabad dam, Environmental water requirement, Hydrological methods, Karun River, Water transfer



مقاله پژوهشی

بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری

رضا سعیدی*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۲

چکیده

در این پژوهش حساسیت تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، در مراحل متمایز رشد و برای شرایط کاربرد مقادیر مختلف آب آبیاری بررسی شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل چهار سطح I_0 (۱۰۰)، I_1 (۸۰)، I_2 (۶۰) و I_3 (۴۰) درصد نیاز آبی گیاه و تیمارهای مراحل رشد شامل چهار مرحله‌ی اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد بود. تبخیر-تعرق روزانه گیاه بر اساس بیلان آب خاک در منطقه ریشه اندازه‌گیری شد. مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل رشد مذکور به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_0)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_1)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I_2)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I_3) اندازه‌گیری شد. مقدار عملکرد خشک ذرت در تیمارهای I_0 ، I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار بود. در کل دوره رشد و در سطوح آبیاری I_0 ، I_1 و I_2 مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت به ترتیب ۹۵/۶، ۸۵ و ۷۱/۶ درصد و مقدار عملکرد نسبی محصول به ترتیب ۹۲/۴، ۷۳/۷ و ۵۰/۹ درصد برآورد شد. در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی، از طریق مدل جنسن مدل‌سازی شد. به این صورت که برای داده‌های واقعی هر تیمار تحت تنش (I_1 الی I_3) و در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت، به ترتیب ضرایب حساسیت λ_1 الی λ_4 (موجود در مدل جنسن) توسط نرم‌افزار SPSS برآورد شد. میانگین ضرایب مذکور در تیمارهای تحت تنش به ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۰/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ تعیین شد. برای صحت‌سنجی مدل جنسن در تخمین عملکرد نسبی واقعی ذرت، از آماره‌های ارزیابی R^2 ، EF، RMSE، ME و CRM استفاده شد. آماره‌های مذکور به ترتیب برابر با ۰/۹۹۸، ۰/۹۸۶، ۲/۷۵۳، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده کارایی خوب مدل در تخمین عملکرد نسبی محصول بود. همچنین در سطوح مختلف آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک ذرت، رابطه‌ی $Y=69.935ET-12281$ با ضریب همبستگی ۰/۹۹۹ برآش داده شد. انتخاب مرحله‌ی رشد مناسب به منظور اعمال تنش آبی و سطح تنش وارده، تأثیر به‌سزایی در مقدار تبخیر-تعرق و تولید زیست‌توده گیاهی داشت. دستورالعمل کاربردی پژوهش این بود که با استفاده از مدل‌ها و روابط بین تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه، می‌توان بر اساس مقدار تبخیر-تعرق واقعی و تحت مدیریت در مراحل مختلف رشد، مقدار عملکرد واقعی محصول را تخمین زد. همچنین با توجه به تأثیر شدت تنش آبی بر کاهش تعرق گیاه و افزایش تبخیر از سطح خاک، استفاده از مالچ روی خاک به خصوص در مراحل اولیه و پایانی رشد قابل توصیه بود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد، کم‌آبیاری، مدل جنسن، مراحل رشد

مقدمه

بحران کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بر لزوم استفاده آب مطابق نیاز واقعی گیاه و با هدف افزایش بهره‌وری مصرف آب تأکید می‌نماید. کاربرد صحیح آب در بخش کشاورزی نیازمند اطلاع

دقیق از حساسیت‌های گیاه به تنش‌های محیطی و مدیریتی مانند تنش آبی می‌باشد. حساسیت گیاه به تنش آبی، ممکن است در مراحل مختلف رشد متفاوت بوده و اثر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق واقعی گیاه نسبت به شرایط پتانسیل (استاندارد) منطقه داشته باشد. با توجه به این که در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تنش کم‌آبی از عوامل اصلی محدود کننده عملکرد گیاهان زراعی می‌باشد. به همین دلیل محققان همواره در پژوهش‌های خود سعی داشته‌اند بررسی تحمل گیاه به کمبود آب را مدنظر قرار دهند (۱۷). از این‌رو انتخاب هر زمانی در دوره رشد گیاه برای اعمال یک حد مشخص از تنش آبی، ممکن است اثر متفاوتی بر مقدار عملکرد محصول داشته و بهره‌وری فیزیکی

۱- دکترای مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام‌خیمینی (ره)

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Saeidii@org.ikiu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2021.68147.1011

مصرف آب را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین در سطوح متنوع تنش آبی، می‌توان با بررسی حساسیت تبخیر-تعرق گیاه در مراحل مختلف رشد، راهکارهای مدیریتی برای مصرف بهینه‌ی آب ارائه نمود. با توجه به پژوهش‌های گذشته، دوره رشد گیاهان زراعی را می‌توان به چهار مرحله متمایز اولیه، توسعه گیاه، میانی و پایانی رشد تقسیم کرد. مرحله اولیه رشد از تاریخ کاشت بذر شروع شده و تا زمانی که پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد از سطح زمین را بپوشاند، ادامه می‌یابد. مرحله توسعه گیاه از زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصدی آغاز شده و تا زمان رسیدن به پوشش مؤثر گیاه ادامه دارد. پوشش مؤثر هنگامی است که به علت هم‌پوشانی برگ‌های بوته‌های هم‌جوار، بر روی سطح خاک به‌طور کامل سایه‌اندازی می‌شود. پایان این زمان برای بسیاری از گیاهان، مصادف با شروع گل‌دهی می‌باشد. مرحله میانی رشد از ادامه مرحله قبل شروع شده و تا ابتدای رسیدن بیولوژیک محصول ادامه دارد. در این مرحله، ضریب گیاهی تبخیر-تعرق (Kc) به بیشترین مقدار خود می‌رسد. مرحله پایانی رشد از رسیدگی بیولوژیک محصول آغاز شده و تا خشک شدن طبیعی اندام‌های گیاه (پلاسیدگی کامل) و برداشت آن ادامه می‌یابد. در این مرحله، ضریب گیاهی Kc کاهش یافته و تبخیر-تعرق گیاه نسبت به گیاه مرجع کم‌تر می‌شود (۲). در میان گیاهان زراعی که تحت کشت آبی قرار می‌گیرند، ذرت علوفه‌ای به‌عنوان یک نهاده دامی، نقش به‌سزایی در تأمین خوراک دام و طیور هر کشور داراست. از سوی دیگر به دلیل وجود مراحل فنولوژیک متمایز در دوره رشد ذرت و حساسیت متفاوت در آن‌ها، گیاه ذرت در پژوهش حاضر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در پژوهشی مقدار تبخیر-تعرق ذرت در شرایط اعمال تنش آبی بررسی شد. نتایج نشان داد با انجام آبیاری در سطح ۵۵ درصد نیاز آبی ذرت (کم‌آبیاری)، مقدار تبخیر-تعرق نسبت به شرایط آبیاری کامل حدود ۳۳ درصد کاهش یافت (۱۹). در تحقیق دیگر اعلام شد دوره‌های بحرانی اعمال تنش آبی بر ذرت شامل مراحل استقرار گیاهچه، دوره رشد سریع، مرحله گرده افشانی و پرشدن دانه بود. دلیل آن فرایندهای فیزیولوژیکی متفاوت در مراحل رشد ذرت بود که باعث تأثیر متفاوت تنش آبی بر روی عملکرد محصول می‌شد (۱۳). با بررسی کم‌آبیاری ذرت مشخص شد که مرحله‌ی گل‌دهی ذرت، حساس‌ترین مرحله به تنش آبی بود و اثر آن بر عملکرد محصول معنی‌دار بود. اما کم‌آبیاری در مرحله‌ی پرشدن دانه‌ها، اثر معنی‌داری بر رشد گیاه و تولید محصول نداشت (۴). در پژوهشی در شهرستان شاهرود تنش آبی با حذف یک مرحله آبیاری، در مراحل رشد رویشی، گل‌دهی و دانه‌بندی ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ اعمال شد. عملکرد بیولوژیک ذرت تحت تأثیر تیمارهای مذکور به ترتیب ۶۸، ۶۲/۲ و ۶۶/۴ تن بر هکتار برآورد شد. نتایج نشان داد تنش آبی در مرحله گل‌دهی نسبت به مرحله رشد رویشی، تأثیر بیشتری بر کاهش عملکرد محصول داشت. علت این بود که در مرحله گل‌دهی، علاوه بر ورود گیاه به مرحله زایشی که

امکان رشد مجدد و افزایش ارتفاع محدود شده بود، گیاه با افزایش دما نیز روبه‌رو شده بود (۱۲). در تحقیقی عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت تأثیر چهار سطح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد در تیمار ۶۰ درصد نیاز آبی به دلیل کاهش رشد رویشی و به تأخیر افتادن گرده افشانی و رسیدگی فیزیولوژیکی ذرت، کاهش عملکرد محصول معنی‌دار بود (۱). در تحقیقی در شمال‌غربی استان فارس، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مراحل رشد استقرار گیاه تا ظهور گل تاجی، ظهور گل تاجی تا خمیری شدن دانه و از خمیری شدن دانه تا رسیدگی، تحت سطوح آبیاری بدون تنش، تنش ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و تنش ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه قرار گرفت. نتایج نشان داد تنش شدید (۵۰ درصد نیاز آبی) در مرحله رشد رویشی، آسیب زیادی به گیاه وارد کرد به نحوی که با آبیاری کامل در مرحله گل‌دهی قابل جبران نبود. مرحله گل‌دهی و اوایل پرشدن دانه، حساس‌ترین مرحله به تنش خشکی در گیاه ذرت تشخیص داده شد. همچنین بعد از مرحله خمیری شدن دانه، با قطع آبیاری، کاهش عملکرد معنی‌داری مشاهده نشد (۶). در تحقیق دیگر گزارش شد که افزایش تنش آبی قبل از مرحله گل‌دهی ذرت، بر مقدار عملکرد و بهره‌وری مصرف آب بسیار مؤثر بود. به‌طوری که افزایش تنش قبل از گل‌دهی، بر شدت کاهش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب نسبت به مراحل دیگر رشد افزود (۳). آنچه در نتایج پژوهش‌های گذشته مشاهده شد، تأثیر مستقیم و معنی‌دار تنش آبی بر مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت در کل دوره رشد بود. اما تأثیر سطوح متفاوت تنش آبی بر مقدار تبخیر-تعرق ذرت طی مراحل متمایز دوره رشد، چندان مورد بررسی قرار نگرفت. به‌طور کلی هدف از این پژوهش بررسی حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی و واکنش عملکرد محصول به آن، در سطوح مختلف آبیاری می‌باشد. در پژوهش حاضر ضمن انجام هدف فوق، ضرایب حساسیت درون فصلی گیاه به تنش آبی نیز با استفاده از مدل جنسن^۱ مدل‌سازی شد. در تعداد محدودی از پژوهش‌های گذشته نیز، ضرایب تنش آبی مدل جنسن برای ذرت در بلژیک (۱۱)، برای عملکرد کل گیاه، وزن و قطر میوه گوجه‌فرنگی در چین (۱۰)، برای مراحل رشد سورگوم در آمریکا (۹) و مراحل رشد نیشکر در برزیل (۱۸) برآورد شد. به‌طور کلی در پژوهش حاضر با در نظر داشتن حساسیت متفاوت گیاه ذرت به تنش آبی طی مراحل مختلف رشد، امکان مدل‌سازی و تخمین دقیق‌تر عملکرد نسبی محصول ذرت در منطقه قزوین بررسی شد. به‌عبارت دیگر از طریق یک مدل جامع‌تر، برآورد عملکرد محصول بر اساس اعمال سطوح مختلف تنش آبی به‌صورت متوالی در کل دوره رشد و

یا کم آبیاری دوره‌ای، امکان‌پذیر شد. همچنین در مدیریت‌های کم آبیاری دوره‌ای با هدف دستیابی به حداکثر بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی مصرف آب، امکان شناسایی مرحله رشد مناسب برای اعمال تنش آبی فراهم شد.

مواد و روش‌ها

معرفی کلیات طرح آزمایشی

این پژوهش در منطقه قزوین و در موقعیت جغرافیایی با طول شرقی $50^{\circ}07'$ و عرض شمالی $36^{\circ}19'33''$ انجام شد. آب مورد نیاز برای انجام آبیاری از آب زیرزمینی با هدایت الکتریکی $0/47$ دسی‌زیمنس بر متر و اسیدیته $7/2$ تأمین شد. قبل از اجرای پژوهش، از نقاط مختلف مزرعه و از اعماق $30-60$ سانتی‌متر، نمونه خاک تهیه شد. آنالیز شیمیایی و فیزیکی بر روی نمونه‌ها، توسط آزمایشگاه خاک‌شناسی معتبر انجام شد و نتایج آن در جدول ۱ آورده شد. گیاه مورد مطالعه، ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود که در کرت‌هایی با ابعاد 3×3 متر و با فاصله ۲ متر از هم کاشته شد. هر کرت دارای پنج ردیف کشت جویچه‌ای با فاصله ۶۰ سانتی‌متر از

هم بود که به‌صورت سطحی آبیاری شد. بذرها با تراکم ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار در تاریخ ۲۴ خرداد ماه کاشته شد و زیست‌توده نهایی ذرت‌ها در تاریخ ۱۰ آبان ماه برداشت شد. دوره رشد گیاه مصادف با روزهای خشک سال بود و آمار بارندگی ثبت شده وجود نداشت. بنابراین نیاز آبی گیاه صرفاً از طریق آبیاری تأمین شد. بر اساس نتایج بررسی شیمیایی خاک، مصرف کودهای ازت (اوره)، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، گوگرد و کود دامی به‌ترتیب به مقدار ۳۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۱۵۰ و ۱۴۰۰۰ کیلوگرم بر هکتار توسط آزمایشگاه خاک توصیه شد. کود اوره در طول دوره کشت و بقیه کودها قبل از کشت به خاک اضافه شد. تیمارهای اصلی شامل چهار سطح آبیاری (I_0) ، (I_1) ، (I_2) ، (I_3) و (I_4) درصد نیاز آبی گیاه بود. تیمارهای فرعی شامل مقادیر تبخیر-تعرق گیاه در چهار مرحله‌ی رشد اولیه (P_0) ، توسعه (P_1) ، میانی (P_2) و پایانی (P_3) بود. کل دوره رشد ذرت ۱۴۰ روز بود و مراحل رشد مذکور به‌ترتیب برابر با ۲۵، ۴۰، ۴۵ و ۳۰ روز در نظر گرفته شد (۲). به‌طور کلی تیمارهای اصلی در سه تکرار و مجموعاً ۱۲ کرت، به‌صورت آزمایش فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی اعمال شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 1- Physical and chemical properties of farm soil

پارامتر Parameter	واحد Unit	عمق خاک (سانتی‌متر) Soil depth (cm)	
		0-30	30-60
قابلیت هدایت الکتریکی Electrical conductivity	dS.m ⁻¹	0.43	0.45
pH	-	7.3	7.2
کربن آلی Organic carbon	%	0.09	0.11
نیتروژن کل Total nitrogen	%	0.1	0.15
فسفر قابل جذب Available phosphorus	mg.kg ⁻¹	6	13
پتاسیم قابل جذب Available potassium	mg.kg ⁻¹	270	75
بافت خاک Soil texture	-	SL	SL
رس Clay	%	10	9
سیلت Silt	%	32	24
شن Sand	%	58	67
رطوبت جرمی در حد ظرفیت زراعی Moisture content at field capacity	%	23	24
رطوبت جرمی در نقطه پژمردگی Moisture content at wilting point	%	10	11
چگالی ظاهری Bulk density	g.cm ⁻³	1.61	1.54

تعیین حجم آب آبیاری

حجم آب آبیاری در تیمار آبیاری کامل (I_0)، با توجه به مقدار اختلاف رطوبت خاک در زمان آبیاری تا حد ظرفیت مزرعه (FC^1) تعیین شد. در این پژوهش رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه گیاه، به صورت روزانه با دستگاه بازتاب زمانی امواج (TDR^2) مدل TRIME-FM اندازه گیری شد. قبل از شروع آزمایش، دستگاه TDR از طریق برآورد مقادیر مختلف رطوبت خاک مزرعه مورد ارزیابی قرار گرفت و اعداد ثبت شده توسط آن، نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. از سوی دیگر به منظور حذف اثرات حاشیه ای، داده ی رطوبتی خاک از مرکز سطح هر کرت و از عمق توسعه ریشه گیاه برداشت شد. بنابراین بر اساس مقدار رطوبت مورد نیاز خاک (برای رسیدن به حد FC)، عمق ریشه گیاه و مساحت کرت، حجم آب آبیاری در تیمار I_0 از طریق رابطه (۱) محاسبه شد. با توجه به اهداف پژوهش، به تیمارهای I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب مقدار $0/8$ ، $0/6$ و $0/4$ حجم آب آبیاری کامل (تیمار I_0) اختصاص داده شد. مقدار حجم آب ورودی به هر کرت با کنتور حجمی کنترل شد. آب از مخزن مورد نظر توسط شیلنگ به کرت ها انتقال داده شد و آبیاری در جویچه ها به صورت سطحی انجام شد. آب به شکل یکنواخت در سطح هر کرت توزیع شد و با توجه به محصور بودن کرت ها توسط پشته ها و عدم خروج آب از آن ها، راندمان کاربرد آبیاری صد در صد بود.

$$V = \frac{(\theta_{FC} - \theta_m)}{100} \cdot \rho b \cdot D_{rz} \cdot A \quad (1)$$

V : حجم آب آبیاری (m^3)، θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در نقطه ظرفیت مزرعه (درصد)، θ_m : رطوبت وزنی خاک بلافاصله قبل از انجام آبیاری (درصد)، ρb : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)، D_{rz} : عمق ریشه گیاه (m) و A : مساحت کرت (m^2).

تعیین زمان انجام آبیاری

با توجه به تحقیقات گذشته، حد آب سهل الوصول خاک برای گیاه ذرت، در تمام مراحل رشد بین ۴۰ تا ۸۰ درصد گزارش شد (۸). از این رو در کرت های شاهد (آبیاری کامل) برای اطمینان از این که به گیاه ذرت حتی در حساس ترین دوره رشد هم تنش آبی وارد نمی شود، حد آب سهل الوصول خاک به مقدار ۴۰ درصد در نظر گرفته شد. یعنی پس از اتمام ۴۰ درصد از رطوبت بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی (PWP^3) در کرت های شاهد، آبیاری انجام شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP با استفاده از دستگاه های

صفحات فشاری و گرم خانه، محاسبه و در جدول ۱ ارائه شد.

برآورد تبخیر-تعرق

در فاصله ی بین دو آبیاری، مقدار رطوبت روزانه خاک در مرکز هر کرت و در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه گیری شد. با توجه به عدم وجود بارندگی در دوره کشت و نبود زهکشی یا جریان های ترجیحی در عمق خاک، روند کاهش رطوبت در عمق ریشه متأثر از فرایند تبخیر-تعرق گیاهان بود. بنابراین مقدار تبخیر-تعرق گیاهان در واحد سطح، با توجه به بیلان آب خاک در شکل ۱ و از طریق رابطه (۲) برآورد شد.

$$(ET_c)_i = (\theta_{i-1} - \theta_i) \cdot \rho b \cdot D_{rz} \quad (2)$$

$(ET_c)_i$: تبخیر-تعرق روزانه گیاه (cm)، θ : مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد)، i : شمارنده روزهای بین دو آبیاری، $(\theta_{i-1} - \theta_i)$: اختلاف رطوبت روزانه خاک (درصد)، ρb : چگالی ظاهری خاک ($g \cdot cm^{-3}$)، D_{rz} : عمق ریشه گیاه (cm).

اندازه گیری عملکرد محصول و تحلیل آماری

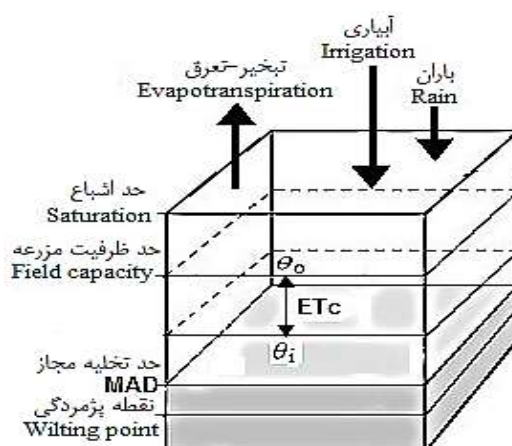
در تاریخ ۱۰ آبان ماه عملیات برداشت محصول انجام شد. برای اندازه گیری وزن زیست توده محصول ذرت، بوته های هر کرت از کف زمین بریده شد و برای خشک شدن به آزمایشگاه منتقل شد. به این صورت که بوته ها به مدت ۴۸ ساعت در داخل گرم خانه قرار داده شد و در دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به طور کامل خشک شد. وزن کل بوته های خشک شده در واحد سطح، به عنوان عملکرد زیست توده خشک ذرت در نظر گرفته شد. از سوی دیگر تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده های مربوط به مقدار تبخیر-تعرق و عملکرد زیست توده خشک محصول، توسط نرم افزار SPSS و با آزمون چند دامنه ای دانکن انجام شد.

مدلسازی ضرایب حساسیت تبخیر-تعرق به تنش آبی

در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی ذرت به تنش آبی، از طریق مدل چنسن (رابطه ۳) مدل سازی شد (۹). با استفاده از داده های واقعی تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه، ضرایب مذکور در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت (λ_1 الی λ_4) به وسیله نرم افزار SPSS تعیین شد. برای مدل سازی دقیق تر، ضرایب مذکور در سطوح مختلف تنش آبی (I_1 الی I_3) به طور مجزا تعیین شد. به این ترتیب در مجموع تعداد ۱۲ ضریب λ در این پژوهش برآورد شد.

$$\frac{Y}{Y_m} = \left(\frac{ET_1}{ET_{m1}} \right)^{\lambda_1} \times \left(\frac{ET_2}{ET_{m2}} \right)^{\lambda_2} \times \left(\frac{ET_3}{ET_{m3}} \right)^{\lambda_3} \times \left(\frac{ET_4}{ET_{m4}} \right)^{\lambda_4} \quad (3)$$

- 1- Field Capacity
- 2- Time Domain Reflectometer
- 3- Permanent Wilting Point



شکل ۱- بیلان رطوبتی خاک تحت تأثیر فرایند تبخیر-تعرق گیاه
Figure 1- Soil water balance under the effect of crop evapotranspiration process

صفر) بودن آماره‌های RMSE، ME و CRM و نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2 و EF، نشان‌دهنده همبستگی بهتر بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی بود. معادلات مربوط به آماره‌های ارزیابی در روابط (۴) الی (۸) ارائه شد (۱۴). حروف O^e و P^v در معادلات مذکور، به‌ترتیب بیانگر داده‌های مشاهده‌ای در مزرعه و پیش‌بینی شده توسط مدل جنسن بود.

$$ME = \max |P_i - O_i|_{i=1}^n \quad (4)$$

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

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (P_i - \bar{P}))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (6)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (7)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (8)$$

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق

در این پژوهش مقادیر تبخیر-تعرق ذرت، تحت سطوح متفاوت آبیاری و در مراحل مختلف رشد اندازه‌گیری شد. تأثیر مقدار آب آبیاری و مرحله رشد بر مقدار تبخیر-تعرق ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقادیر تبخیر-تعرق در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به‌ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_0)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر

Y: مقدار عملکرد محصول ذرت در تیمار تنش آبی (kg. ha^{-1})، حداکثر عملکرد محصول ذرت در تیمار بدون تنش آبی یا تیمار آبیاری کامل (kg. ha^{-1})، ET_1 الی ET_4 : تبخیر-تعرق واقعی ذرت (mm) به‌ترتیب در چهار مرحله اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد تحت شرایط تنش آبی، ET_{m1} الی ET_{m4} : حداکثر تبخیر-تعرق ذرت (mm) در مراحل رشد مذکور و در شرایط بدون تنش آبی، λ_1 الی λ_4 : ضرایب حساسیت درون فصلی گیاه ذرت به تنش آبی در مراحل رشد مذکور می‌باشد.

در هر سطح کم آبیاری، براساس مقادیر واقعی عملکرد و تبخیر-تعرق گیاه طی مراحل رشد، عمل واسنجی و تعیین ضرایب (۸) مدل جنسن انجام شد. در مرحله‌ی بعد برای ارزیابی و صحت‌سنجی عملکرد مدل، مقادیر واقعی تبخیر-تعرق نسبی گیاه در چهار مرحله رشد ($\frac{ET_i}{ET_{mi}}$)، در مدل به‌دست آمده قرار داده شد و مقدار عملکرد نسبی محصول ($\frac{Y}{Y_m}$) تخمین زده شد. در این شرایط دو دسته داده‌ی عملکرد نسبی محصول در سطوح کم آبیاری ایجاد شد. یک دسته مربوط به داده‌های واقعی (مشاهده‌ای) در سطح مزرعه و یک دسته هم مربوط به داده‌های تولید شده توسط مدل (تخمینی) بود. بنابراین با داشتن داده‌های (عملکرد نسبی) مشاهده‌ای در مزرعه و تخمین زده شده توسط مدل، کارایی مدل جنسن صحت‌سنجی شد. برای این کار از آماره‌های ارزیابی شامل حداکثر خطا^۱ (ME)، ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE)، ضریب تعیین^۳ (R^2)، کارایی مدل‌سازی^۴ (EF) و ضریب باقیمانده^۵ (CRM) استفاده شد. حداقل (نزدیک به

1- Maximum Error

2- Root of Mean Squared Error

3- Coefficient of determination

4- modeling Efficiency

5- Coefficient of Residual Mass

6- Observation

7- Predict

درصدی در مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت شد (شکل ۳). در تحقیقی مشابه در دشت‌های مرکزی آمریکا، مقدار تبخیر-تعرق ذرت تحت تیمارهای آبیاری شامل ۱۰۰، ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد اعمال کم‌آبیاری (تنش آبی) در طول دوره رشد گیاه، باعث کاهش مقدار تبخیر-تعرق ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل شد. به‌طوری که مقدار تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به‌ترتیب ۶۴۸، ۵۶۷، ۵۲۴، ۵۰۷، ۴۲۲ و ۳۶۸ میلی‌متر برآورد شد. مقدار تبخیر-تعرق نسبی در سطوح آبیاری ۸۵، ۷۵، ۷۰، ۵۵ و ۴۰ درصد نیاز آبی گیاه به‌ترتیب برابر با ۸۷/۵، ۸۰/۸، ۷۸/۲، ۶۵/۱ و ۵۶/۸ درصد برآورد شد (۱۹). در پژوهشی در تایوان جنوبی، تبخیر-تعرق گیاه ذرت در سطوح آبیاری ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مجموع تبخیر-تعرق ذرت در تیمارهای مذکور به‌ترتیب برابر با ۳۷۵، ۳۲۵، ۲۷۵، ۲۲۵ و ۱۷۵ میلی‌متر بود. همچنین مقدار تبخیر-تعرق نسبی ذرت در سطوح آبیاری ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد به‌ترتیب برابر با ۸۶/۷، ۷۳/۳، ۶۰/۶ و ۴۶/۶ درصد برآورد شد (۵). دستاورد کاربردی پژوهش این بود که حساسیت متفاوت گیاه در مراحل مختلف رشد و اعمال تنش آبی به‌عنوان یک تنش محیطی-مدیریتی، نقش مؤثری در کاهش جذب آب توسط گیاه و تعرق واقعی آن بر عهده داشت. لذا انتخاب مرحله‌ی رشد مناسب و اعمال حد منطقی از تنش آبی در مدیریت‌های کم‌آبیاری، می‌تواند در ایجاد تبخیر-تعرق بهینه برای گیاه و در نهایت افزایش بهره‌وری مصرف آب حائز اهمیت باشد.

(در تیمار I₁)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I₂)، ۶۲/۸، ۱۳۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I₃) برآورد شد (شکل ۲). نتایج در همه سطوح آبیاری نشان داد ساختار کلی تبخیر-تعرق، از منحنی ضریب گیاهی تبخیر-تعرق در دوره رشد (Kc) تبعیت کرد. به‌طوری که بیشترین تا کم‌ترین مقدار تبخیر-تعرق به‌ترتیب مربوط به مراحل توسعه، میانی، اولیه و پایانی رشد بود. کاهش مقدار تبخیر-تعرق نسبت به تیمار شاهد (I₀)، در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت به‌ترتیب برابر با ۲/۹، ۲/۸، ۰ و ۰ درصد (در تیمار I₁)، ۸/۸، ۱۴، ۲۰ و ۱۹/۸ درصد (در تیمار I₂)، ۲۰/۵، ۲۶/۹، ۳۴/۲ و ۴۲/۴ (در تیمار I₃) برآورد شد. شیب کاهش مقدار تبخیر-تعرق در مراحل رشد مذکور به‌ترتیب برابر با ۹/۸، ۱۲، ۱۲/۶ و ۲۱/۲ درصد بود. عدم تولید زیست‌توده گیاهی پس از رسیدگی بیولوژیک، کاهش تعرق گیاه و در نهایت پلاسیدگی و اتمام عمر گیاه، فرایند مرحله پایانی رشد بود. با افزایش تنش آبی، بیشترین شیب کاهش تبخیر-تعرق در مرحله رشد مذکور اتفاق افتاد که نشان‌دهنده تأثیر تنش آبی بر سرعت فرایند فوق بود. به‌طور کلی میزان حساسیت به تنش آبی و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد ذرت، از علل کاهش متفاوت تبخیر-تعرق بود. همچنین نتایج نشان داد که تبخیر-تعرق نسبی ذرت (طی دوره رشد) در سطوح آبیاری I₁، I₂ و I₃ به‌ترتیب ۸۵، ۹۵/۶ و ۷۱/۶ درصد برآورد شد. اعداد مذکور نشان‌دهنده‌ی ضریب حساسیت تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی (Ks)، در سطوح مختلف آبیاری بود. از ضرایب فوق می‌توان در محاسبه مقدار تبخیر-تعرق واقعی ذرت، تحت شرایط تنش آبی در منطقه استفاده نمود. در مجموع کاهش هر واحد (درصد) آب آبیاری نسبت به آبیاری کامل، باعث کاهش ۰/۴۸

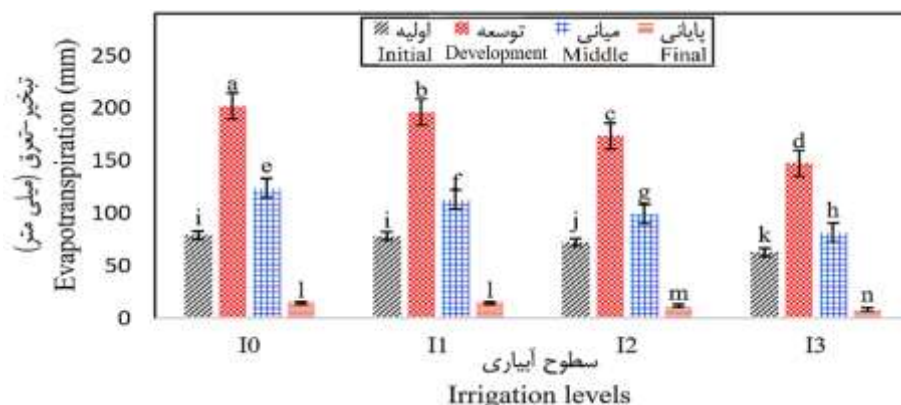
جدول ۲- تجزیه واریانس صفت تبخیر-تعرق طی دوره رشد

Table 2- Analysis of variance of the evapotranspiration adjective in growth stage

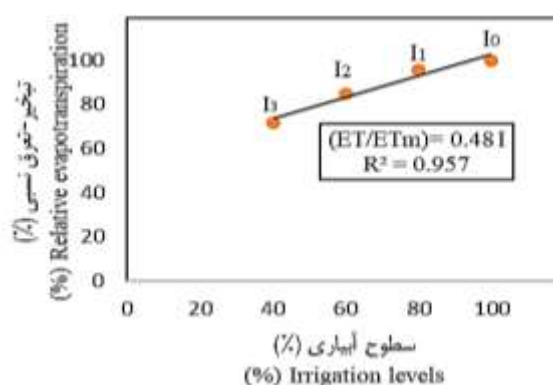
منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
Sources of variance	Degree of freedom	Mean of squares
تکرار	2	4.542 ^{ns}
Replication		
سطح آبیاری	3	2117**
Irrigation level		
دوره رشد	3	58211**
Growth stage		
سطح آبیاری × دوره رشد	9	300.9**
Growth stage × Irrigation level		
خطا	30	0.487
Error		

ns و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد

ns and **: Non significant and significant at a probability level of one percent, respectively.



شکل ۲- مقادیر تبخیر-تعرق ذرت تحت تأثیر سطوح مختلف آبیاری در مراحل رشد
Figure 2- Evapotranspiration of maize under the effect of different irrigation levels in the growth stages



شکل ۳- تغییرات تبخیر-تعرق نسبی ذرت نسبت به سطوح مختلف آبیاری
Figure 3- Changes in relative evapotranspiration of maize compared to different irrigation levels

عملکرد محصول

۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، به ترتیب ۲۱/۵، ۱۹/۵ و ۱۲/۵ تن بر هکتار برآورد شد. مقدار عملکرد نسبی محصول در سطوح آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد به ترتیب برابر با ۹۰/۷ و ۵۸/۱ درصد بود (۱۶). در پژوهشی با اعمال کم آبیاری در سطوح ۱۰۰، ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد نیاز آبی گیاه، مقدار عملکرد دانه ذرت به ترتیب ۹۱۱/۳، ۸۳۲/۶، ۶۸۲/۷ و ۵۶۷/۱ گرم بر متر مربع اندازه گیری شد. در نتیجه مقدار عملکرد نسبی محصول در سطوح آبیاری ۸۳، ۶۷، ۵۰ و ۳۳ درصد به ترتیب ۹۱/۳، ۸۹/۴، ۷۴/۹ و ۶۲/۲ درصد برآورد شد (۵). در تحقیق دیگر عملکرد دانه ذرت تحت تأثیر چهار سطح آبیاری ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بررسی شد. نتایج نشان داد مقدار عملکرد در سطوح آبیاری مذکور به ترتیب ۸۱۵۸، ۷۸۶۳، ۷۵۰۰ و ۴۲۳۸ کیلوگرم بر هکتار بود (۱). در پژوهشی نیز برای بررسی تأثیر کم آبیاری بر عملکرد ذرت، تیمارهایی بر اساس تأمین ۱۰۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد مقدار عملکرد دانه ذرت در تیمارهای مذکور به ترتیب ۹۱۷/۱ و ۲۴۵/۱ گرم در متر مربع اندازه گیری شد (۷).

در پایان دوره کشت، عملکرد زیست توده خشک ذرت در تیمارهای مختلف آبیاری اندازه گیری شد. با توجه به جدول ۳ تأثیر سطوح آبیاری بر مقدار عملکرد زیست توده خشک ذرت، در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. مقدار عملکرد خشک ذرت در تیمارهای I0، I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار بود (شکل ۴). نتایج نشان داد که اعمال کم آبیاری باعث کاهش عملکرد محصول ذرت نسبت به شرایط آبیاری کامل (تیمار شاهد) شد. به طوری که مقدار کاهش عملکرد در تیمارهای I1، I2 و I3 به ترتیب برابر با ۷/۶، ۲۶/۳ و ۴۹/۱ درصد نسبت به تیمار شاهد بود. در نتیجه مقدار عملکرد نسبی ذرت در سطوح آبیاری I1، I2 و I3 به ترتیب ۹۲/۴، ۷۳/۷ و ۵۰/۹ درصد در منطقه قزوین برآورد شد. نتایج نشان داد کاهش هر واحد (درصد) آب آبیاری نسبت به آبیاری کامل، باعث کاهش ۰/۸۳ درصدی در مقدار عملکرد نسبی ذرت شد (شکل ۵). به طور کلی کاهش آب قابل دسترس در خاک، بر فعل و انفعالات شیمیایی گیاه و تولید ماده گیاهی مؤثر بوده و باعث کاهش عملکرد محصول ذرت شد. در تحقیقی در منطقه لرستان گزارش شد که مقدار عملکرد ماده خشک ذرت علوفه ای در شرایط تأمین ۱۰۰،

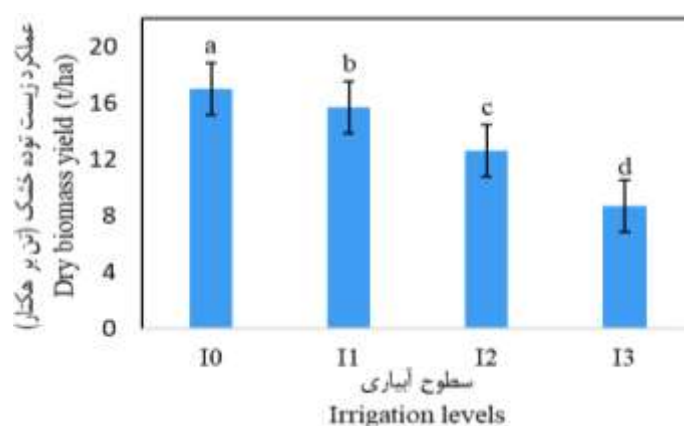
جدول ۳- تجزیه واریانس صفت عملکرد زیست توده خشک

Table 3- Analysis of variance of the dry biomass yield adjective

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
Sources of variance	Degree of freedom	Mean of squares
تکرار	2	0.09 ^{ns}
Replication		
سطح آبیاری	3	6.34**
Irrigation level		
خطا	6	0.023
Error		

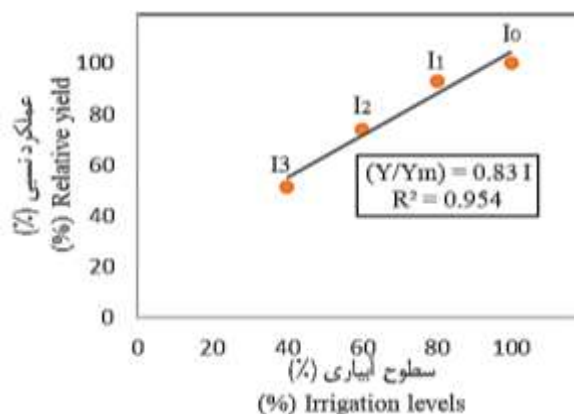
ns و **: به ترتیب غیرمعنی داری و معنی داری در سطح احتمال یک درصد

ns and **: Non significant and significant at a probability level of one percent, respectively.



شکل ۴- عملکرد زیست توده خشک ذرت تحت سطوح مختلف آبیاری

Figure 4- Dry biomass yield of maize under different irrigation levels



شکل ۵- تغییرات تبخیر-تعرق نسبی ذرت نسبت به سطوح مختلف آبیاری

Figure 5- Changes in relative evapotranspiration of maize compared to different irrigation levels

ضرایب حساسیت تنش λ_1 , λ_2 , λ_3 و λ_4 در تیمارهای تحت تنش آبی برآورد شد (جدول ۴). میانگین ضرایب مذکور در تیمارهای تحت تنش به ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۱/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ محاسبه شد. نتایج نشان داد بیشترین تا کمترین مقدار ضرایب تنش آبی (λ)

مدل سازی ضرایب حساسیت درون فصلی تنش آبی

در این پژوهش ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی که در مدل جنسن معرفی شد، با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شد. در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد ذرت

به ترتیب مربوط به مراحل توسعه، اولیه، میانی و پایانی رشد ذرت بود. به عبارت دیگر برای یک مقدار مشخص از تبخیر-تعرق نسبی، بیشتر بودن مقدار ضریب λ نشان دهنده تأثیر بیشتر آن مرحله خاص در تولید عملکرد محصول بوده است. بنابراین در مرحله توسعه رشد ذرت که زمان گسترش اندام‌های گیاهی و تولید انبوه زیست‌توده می‌باشد، تأثیر تنش آبی بر کاهش عملکرد محصول بیشتر بود. اما در مرحله پایانی رشد به دلیل رسیدگی محصول و عدم امکان رشد مجدد برای گیاه، صرفاً پُر شدن دانه‌های شیری ذرت باعث تغییر جزئی در عملکرد محصول شد. لذا کمترین مقدار ضریب λ در مرحله پایانی رشد ذرت مشاهده شد. در مدل جنسن، عملکرد نسبی محصول $(\frac{Y}{Y_m})$ به عنوان متغیر وابسته و تبخیر-تعرق نسبی در مراحل رشد $(\frac{ET_i}{ET_{mi}})$ به عنوان متغیر مستقل مدنظر قرار داشت. پس از برآورد ضرایب تنش λ در سطوح مختلف آبیاری، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای تبخیر-تعرق، مقدار عملکرد نسبی محصول توسط مدل تولیدی در این پژوهش، تخمین زده شد. برای صحت‌سنجی عملکرد مدل، همبستگی بین داده‌های واقعی و تخمینی عملکرد نسبی محصول در شکل (۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد آماره‌های ارزیابی EF ، R^2 ، $RMSE$ ، ME و CRM به ترتیب برابر با $0/998$ ، $0/986$ ، $2/753$ ، $0/26$ و $0/21$ برآورد شد. نزدیک به یک بودن آماره‌های R^2 و EF ، نشان دهنده همبستگی خوب بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی و حداقل یا نزدیک به صفر بودن آماره‌های $RMSE$ ، ME و CRM نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل بود. در این پژوهش در مورد اعمال تنش‌های بیشتر از ۴۰ درصد نیاز آبی، این احتمال وجود داشت که به علت بسیار کم بودن حجم آب آبیاری، گیاهان به پایان دوره رشد نرسیده و در اواسط دوره رشد با خشک شدن و توقف رشد مواجه شوند. بنابراین در فرایند صحت‌سنجی مدل جنسن اگرچه تعداد تیمارهای تحت تنش محدود بود (شکل ۶)، اما مقدار تنش اعمال شده، در بر دارنده‌ی بیشترین تا کمترین حد تنش ممکن بود. از سوی دیگر هر مقداری از تنش آبی به‌طور مستقیم باعث کاهش مقادیر تبخیر-تعرق و عملکرد گیاه ذرت نسبت به شرایط تحت کنترل (تیمار شاهد) می‌شد. در این شرایط اگر تعداد تیمارهای کم‌آبیاری افزایش می‌یافت، باز هم نتایج این پژوهش و روند خطی بین مقادیر تبخیر-

تعرق و عملکرد ذرت به‌دست می‌آمد. از این‌رو با وجود محدود بودن داده‌های مزرعه‌ای، تردیدی از نظر صحت مدل‌سازی و دقت مدل به‌دست آمده، وجود نداشت. در مجموع دستاورد کاربردی این بخش از پژوهش، به کارگیری مدل تولید شده در برنامه‌ریزی کم‌آبیاری برای مراحل مختلف رشد ذرت بود. به‌طوری که در هر مرحله از رشد ذرت، با درنظر داشتن نسبت تبخیر-تعرق واقعی (تحت مدیریت) به تبخیر-تعرق پتانسیل (استاندارد) منطقه، می‌توان مقدار عملکرد واقعی محصول را نسبت به شرایط پتانسیل منطقه تخمین زد. در تحقیقی بر روی ذرت در بلژیک، ضریب λ برای دوره‌های مختلف رشد برآورد شد. نتایج نشان داد ضرایب حساسیت تنش آبی در هفته‌های ۴-۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰-۱۲ و ۱۳-۱۴ رشد ذرت، به ترتیب برابر با $0/088$ ، $0/383$ ، $0/121$ ، $0/547$ ، $0/117$ و $0/076$ بود (۱۱). در تحقیقات مشابه روی گیاهان دیگر، ضریب λ در مراحل مختلف رشد گوجه فرنگی شامل مراحل گل‌دهی و رشد میوه مدل‌سازی شد. طبق نتایج حاصل، ضریب λ برای عملکرد کل گیاه، وزن و قطر میوه به ترتیب $0/82$ ، $0/39$ و $0/44$ (در مرحله گل‌دهی) و $0/51$ و $0/5$ (مرحله رشد میوه) برآورد شد (۱۰). در تحقیق دیگر بر روی سورگوم ضریب λ برای مراحل رشد جوانه‌زنی، بذری، شیری شدن و رسیدگی دانه به ترتیب $0/5$ ، $1/5$ و $0/5$ برآورد شد (۹). در پژوهشی بر روی نیشکر در برزیل ضریب λ برای مراحل رشد جوانه‌زنی تا پنجه‌زنی، توسعه و کاهش رشد (تجمع ساکاروز) به ترتیب $0/43$ ، $0/39$ و $0/07$ محاسبه شد (۱۸).

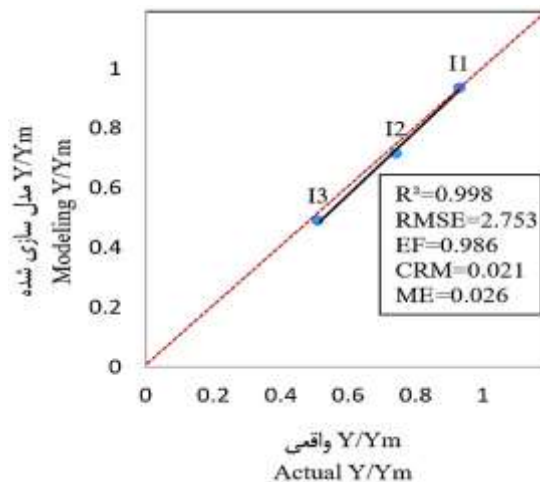
تابع عملکرد-تبخیر-تعرق ذرت در کل دوره رشد

در سطوح مختلف آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد زیست‌توده خشک ذرت، رابطه‌ی ساده و خطی $Y=69.935ET$ - 12281 با ضریب همبستگی $0/999$ ، برازش داده شد (شکل ۷). با استفاده از رابطه فوق می‌توان در مدیریت‌های کم‌آبیاری، بر اساس مقدار تبخیر-تعرق ذرت، مقدار عملکرد آن را در منطقه تخمین زد. اگر مقدار عملکرد در رابطه مذکور مساوی صفر قرار داده شود، عدد ۱۷۵ میلی‌متر برای مقدار تبخیر-تعرق به‌دست می‌آید. یعنی در کل دوره رشد ذرت، مقدار ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر-تعرق منجر به تولید هیچ زیست‌توده‌ای نشده است.

جدول ۴- ضرایب حساسیت درون فصلی ذرت به تنش آبی، در سطوح مختلف آبیاری

Table 4- Intra-seasonal sensitivity coefficients of maize to water stress, at different irrigation levels

میانگین	سطح آبیاری I ₃	سطح آبیاری I ₂	سطح آبیاری I ₁	ضرایب تنش
Average	I ₃ Irrigation level	I ₂ Irrigation level	I ₁ Irrigation level	Stress coefficients
0.421	0.391	0.393	0.479	λ_1
1.37	1.351	1.326	1.432	λ_2
0.274	0.301	0.242	0.28	λ_3
0.133	0.055	0.044	0.3	λ_4



شکل ۶- ارزیابی مدل جنسن در سطوح مختلف آبیاری

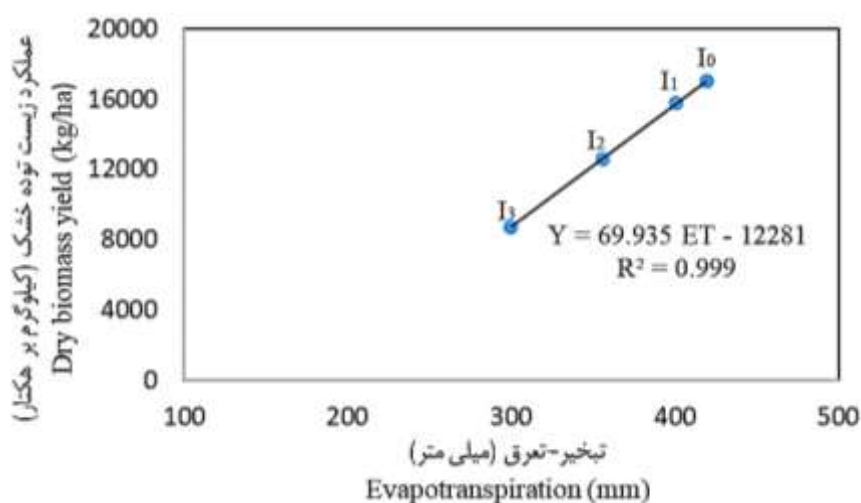
Figure 6- Evaluation of Jensen model at different irrigation levels

بود. در تحقیقی در کشور تایوان و تحت رژیم‌های آبیاری شامل آبیاری کامل، ۶۰، ۵۰، ۴۰، ۳۰ و ۲۰ میلی‌متر، تابع عملکرد دانه-تبخیر- تعرق ذرت به صورت رابطه $Y(g.m^{-2})=1.41ET(mm)-211.19$ گزارش شد. به طوری که برای تولید اولین واحد (گرم بر متر مربع) دانه ذرت به ۱۵۰ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده است (۵). در پژوهشی روی ذرت تحت تیمارهای شوری و حاصلخیزی گزارش شد که رابطه بین عملکرد زیست توده محصول و تبخیر-تعرق به صورت $Y(t.ha^{-1})=0.21ET(mm)-14.4$ بود. نتایج نشان داد که در این شرایط، برای تولید اولین واحد (تن بر هکتار) زیست‌توده ذرت به ۶۸ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده است (۱۵).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مقادیر تبخیر-تعرق گیاه ذرت در مراحل اولیه، توسعه، میانی و پایانی رشد به ترتیب برابر با ۷۹، ۲۰۱/۸، ۱۲۳/۸ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_0)، ۷۸/۳، ۱۹۶، ۱۱۲/۶ و ۱۴/۶ میلی‌متر (در تیمار I_1)، ۷۲، ۱۷۳/۶، ۹۹ و ۱۱/۷ میلی‌متر (در تیمار I_2)، ۶۲/۸، ۱۴۷/۵، ۸۱/۵ و ۸/۴ میلی‌متر (در تیمار I_3) برآورد شد. میزان حساسیت به تنش آبی و نیاز متفاوت گیاه به انجام تعرق در مراحل مختلف رشد ذرت، از علل کاهش متفاوت تبخیر-تعرق بود. لذا انتخاب مناسب مرحله‌ی رشد و اعمال حد منطقی از تنش آبی (در مدیریت‌های کم‌آبیاری)، می‌تواند در انجام تبخیر-تعرق بهینه گیاه مؤثر باشد. از سوی دیگر، مقدار عملکرد خشک زیست‌توده ذرت در تیمارهای I_0 ، I_1 ، I_2 و I_3 به ترتیب برابر با ۱۷/۱، ۱۵/۸، ۱۲/۶ و ۸/۷ تن بر هکتار اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد کاهش آب قابل دسترس در خاک، باعث کاهش جذب آب و تعرق گیاه و کاهش تولید ماده گیاهی شد.

به بیان دیگر، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ۱۷۵ میلی‌متر آب نیاز بوده است. ممکن است این مقدار تبخیر-تعرق بیشتر به سهم تبخیر از سطح خاک اختصاص یافته باشد و سهم تعرق گیاه که موجب تولید ماده گیاهی می‌شود، در آن ناچیز بوده باشد. بررسی دوره رشد ذرت نیز این نکته را تأیید می‌کند که در مرحله اولیه رشد، مقداری از آب آبیاری صرف جوانه‌زنی بذر و رشد گیاهچه شده و قسمت بیشتر آن سهم تبخیر از خاک می‌شود. همچنین پس از رسیدگی بیولوژیک گیاه (مرحله پُر شدن دانه)، آب مصرفی تأثیری در تولید زیست‌توده گیاهی و تعرق گیاه نداشته و به تبخیر اختصاص می‌یابد. برای شناخت اثر هر محدوده تنش آبی بر نتایج فوق، رابطه عملکرد-تبخیر-تعرق در سطوح مختلف تحت تنش برآورد شد. از این رو روابط $Y=69.62ET-12185$ ، $Y=65.217ET-10339$ و $Y=69.631ET-12189$ به ترتیب بین تیمار آبیاری کامل (I_0) و سطوح آبیاری I_1 ، I_2 و I_3 برقرار شد. نتایج نشان داد در تیمارهای ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد آبیاری گیاه، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ترتیب به ۱۵۸، ۱۷۵ و ۱۷۵ میلی‌متر آب نیاز بوده است. با عنایت به توضیحات فوق که اعداد به دست آمده را بیشتر به سهم تبخیر اختصاص می‌داد، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تنش آبی بر کاهش تعرق گیاه مؤثر بود. به طوری که با افزایش شدت تنش آبی، از مقدار جذب آب و تعرق توسط گیاه کاسته شد و راندمان تبخیر-تعرق به منظور تولید محصول کاهش یافت. نتیجه کلی این‌که در مدیریت‌های کم‌آبیاری، با کاهش سهم تبخیر در مراحل اولیه و پایانی رشد، می‌توان از هدر رفت آب جلوگیری نمود و بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد. در پژوهشی در دشت‌های مرتفع آمریکا گزارش شد که برای تولید اولین واحد دانه ذرت، به ۲۷۰ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بود (۱۹). وجود تفاوت اقلیمی در منطقه آمریکا نسبت به قزوین، باعث ایجاد تفاوت در مقادیر به دست آمده نسبت به نتایج پژوهش حاضر



شکل ۷- ارتباط بین تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت در سطوح مختلف آبیاری

Figure 7- Relationship between evapotranspiration and maize yield at different irrigation levels

است. این مقدار آب ممکن است صرف جوانه‌زنی بذور و رشد گیاهچه شده در مرحله اولیه رشد و زنده نگه‌داشتن گیاه پس از رسیدگی بیولوژیک شده باشد. بنابراین تأثیری در سهم تعرق گیاه و تولید زیست‌توده گیاهی نداشته و بیشتر به تبخیر از سطح خاک اختصاص یافته است. نتایج نشان داد کاهش شدت تنش آبی، بر کاهش عرض از مبدأ رابطه مذکور و افزایش راندمان تبخیر-تعرق ذرت مؤثر بود. نتیجه کلی این که دو عامل شدت تنش آبی و حساسیت متفاوت گیاه در مراحل مختلف رشد، اثر متفاوتی بر مقدار تبخیر-تعرق واقعی، عملکرد محصول و مدل‌سازی آن داشت و در برنامه‌ریزی آبیاری حائز اهمیت بود. همچنین با کاهش آب آبیاری به‌خصوص در مراحل اولیه و پایانی رشد، سهم تبخیر از سطح خاک نسبت به تعرق گیاه افزایش یافت که این کار بر کاهش راندمان مصرف آب توسط گیاه مؤثر بود. بنابراین استفاده از مالچ در سطح خاک به‌هنگام اعمال کم‌آبیاری در مراحل رشد مذکور توصیه می‌گردد.

در پژوهش حاضر، ضرایب حساسیت درون فصلی تبخیر-تعرق ذرت به تنش آبی (در مدل جنسن)، در تیمارهای تحت تنش برآورد شد. میانگین ضرایب مذکور (λ_1 الی λ_4) به‌ترتیب برابر با ۰/۴۲۱، ۰/۳۷، ۰/۲۷۴ و ۰/۱۳۳ تعیین شد. با توجه به مقدار ضرایب، در مرحله توسعه رشد ذرت که زمان گسترش اندام‌های گیاهی و تولید انبوه زیست‌توده می‌باشد، تأثیر تنش آبی بر کاهش عملکرد محصول بیشتر بود. در ارزیابی مدل جنسن، مقدار آماره‌های ME ، $RMSE$ ، EF ، R^2 و CRM به‌ترتیب برابر با ۰/۹۹۸، ۰/۹۸۶، ۲/۷۵۳، ۰/۰۲۶ و ۰/۰۲۱ برآورد شد. اعداد به‌دست آمده نشان‌دهنده عملکرد خوب مدل جنسن در تخمین عملکرد نسبی محصول ذرت بود. بنابراین در هر مرحله از رشد ذرت، با در نظر داشتن نسبت تبخیر-تعرق واقعی (تحت مدیریت) به تبخیر-تعرق پتانسیل (استاندارد) منطقه، می‌توان مقدار عملکرد واقعی محصول را شبیه‌سازی نمود. در کل سطوح آبیاری، بین دو پارامتر تبخیر-تعرق و عملکرد ذرت، رابطه‌ی $Y=69.935ET-12281$ برآزش داده شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، برای تولید اولین واحد زیست‌توده ذرت به ۱۷۵ میلی‌متر تبخیر-تعرق نیاز بوده

منابع

- 1- Alinejadani Bidabadi A., Jorooni E., Barzegar A., and Maleki A. 2016. The effect of different irrigation levels on water use efficiency on the basis of maize grain and soil moisture variations. *Journal of Water and Irrigation Management* 6(1): 47-59. (In Persian with English abstract)
- 2- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drainage Paper* No.56: 1-326.
- 3- Akbari Nodehi D. 2018. Effect of water stress on different growth stages of yield and water use efficiency of maize. *Journal of Water and Irrigation Management* 7(2): 305-318. (In Persian with English abstract)
- 4- Farre I., and Faci J.M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Journal of Agricultural Water Management* 96: 383-394.
- 5- Greaves G., and Wang Y. 2017. Yield response, water productivity, and seasonal water production functions for

- maize under deficit irrigation water management in southern Taiwan. *Journal of Plant Production Science* 20(4): 353-365.
- 6- Hemmati R., Maghsoudi K., and Emam Y. 2014. Morpho-physiological responses of maize to drought stress at different growth stages in northern semi-arid region of Fars. *Journal of Crop Production and Processing* 4(11): 67-74. (In Persian)
- 7- Hooshmand A., Frutan M., and Boroomandnasab S. 2014. Evaluation of deficit irrigation and sown pattern on yield and water use efficiency of maize (KSC-704). *Journal of Irrigation Sciences and Engineering* 37(3): 43-52. (In Persian with English abstract)
- 8- Jarollahi R. 2001. Determination of readily available water in different stages of growth for grain corn in Karaj. *Journal of Soil and Water Sciences* 15(2): 290-298. (In Persian with English abstract)
- 9- Jensen M.E. 1968. Water Consumption by Agricultural Plants. In: Kozlowski, T.T., (ed.) *Plant Water Consumption and Response. Water Deficits and Plant Growth*, Academic Press, New York, 2: 1-22.
- 10- Jiang X., Zhao Y., Wang R., and Zhao S. 2019. Modeling the relationship of tomato yield parameters with deficit irrigation at different growth stages. *Journal of Hort Science* 54(9): 1492-1500.
- 11- Kipkorir E.D., and Raes D. 2002. Transformation of yield response factor into Jensen's sensitivity index. *Journal of Irrigation and Drainage Systems* 16: 47-52.
- 12- Mohammadi Behmadi M., and Armin M. 2017. Effect of Drought Stress on Yield and Yield Components of Different Maize Cultivars in Delayed Cultivation. *Journal of Applied Research in Plant Ecophysiology* 4(1): 17-34. (In Persian)
- 13- Nielsen R.L. 2002. Drought and heat stress effects on corn pollination. *Journal of Agry (Purdue)* 196: 19-25.
- 14- Saeidi R., Sotoodehnia A., Ramezani Etedali H., Nazari B., and Kaviani A. 2018. Effect of water salinity and soil nitrogen deficiency on Ks-coefficient and readily available water of maize. *Journal of Water and Soil* 32(5): 865-878. (In Persian with English abstract)
- 15- Saeidi R., Sotoodehnia A., Ramezani Etedali H., Kaviani A., and Nazari B. 2019. Modeling of coefficients of salinity and fertility stresses in estimation of actual evapotranspiration rate of maize. Ph.D. dissertation, Imam Khomeini International University of Qazvin. (In Persian with English abstract)
- 16- Saeidinia M., Nasrolahi A.H., and Sharifipoor M. 2019. Investigating the Ability of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling and Estimating Corn Forage Yield. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(3): 555-565. (In Persian with English abstract)
- 17- Solimanifard A., and Naseri R. 2016. The Effects of irrigation regimes and planting patterns on seed yield and some agronomic traits of maize (S.C. 604). *Journal of Crop Eco physiology* 1(37): 201-212. (In Persian).
- 18- Souza J.L.M., Gerstemberger E., Gurski B.C., and Oliveira R.A. 2015. Adjustment of water-crop production models for ratoon sugarcane. *Journal of Pesq. Agropec*, 45(4): 426-433.
- 19- Trout T.J., and Dejonge K.C. 2017. Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrigation Science* 35: 251-266.



Investigation of the Intra-Seasonal Sensitivity of Maize Evapotranspiration to Water Stress, at Different Irrigation Levels

R. Saeidi^{1*}

Received: 25-01-2021

Accepted: 11-04-2021

Introduction: Adequate water use in the agricultural sector requires accurate knowledge of crop sensitivity to environmental stresses (such as water stress). The crop sensitivity to water stress may be different at different growth stages and may have a different effect on the actual amount of crop evapotranspiration compared to the standard conditions. At different levels of water stress, studying the sensitivity of crop evapotranspiration at different growth stages can be provided management strategies for optimal water consumption. In the present research, the intra-seasonal sensitivity coefficients of maize were modeled by using the Jensen model.

Materials and Methods: In this research, the effect of water stress levels and growth stage sensitivity on the amount of maize (S.C 704) evapotranspiration was investigated. The experiment was performed as factorial based on randomized complete block design. The treatments included four irrigation levels of 100 (I_0), 80 (I_1), 60 (I_2), and 40 (I_3) percent of the crop water requirement and four growth stages of initial, development, middle and final. In between two irrigations, the amount of daily soil moisture was measured in the center of each plot and the depth of the crop root zone. Therefore, the amount of evapotranspiration of crops per unit area was estimated according to the soil water balance. Analysis of variance and mean data comparison of evapotranspiration and dry biomass yield were performed by SPSS software and using Duncan's multiple tests. By actual evapotranspiration and yield data, intra-seasonal sensitivity coefficients of maize to water stress (λ_1 to λ_4) were determined by SPSS software.

Results and Discussion:

Evapotranspiration

The effect of irrigation water amount and growth stage on the maize evapotranspiration amount was significant at the probability level of 1%. Evapotranspiration amounts at the initial, developmental, middle, and final of maize growth stages were estimated equal to 79, 201.8, 123.8 and 14.6 mm (in I_0 treatment), 78.3, 196, 126.6 and 14.6 mm (in I_1 treatment), 72, 173.6, 99 and 11.7 mm (in I_2 treatment), 62.8, 147.5, 81.5 and 8.4 mm (in I_3 treatment), respectively. Reduction of evapotranspiration compared to control treatment (I_0) in the initial, developmental, middle, and final growth stages were estimated equal to 0.9, 2.8, 9, and 0 (in I_1 treatment), 8.8, 14, 20, and 19.8 (in I_2 treatment), 20.5, 26.9, 34.2 and 42.4 (in I_3 treatment) percent, respectively. The results showed that the slope of evapotranspiration reduction was not the same at different irrigation levels. Also, the relative evapotranspiration of maize (in all growth seasons) at irrigation levels of I_1 , I_2 , and I_3 were estimated equal to 95.6, 85, and 71.6 percent, respectively. Therefore, when applying water stress, the optimal evapotranspiration rate can be adjusted by selecting the suitable growth stage.

Yield

The effect of irrigation levels on the dry biomass yield of maize was significant at the level of 1% probability. The dry yield of maize in treatments of I_0 , I_1 , I_2 , and I_3 were equal to 17.1, 15.8, 12.6, and 8.7 (tons per hectare), respectively. The relative yield of maize at irrigation levels of I_1 , I_2 , and I_3 were estimated to be 92.4, 73.7, and 50.9 percent, respectively, in the Qazvin region. The reduction of soil available water affected the water uptake by the crop and reduced the yield of maize.

Modeling of intra-seasonal sensitivity coefficients of water stress

At the initial, developmental, middle, and final growth stages of maize, stress sensitivity coefficients of λ_1 , λ_2 , λ_3 , and λ_4 were estimated in water stress treatments. The mean of mentioned coefficients in stress treatments was calculated to be 0.421, 1.37, 0.274, and 0.133, respectively. The results showed that during the development stage of maize growth, the effect of water stress on yield reduction was more. The model efficiency for estimating the amount of relative yield was evaluated. Evaluation statistics of R^2 , EF, RMSE, ME and CRM were estimated to be 0.998, 0.986, 2.753, 0.026 and 0.021, respectively. The results showed that the Jensen

1- Ph.D. of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University

(*- Corresponding Author Email: Saeidi@org.ikiu.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2021.68147.1011

model efficiency was good, and it can be used in planning the low irrigation for different growth stages of maize.

Yield-Evapotranspiration Function of Maize in all of the growth stages

Across different irrigation levels, a simple linear relationship of $Y=69.935ET-12281$ (with a correlation coefficient of 0.999) was fitted between two parameters of evapotranspiration and dry biomass yield of maize. Therefore, using the above equation in low irrigation management, the amount of maize yield can be estimated based on the evapotranspiration amount. In this research, 175 mm evapotranspiration was needed for the production of the initial unit of maize biomass. That is, the transpiration portion in the above amount was negligible, and it was mostly allocated to the soil evaporation portion.

Conclusion: The crop sensitivity to water stress and different needs to transpiration at different growth stages were the reasons for the different reduction of maize evapotranspiration. Reduction of soil available water reduced the water uptake and transpiration, and crop biomass. The results showed that reducing the water stress was effective in increase of maize evapotranspiration efficiency. In order to produce the maximum crop biomass, the sensitivity of the maize growth stage and the water stress level must be considered.

Keywords: Crop yield, Growth stages, Jensen model, Low irrigation



مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی الگوی کشت در راستای مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی با استفاده از الگوریتم‌های PSO و DE

مهدی کماسی^{۱*} - امیر علیزاده فرد^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

چکیده

پایش‌های میدانی بیانگر کاهش تراز آبخوان‌های دشت سیلاخور در سال‌های اخیر هستند که این موضوع لزوم بهره‌برداری بهینه از منابع محدود آب‌های زیرزمینی را می‌رساند. در همین راستا با توجه به سهم عمده کشاورزی در مصرف آب، بهینه‌سازی الگوی کشت از مهم‌ترین عوامل مدیریت منابع آب و مقابله با کم‌آبی محسوب می‌شود. در این پژوهش عملکرد توابع جریمه مختلف به منظور تعیین الگوی کشت بهینه در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات بررسی شده است. در این راستا در گام نخست بارندگی سال‌های زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰، ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و ۱۴۰۱-۱۴۰۲ در دشت سیلاخور با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی و مدل میانگین متحرک خود هم‌بسته یکپارچه فصلی پیش‌بینی شده و با توجه به تغذیه ناشی از بارندگی و میزان برداشت در سال‌های گذشته، برای هر سال زراعی ۱۰۰ سناریو برداشت تعیین شد. سپس الگوی کشت بهینه متناسب با هر سناریو برداشت با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی خطی به دست آمد. حداکثرسازی درآمد کشاورزان به عنوان تابع هدف، و آب و زمین در دسترس به عنوان محدودیت‌های برنامه‌ریزی خطی در نظر گرفته شدند. در گام دوم عملکرد توابع جریمه مختلف در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای رسیدن به پاسخ‌های حاصل از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج این بررسی به طور میانگین الگوریتم ازدحام ذرات در ۸۴٪ سناریوها سریع‌تر به الگوی کشت بهینه می‌رسد. همچنین اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی را ۱۱٪ و الگوریتم ازدحام ذرات را ۳٪ نسبت به استفاده از جریمه ساکن کاهش می‌دهد. در مجموع می‌توان دریافت که با میزان برداشت فعلی، در صورت پیروی از الگوی کشت بهینه پیشنهاد شده برای چهار محصول عمده زراعی دشت سیلاخور، یعنی گندم، جو، شلتوک و ذرت علوفه‌ای، درآمد کشاورزان منطقه ۱۸٪ افزایش می‌یابد. همچنین به کارگیری تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده در الگوریتم ازدحام ذرات به منظور بهینه‌سازی الگوی کشت پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌های زیرزمینی، الگوریتم‌های فراکاوشی، برنامه‌ریزی خطی، بهینه‌سازی، دشت سیلاخور

مقدمه

بی‌رویه انسان از منابع آبی و مدیریت نادرست منابع آب می‌داند (۲) و (۱۹). نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که در دشت سیلاخور عوامل انسانی نسبت به تغییرات اقلیمی تأثیر بیشتری در کاهش تراز آب‌های زیرزمینی دارند (۱۲). علاوه بر خشکسالی، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات آب‌بر نیز بحران آب را در سال‌های اخیر به نخستین پدیده بحرانی در سطح جامعه تبدیل کرده است که این بحران بر روی بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف کننده آب تأثیر مستقیم می‌گذارد. آب از مهم‌ترین اجزاء برای تولید محصولات کشاورزی است و مدیریت منابع ارزشمند و محدود آن از زمینه‌های گسترش کشاورزی می‌باشد. تولید محصولات کشاورزی به طور متوسط ۷۰٪ از کل

وقوع خشکسالی‌های پی در پی در کنار افزایش نیازهای آبی و عدم مدیریت صحیح منابع آب، باعث ایجاد بحران آبی شده است که پیامدهای مختلف محیط‌زیستی و اقتصادی را به دنبال دارد. از آن جا که این بحران بر بخش‌های مختلف جامعه تأثیر می‌گذارد، بنابراین بررسی راه‌های مقابله با آن نیز، امری لازم و ضروری است. در زمینه شناسایی علل خشکسالی رویکرد واحد و روشنی وجود ندارد. برخی تغییر اقلیم گسترده را به عنوان عامل اصلی بحران کم‌آبی، در ایران معرفی می‌کنند (۲۳ و ۳۰) و در مقابل برخی دیگر علت آن را برداشت

(Email: komasi@abru.ac.ir)

(*) - نویسنده مسئول:

۱ و ۲ - به ترتیب دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران،

دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران

برداشت آب در جهان را شامل می‌شود (۷). یکی از کارآمدترین راهکارهای مناسب جهت کاهش هدررفت آب و دستیابی به توسعه پایدار، بهینه‌سازی تخصیص است (۱۸). در این راستا باید به اهداف اقتصادی که شامل درآمد کشاورزان می‌شود نیز توجه نمود. به‌طور کلی هدف محیط‌زیستی برداشت کمتر از آب‌های زیرزمینی و هدف اقتصادی افزایش درآمد کشاورزان با یکدیگر در ناسازگاری هستند. در بررسی مسئله برنامه‌ریزی مصرف آب در بخش کشاورزی باید تعادل مناسبی میان این اهداف ایجاد نمود که در این زمینه رویکردهای متفاوتی ارائه گردیده است؛ به‌عنوان نمونه کایر و همکاران (۱۰) با استفاده از الگوی برنامه‌ریزی خطی^۱ با هدف حداکثر کردن درآمد خالص و صرفه‌جویی در مصرف آب، در پنجاب، الگوی کشت بهینه را تعیین کردند. آن‌ها نشان دادند که با اضافه کردن پنبه به الگوی کشت منطقه در مصرف آب ۲۶/۵۵٪ صرفه‌جویی شده و درآمد ۴٪ افزایش می‌یابد. لو و همکاران (۱۴) نیز با استفاده از همین رویکرد در حالت فازی به بررسی مدیریت منابع آب پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که مجموعه‌های فازی قادرند عدم قطعیت دو جانبه‌ای در مدل‌ها به‌وجود آورند و تصمیم‌های ارزشمندی مطابق با اولویت‌ها و شرایط عملی تصمیم‌گیرندگان با استفاده از روش حل به‌دست می‌آید. به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت در مشهد، مجیدی و همکاران (۱۵) برنامه‌ریزی خطی را با هدف کاهش مصرف آب بکار بردند. آن‌ها محدودیت‌های مختلفی مانند سطح زیرکشت، نیروی کار، سرمایه، بازده برنامه‌ای، ماشین آلات، کود شیمیایی، سم شیمیایی و تناوب زراعی را در مدل‌سازی خود در نظر گرفتند. براساس نتایج این پژوهشگران، محصولاتی با مصرف بالای آب و بازده برنامه‌ای کمتر، در الگوی کشت بهینه حذف می‌شوند. عبدالقادر و همکاران (۱) برای بهینه‌سازی الگوی کشت از برنامه‌ریزی ریاضی با هدف‌های کاهش مصرف آب، حداکثرسازی بازده سالانه و تخصیص کارآمد زمین‌های کشاورزی استفاده کردند. آن‌ها میزان واردات و صادرات محصولات کشاورزی را نیز در مدل‌سازی خود در نظر گرفته و با مقایسه دو الگوی کشت فعلی و بهینه نشان دادند در الگوی کشت بهینه، مصرف آب ۵۳٪ کاهش و سود خالص برآورد شده در حدود ۲/۴۲ میلیارد دلار در سال افزایش می‌یابد. در الگوی کشت بهینه به محصولات غلات، میوه، علوفه و سبزی به ترتیب ۴۸/۴٪، ۳۵/۴٪، ۱۳/۱٪ و ۳/۲٪ زمین اختصاص می‌یابد. بیرهانو و همکاران (۳) نیز با استفاده از برنامه‌ریزی خطی الگوی کشت بهینه را در کشور اتیوپی تعیین کردند. در این پژوهش آن‌ها محدودیت آب و زمین را در چهار سناریو مختلف، و هدف‌ها را حداکثرسازی بازده و حداکثرسازی تولید تعریف کردند. نتایج این مطالعه نشان داد بهره‌وری آبیاری ۴۸٪، بهره‌وری آب فیزیکی

۱۳۲ تا ۱۶۸٪، بهره‌وری آب اقتصادی ۲۰۵ تا ۲۴۱٪، عملکرد ۱۰۸ تا ۱۵۳٪ و سود متوسط ۱۵۳ تا ۳۰۸٪ از طریق بهینه‌سازی الگوی کشت، ارزش اقتصادی بالاتری خواهد داشت. در پژوهشی دیگر در مصر، اسامه و همکاران (۲۰) با در نظر گرفتن میزان استراتژیک بودن هر محصول و استفاده از برنامه‌ریزی خطی، الگوی کشت بهینه را تعیین کرده و با الگوی کشت فعلی مقایسه کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در الگوی کشت بهینه سطح کشت محصولاتی مانند پیاز، سیر، نخود و عدس به دلیل استراتژیک نبودن آن‌ها، کاهش می‌یابد. در مقابل سطح کشت محصولاتی مانند گندم، برنج، ذرت و محصولات قندی که ارزش غذایی بالایی دارند و به‌عنوان محصولات استراتژیک تعریف می‌شوند، تقریباً ثابت باقی می‌ماند. همچنین مناطق اختصاص یافته به محصولاتی که بازده خالص بالایی دارند، مانند گوجه فرنگی بطور قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

رویکرد دوم در زمینه تخصیص بهینه و تعیین الگوی کشت، بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاوشی است؛ به‌عنوان نمونه راجو و کومار (۲۴) در راستای افزایش سود یک پروژه آبیاری، عملکرد الگوریتم ژنتیک را در برنامه‌ریزی آبیاری و توسعه الگوی کشت بررسی کردند. در این مطالعه مجموع حداکثر عملکرد نسبی کل گیاهان در مناطق تحت آبیاری به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. محدودیت‌های مدل نیز شامل معادله پیوستگی، نیاز آب، تنوع محصول و محدودیت ذخیره بود. همچنین برای انحراف مسئله از حالت منطقی به غیرمنطقی از تابع جریمه^۲ استفاده شد. آن‌ها نشان دادند نتایج بهینه به‌دست آمده از الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی خطی یکسان می‌باشد. در پژوهشی دیگر به‌منظور بررسی شرایط مختلف بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره در هندوستان ردی و کومار (۲۵) الگوریتم ازدحام ذرات مبتنی بر نخبه‌گرایی^۳ را بکار بردند. این پژوهشگران ذخیره‌سازی اولیه، تخلیه، سرریز و تبخیر را در سمت مخزن، و تخصیص آب، تبخیر و تفرق واقعی و رطوبت اولیه خاک را در سمت مزرعه، به‌عنوان خروجی‌های مدل در هر دوره ده روزه و برای هر محصول تعریف کردند. مدل آن‌ها تصمیم‌گیری برای تخصیص بهینه آب را تسهیل می‌کند. یوسف دوست و همکاران (۳۳) از الگوریتم ژنتیک به‌منظور تعیین سطح زیر کشت بهینه برخی از محصولات کشاورزی در قزوین، تحت شرایط متفاوت آب و هوایی استفاده کردند. بر اساس نتایج این پژوهش، سود حاصل از الگوی کشت بهینه در شرایط آب و هوایی نرمال، مرطوب، خشک و گرم و هنر خشک افزایش چشمگیری خواهد داشت. از سویی دیگر سیاسر و هنر (۲۸) نیز به بهینه‌سازی تخصیص آب و الگوی کشت محصولات غالب کشاورزی با بکارگیری الگوریتم ژنتیک در دشت سیستان پرداختند.

عمده زراعی دشت سیلاخور، با هدف حداکثرسازی درآمد کشاورزان در سه سال آینده و محدودیت‌های آب و زمین در دسترس، از میزان تغذیه ناشی از بارندگی به‌عنوان معیاری برای مشخص کردن بازه استخراج آب استفاده شد. به‌منظور پیش‌بینی بارندگی از الگوهای سری زمانی SARIMA^۷ و برنامه‌ریزی ژنتیکی^۸ با در نظر گرفتن داده‌های ۱۰ سال گذشته در دو حالت فصلی و ماهیانه استفاده شده و طبق معیارهای سنجش و ارزیابی مدل‌سازی، مدل بهتر انتخاب گردید. سپس برای هر سال زراعی ۱۰۰ سناریو برداشت مختلف با فواصل مساوی در نظر گرفته شد. حدود بالا و پایین این سناریوها با توجه به میزان تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی و میزان برداشت در سال‌های گذشته تعیین شده است. به‌منظور حداکثرسازی درآمد کشاورزان متناسب با هر سناریو برداشت نیز از برنامه‌ریزی خطی استفاده شد. در نهایت عملکرد سه نوع تابع جریمه ساکن، پویا و پویای طبقه‌بندی شده در دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای رسیدن به جواب‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۲ روند کلی پژوهش را نشان می‌دهد.

به‌منظور مدل‌سازی سری زمانی بارش با استفاده از الگوی SARIMA از نرم‌افزار EViews 10 و برای مدل‌سازی با روش برنامه‌ریزی ژنتیکی از نرم‌افزار 4 GeneXproTools استفاده شد. همچنین برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات به‌صورت برنامه‌نویسی در نرم‌افزار MATLAB R2018b پیاده‌سازی شدند. اطلاعات مربوط به میزان آب مصرفی هر محصول در دشت سیلاخور نیز با استفاده از نرم‌افزار NETWAT به دست آمد. در این پژوهش داده‌های مربوط به بارندگی دشت سیلاخور از شرکت آب منطقه‌ای استان لرستان و اطلاعات مربوط به محصولات کشاورزی از ادارات کشاورزی شهرستان‌های بروجرد و دورود، آمارنامه‌های کشاورزی منتشر شده توسط وزارت جهاد کشاورزی و بانک مرکزی به‌دست‌آمده است.

مدل آن‌ها علاوه بر الگوی کشت بهینه، سطح زیر کشت محصولات را نیز با لحاظ کم‌آبیاری‌های مجاز در کل دوره رشد، به‌صورت همزمان، تعیین می‌کند. همچنین اثر محدودیت آب در دوره‌های مختلف رشد بر سطح زیر کشت محصولات مختلف در این مطالعه بررسی شده است. نتایج این بررسی حاکی از آن است که گندم و هندوانه به‌ترتیب محصولات اقتصادی کشت اول و دوم زراعی هستند.

استفاده از برنامه‌ریزی خطی برای تعیین الگوی کشت در حقیقت حل یک مسئله بهینه‌سازی مقید^۱ خطی است. برای حل مسائل مقید با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز روش‌های مختلفی وجود دارد. در این پژوهش پس از پیش‌بینی میزان بارندگی سه سال آینده و محاسبه تغذیه ناشی از آن، محدودیت‌های برداشت در ۱۰۰ سناریو مختلف برای هر سال تعریف شده و دو رویکرد استفاده از برنامه‌ریزی خطی و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تعیین الگوی کشت بهینه محصولات عمده زراعی دشت سیلاخور بررسی و مقایسه شده‌اند. همچنین عملکرد سه نوع تابع جریمه ساکن^۲، پویا^۳ و پویای طبقه‌بندی^۴ شده در دو الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی^۵ و ازدحام ذرات^۶ مورد بررسی قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

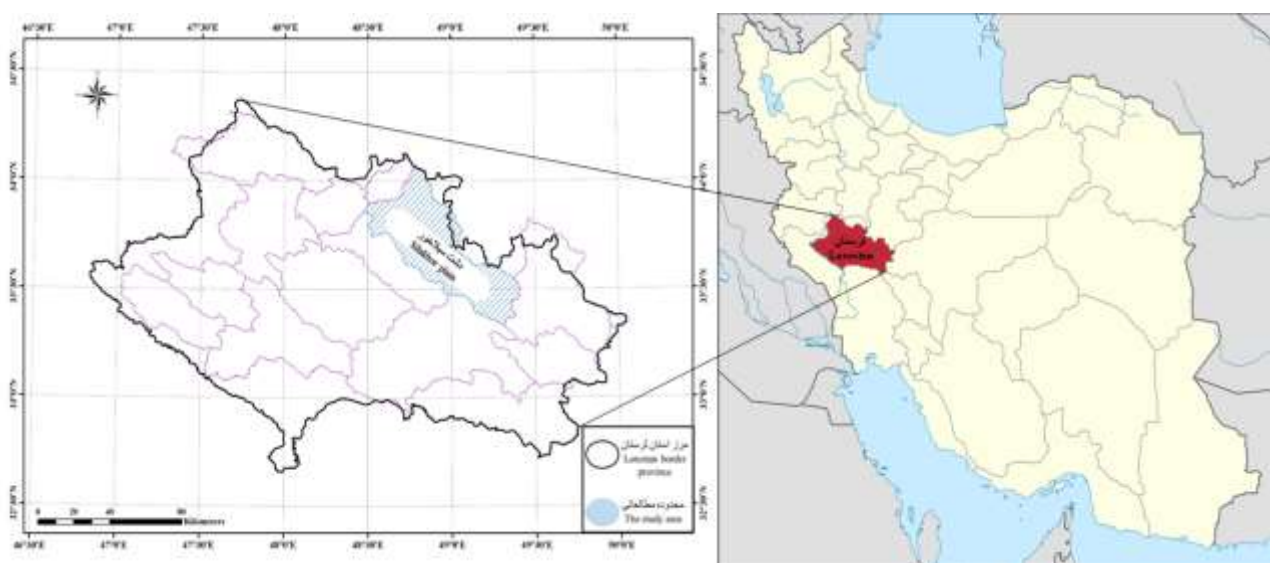
محدوده مطالعاتی دشت سیلاخور، پیرامون شهرهای بروجرد و دورود، بزرگ‌ترین زمین هموار استان لرستان بوده که با مساحت ۲۵۴۱ کیلومتر مربع، در غرب ایران و شمال شرقی‌ترین بخش این استان واقع شده است. ۸۱۹ کیلومتر مربع این محدوده را دشت و ۱۷۲۲ کیلومتر مربع آن را ارتفاعات تشکیل داده‌اند. دشت سیلاخور در شمالی‌ترین قسمت حوزه آبریز کارون بزرگ واقع شده و از اقلیم سرد و بارش مناسب برخوردار است؛ اما مطالعات میدانی در سال‌های اخیر کاهش تراز آب‌های زیرزمینی این منطقه را نشان می‌دهد. بر اساس گزارش‌های شرکت آب منطقه‌ای لرستان، مخازن آب زیرزمینی دشت سیلاخور با ۶۲ میلیون متر مکعب کسری مواجه هستند که یکی از عوامل آن تغییر الگوی کشت به سمت کشت محصولات آب‌بر می‌باشد. شکل ۱ موقعیت دشت را در استان لرستان و غرب کشور نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

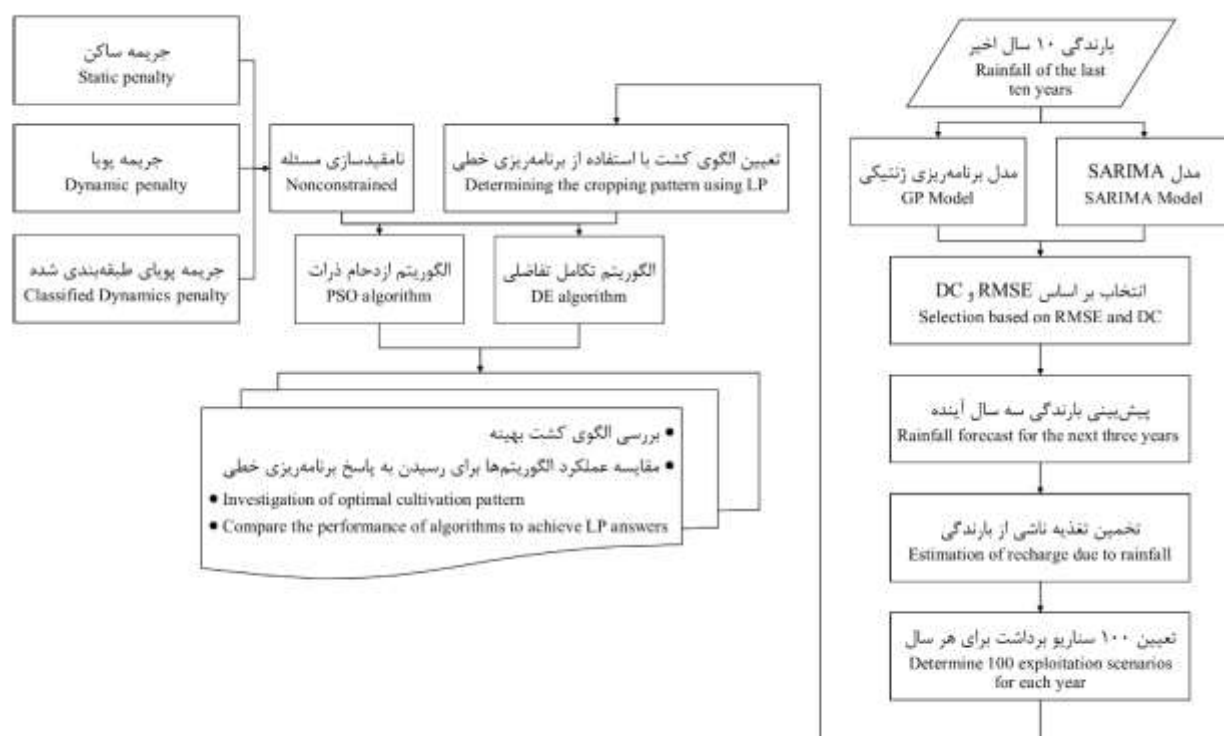
در این پژوهش به‌منظور تعیین الگوی کشت بهینه محصولات

6- Particle Swarm Optimization (PSO)
7- Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA)
8- Genetic Programming (GP)

1- Constrained Optimization
2- Static Penalty
3- Dynamic Penalty
4- Classified Dynamics Penalty
5- Differential Evolution



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت سیلاخور در استان لرستان و ایران
Figure 1- Geographical location of Silakhour plain in Lorestan province and Iran



شکل ۲- روندنمایی کلی مدل سازی پژوهش
Figure 2- General trend of research modeling

پیش‌بینی سری زمانی فصلی استفاده می‌شود (۵). مدل SARIMA در مقایسه با سایر مدل‌ها به تعداد داده‌های کمتری نیاز داشته و رصدی کلی بر روی تمامی داده‌ها دارد؛ همچنین این مدل به دلیل دارا بودن

مدل میانگین متحرک خود هم‌بسته یکپارچه فصلی (SARIMA)

مدل SARIMA یک مدل عمومی خطی است که از آن برای

$$\bar{R}_i = \frac{R_{ih}A_h + R_{id}A_d}{A_h + A_d} \quad (۲)$$

$$\bar{\bar{R}}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{R}_i}{n} \quad (۳)$$

$$\overline{ST} = 10^6 d c A_t \quad (۴)$$

$$\overline{VM} = \overline{E} - \overline{ST} \quad (۵)$$

$$\alpha = 10^3 \frac{\overline{VM}}{\bar{\bar{R}}} \quad (۶)$$

که در آن‌ها $\bar{R}_i$ میانگین موزون بارندگی منطقه در سال i ام (میلی‌متر)، R_{ih} و R_{id} به ترتیب بارندگی سالیانه ارتفاعات و دشت در سال i ام (میلی‌متر)، A_h و A_d به ترتیب سطح ارتفاعات و دشت (کیلومتر مربع)، $\bar{\bar{R}}$ و n به ترتیب میانگین طولانی مدت بارندگی سالیانه دشت (میلی‌متر) و تعداد سال‌های مورد بررسی، $\bar{E}$ ، $\overline{ST}$ و $\overline{VM}$ به ترتیب میانگین تخلیه، افت و تغذیه طولانی مدت (میلی‌متر)، d و c به ترتیب افت متوسط سطح آب (متر) و ضریب ذخیره، A_t سطح تیسن (کیلومتر مربع) و α درصد تغذیه از بارندگی در مقیاس طولانی مدت می‌باشد. در نهایت ارتفاع و حجم تغذیه برای هر سال $i+1$ طبق روابط ۷ و ۸ محاسبه می‌شود.

$$H_M = \alpha \bar{\bar{R}}_{i+1} \quad (۷)$$

$$V_M = 10^3 H_M A_d \quad (۸)$$

که $\bar{\bar{R}}_{i+1}$ میانگین وزنی بارندگی سالانه دشت در سال $i+1$ ام بر حسب میلی‌متر و H_M و V_M نیز به ترتیب ارتفاع و حجم تغذیه بر حسب میلی‌متر و متر مکعب می‌باشند (۱۷).

برنامه‌ریزی خطی

برنامه‌ریزی خطی یا همان بهینه‌سازی خطی، از روش‌های ریاضی است که با استفاده از آن می‌توان مقدار بیشینه یا کمینه یک تابع خطی با تعدادی قید به صورت نامعادله را، روی یک چندضلعی محدب پیدا کرد. در واقع قیدها به صورت نامعادله، همان نمایش نموداری چندضلعی محدب هستند. ارتباط آسان با کاربر در نرم‌افزارهای مختلف و گسترده‌ی کاربرد این روش در علوم مختلف از جمله مزایای برنامه‌ریزی خطی بشمار می‌روند. در این پژوهش برای هر سناریو برداشت از آب‌های زیرزمینی با استفاده از برنامه‌ریزی خطی حداکثر درآمد کشاورزان تعیین شد. در این راستا تابع هدف مطابق رابطه ۹ در نظر گرفته شد.

$$\max NI = \sum_{i=1}^n (Y_j P_j - C_j) A_j \quad (۹)$$

ماهیت فصلی، از توانایی بالایی در مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی مانند بارندگی برخوردار است. شکل عمومی مدل $SARIMA$ به صورت $SARIMA(p,d,q) \times (P,D,Q)_s$ بوده که بخش دوم آن مربوط به سری زمانی فصلی است. رابطه ۱ فرم کلی این مدل را نشان می‌دهد.

$$\phi_p(B) \Phi_p(B^s) W_t = \theta_q(B) \Theta_q(B^s) a_t \quad (۱)$$

$$W_t = (1-B)^d (1-B^s)^D Z_t$$

$\phi_p(B)$ و $\theta_q(B)$ به ترتیب چندجمله‌ای‌های خودهمبسته و میانگین متحرک غیر فصلی و $\Phi_p(B^s)$ و $\Theta_q(B^s) a_t$ به ترتیب چندجمله‌ای‌های خودهمبسته و میانگین متحرک فصلی هستند. همچنین B عملگر وقفه، p و q به ترتیب مرتبه عملگر خودهمبسته و میانگین متحرک غیرفصلی، P و Q به ترتیب مرتبه عملگر خودهمبسته و میانگین متحرک فصلی، d و D به ترتیب مرتبه تفاضل‌گیری غیرفصلی و فصلی و a_t دنباله متغیرهای تصادفی مستقل و هم‌توزیع با میانگین صفر و واریانس σ_a^2 است. مدل $SARIMA$ مبتنی بر سه مرحله شناسایی، ارزیابی و پیش‌بینی می‌باشد (۴ و ۲۷).

برنامه‌ریزی ژنتیکی

برنامه‌ریزی ژنتیکی کاربرد بسیاری در مشخص کردن ساختار مدل، برای علم مهندسی دارد. در این راستا از این روش جهت مشخص کردن ساختار اساسی پدیده‌های طبیعی یا مصنوعی به منظور مدل‌سازی عددی آن‌ها استفاده می‌شود (۲۶). خروجی‌ها در مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی برخلاف سایر مدل‌ها به صورت یک رابطه ارائه می‌شوند که این امر موجب سهولت بکارگیری آن‌ها در کارهای اجرایی می‌شود. به بیان دیگر نتایج این مدل کاملاً صریح بوده و به سادگی توسط سایرین قابل درک و استفاده می‌باشد. این روش قادر است ساختار مدل و پارامترهای آن را بهینه‌سازی کند. برنامه‌ریزی ژنتیکی به صورت یک تکنیک برنامه‌ریزی خودکار عمل می‌کند؛ به طوری که جمعیتی برای ایجاد فرزندان اصلاح شده و به منظور تکامل، به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها می‌کنند. برنامه‌ریزی ژنتیکی به جای سلسله ارقام دودویی، برخلاف الگوریتم ژنتیک روی ساختار درختی فرمول‌ها عمل می‌کند. مجموعه توابع و ترمینال‌ها، ساختارهای درختی را تشکیل می‌دهند (۱۳).

تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی

برای محاسبه تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی پیش‌بینی شده، میانگین وزنی بارندگی برای هر سال از طریق رابطه ۲ محاسبه شده و با استفاده از درصد تغذیه از بارندگی در طولانی مدت، تغذیه سه سال آینده تخمین زده شد. روابط ۲ تا ۶ روند کلی محاسبات را نشان می‌دهند.

اطلاعات بین اعضاء ایجاد شده و این اصل آن را به یکی از ساده ترین و درعین حال پرکاربردترین الگوریتم های فرا کاوشی تبدیل کرده است. الگوریتم ازدحام ذرات از دیدگاه محاسباتی سرعت بالایی داشته و به حافظه کمی نیاز دارد.

تابع جریمه

دو نمونه از مهم ترین روش های بهینه سازی تصادفی در حل مسئله های مقید عبارتند از: روش هایی که بر اساس جستجوی ناحیه قابل قبول طراحی شده اند و روش هایی که بر اساس استفاده از تابع جریمه مسئله را حل می کنند (۶). روش های جریمه با استفاده از عملگرهای جمع شونده و ضرب شونده، تابع هدف جدیدی ایجاد کرده و مسئله را نامقید می کنند. روابط ۱۱ و ۱۲ به ترتیب عملگرهای جمع شونده و ضرب شونده را نشان می دهند.

$$eval(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}) + p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$eval(\bar{x}) = \begin{cases} f(\bar{x}) & \text{if } \bar{x} \in F \\ f(\bar{x}) \times p(\bar{x}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$p(\bar{x})$ عملگر جریمه و F ناحیه پاسخ های امکان پذیر است که در صورت خارج شدن پاسخ ها از این ناحیه، تابع هدف به مقدار $p(\bar{x})$ جریمه خواهد شد (۳۲). در مسئله های کمینه سازی در صورت تخطی از محدودیت های تعیین شده، در حالت جمع شونده $p(\bar{x})$ مقداری مثبت و در حالت ضرب شونده مقداری بزرگتر از یک به خود می گیرد. طبق طبقه بندی دیگری، توابع جریمه به دودسته اصلی ساکن و پویا تقسیم می شوند. توابع جریمه ساکن از مقداری ثابت در طول فرایند بهینه سازی استفاده می کنند، در مقابل در توابع جریمه پویا، جریمه ها در طول فرایند اصلاح می شوند.

جریمه های ساکن

در این نوع جریمه، مقادیر جریمه به شماره نسل ها وابستگی ندارد و برای پاسخ های غیرقابل قبول یک جریمه ثابت در نظر گرفته می شود. همایفر و همکاران (۸) نوعی تابع جریمه ساکن را ارائه دادند. در این روش پس از تعریف L گروه تخطی برای هر قید، ضریب های جریمه نیز توسط کاربر تعریف شده و سپس جمعیت تصادفی با استفاده از پاسخ های قابل قبول و غیرقابل قبول تولید می شود. هر یک از پاسخ ها با استفاده از رابطه ۱۳ ارزیابی می شوند.

که در این رابطه NI سود خالص کشاورزان در سناریو مورد بررسی (ریال)، Y_j عملکرد محصول j ام (کیلوگرم بر هکتار)، P_j و C_j به ترتیب قیمت هر کیلوگرم محصول j ام و هزینه تولید هر هکتار محصول j ام (ریال)، A_j سطح زیر کشت محصول j ام (هکتار) و n تعداد محصولات می باشد.

همان طور که در رابطه ۱۰ نشان داده شده است، آب و زمین در دسترس به عنوان مهم ترین قیدهای مدل تعریف می شوند. همچنین سطح زیر کشت هر محصول به حداقل ۳۰٪ و حداکثر ۱۷۰٪ سطح زیر کشت فعلی محدود شده است.

$$\sum_{j=1}^n W_j A_j \leq W_T \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^n A_j \leq A_T$$

$$0.3A_{j_{current}} \leq A_j \leq 1.7A_{j_{current}}$$

در این رابطه W_j و W_T به ترتیب آب مورد نیاز محصول j ام و کل آب در دسترس در هر سناریو برداشت (متر مکعب)، A_j و A_T به ترتیب سطح کشت بهینه محصول j ام و کل سطح قابل کشت دشت سیلاخور (هکتار) و $A_{j_{current}}$ سطح زیر کشت فعلی محصول j ام (هکتار) است.

الگوریتم تکامل تفاضلی

یک الگوریتم بهینه سازی عمومی علاوه بر داشتن قابلیت استفاده آسان، باید به گونه ای طراحی گردد که بطور قابل اطمینان، به مقدار بهینه واقعی همگرا شود؛ همچنین زمانی که رایانه برای جستجوی راه حل صرف می کند نباید زیاد باشد. بنابراین یک روش عمومی و کارآمد بهینه سازی باید کاملاً ساده، دارای استفاده آسان، قابل اعتماد و سریع باشد. الگوریتم تکامل تفاضلی دارای چنین ویژگی هایی است که از زمان ایجاد آن در سال ۱۹۹۵، به عنوان یک بهینه ساز پرکاربرد مورد استقبال قرار گرفت (۲۲). این روش برای شروع کار تنها به تنظیم سه پارامتر NP اندازه جمعیت^۱، F وزن جهش^۲، و Cr احتمال انجام بازترکیبی یا تقاطع^۳ نیاز دارد. الگوریتم تکامل تفاضلی از چهار قسمت اصلی ارزش دهی، جهش، تقاطع و انتخاب تشکیل شده است (۲۹).

الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات از رفتار گروهی پرندگان و ماهی ها الهام گرفته شده است. پرندگان و ماهی ها با استفاده از تجربه موفقیت آمیز خود و اعضاء همسایه، به صورتی که با یکدیگر برخورد نکنند، به دنبال غذا می گردند (۱۱). این الگوریتم بر اساس همین تقسیم

$$H(x) = \sum_{i=1}^m \theta(q_i(x)) q_i(x)^{\gamma_{q_i}(x)} \quad (18)$$

که $q_i(x) = \max\{0, g_i(x)\}, i = 1, \dots, m$ است و به‌عنوان تابع وابسته به تخطی قیود تعریف می‌شود؛ همچنین $\theta(q_i(x))$ تابع تخصیص چند مرحله‌ای، $\gamma(q_i(x))$ توان تابع جریمه و $g_i(x)$ تابع قیود مسئله می‌باشد (۲۱).

نتایج و بحث

نتایج الگوی کشت بهینه

به‌منظور پیش‌بینی بارندگی سه سال آینده، نخست سری زمانی بارش ۱۰ سال گذشته با استفاده از الگوهای سری زمانی SARIMA و برنامه‌ریزی ژنتیکی در دو حالت فصلی و ماهیانه مدل‌سازی شده و با استفاده از معیارهای سنجش و ارزیابی $RMSE^1$ و DC^2 مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل از این ارزیابی که در جدول ۱ درج شده است، بیانگر برتری مدل برنامه‌ریزی ژنتیکی در حالت ماهیانه بر سایر مدل‌ها می‌باشد.

پس از انتخاب مدل برتر، بارندگی سه سال آینده زراعی پیش‌بینی شد. سری زمانی بارش واقعی دشت سیلاخور در ده سال گذشته و سری زمانی مدل‌سازی شده با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین میزان بارندگی پیش‌بینی شده برای سه سال آینده نیز در این شکل مشخص شده است.

در گام بعد تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از بارندگی پیش‌بینی شده در دشت سیلاخور برای سه سال زراعی آینده تخمین زده شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، روند بارش و به دنبال آن میزان تغذیه در سه سال آینده به‌صورت کاهشی می‌باشد.

افت تراز آب‌های زیرزمینی در دشت سیلاخور، لزوم تغذیه آن در سال‌های آینده را می‌رساند. از طرفی حدود ۵۰٪ برداشت از آب‌های زیرزمینی در این دشت صرف کشت محصولات باغی، مصارف صنعتی و آشامیدنی شده و ۵۰٪ مابقی صرف کشت محصولات زراعی مورد مطالعه در این پژوهش می‌شود؛ بنابراین با در نظرگیری حاشیه اطمینان، ۴۵٪ حجم تغذیه در هر سال به‌عنوان حداقل برداشت تعیین شد. حداکثر برداشت سالانه برای کشت چهار محصول زراعی گندم، جو، شلتوک و ذرت علوفه‌ای نیز معادل ۱۴۰٪ برداشت در سال ۱۳۹۴، یعنی ۲۴۴/۱ میلیون متر مکعب، در نظر گرفته شد. سپس ۱۰۰ مقدار مختلف برای برداشت از آب‌های زیرزمینی با فواصل مساوی، تحت ۱۰۰ سناریو برداشت در هر سال تعیین شد.

$$eval(\bar{x}) = f(\bar{x}) + \sum_{j=1}^m R_{ij} \max[0, g_j(\bar{x})]^2 \quad (19)$$

که m به‌عنوان تعداد قیود، R_{ij} به‌عنوان ضریب جریمه وابسته به قید j ام و گروه تخطی i ام و $g_j(\bar{x})$ به‌عنوان قید نامساوی j ام است. هماییفر و همکاران با استفاده از رابطه $h_j(\bar{x}) - \varepsilon \leq 0$ قیود نامساوی را به قیود مساوی تبدیل کردند که ε یک عدد مثبت کوچک است. میخالویچ (۱۶) نشان داد که کیفیت پاسخ‌ها حساسیت بسیاری به مقادیر این مولفه‌ها دارند.

جریمه پویا

جونز و هوک (۹) رابطه پویای ۱۴ را برای ارزیابی پاسخ‌ها ارائه دادند که مقدار جریمه‌ها با تولید نسل‌ها افزایش می‌یابد.

$$eval(\bar{x}) = f(\bar{x}) + (Ct)^\alpha SCV(\beta, \bar{x}) \quad (14)$$

$$SCV(\beta, \bar{x}) = \sum_{i=1}^q D_i^\beta(\bar{x}) + \sum_{j=q+1}^m D_j(\bar{x}) \quad (15)$$

$$D_j(\bar{x}) = \begin{cases} 0 & g_i(\bar{x}) \leq 0, 1 \leq i \leq q \\ |g_j(\bar{x})| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$D_j(\bar{x}) = \begin{cases} 0 & -\varepsilon \leq h_j(\bar{x}) \leq \varepsilon, q+1 \leq j \leq m \\ |h_j(\bar{x})| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

در این رابطه C, α و β ثابت بوده و کاربر آن‌ها را تعریف می‌کند. کیفیت پاسخ‌های ممکن، نسبت به تغییرات α و β بسیار حساس هستند (۳۲).

جریمه پویا طبقه‌بندی شده

در این نوع جریمه، گروه‌هایی از تخطی تعیین شده و جریمه پویای هر پاسخ با توجه به مقدار تخطی از قیود و شماره نسل تعیین می‌شود. رابطه ۱۷ صورت کلی این‌گونه توابع جریمه را نشان می‌دهد.

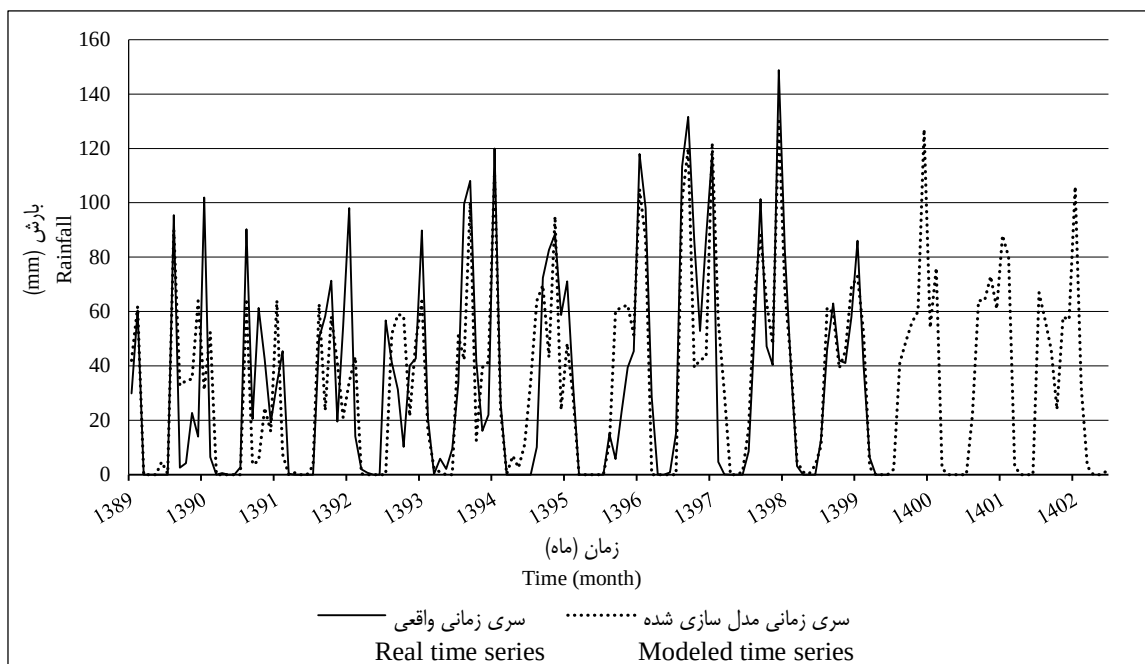
$$F(x) = f(x) + h(k)H(x) \quad x \in S \subset R^n \quad (17)$$

در این رابطه $f(x)$ تابع هدف اصلی مسئله مقید بوده و $h(k)$ به‌عنوان مقدار جریمه اصلاح‌شده پویا و k به‌عنوان شماره تکرار جاری الگوریتم در نظر گرفته می‌شود. $H(x)$ نیز به‌عنوان ضریب جریمه مطابق رابطه ۱۸ تعریف می‌شود (۳۱).

جدول ۱- ارزیابی و مقایسه مدل‌های SARIMA و GP

Table 1- Evaluation and comparison of SARIMA and GP models

	مدل (Model)	RMSE	DC
SARIMA	ماهانه (Monthly)	44.4	0.71
	فصلی (Seasonal)	77.2	0.52
GP	ماهانه (Monthly)	23.6	0.91
	فصلی (Seasonal)	52	0.68



شکل ۳- سری زمانی بارش واقعی و مدل سازی شده با استفاده از برنامه ریزی ژنتیکی

Figure 3- Real rainfall time series and modeled using GP

جدول ۲- میزان بارندگی پیش بینی شده با استفاده از برنامه ریزی ژنتیکی و تغذیه آب‌های زیرزمینی ناشی از آن

Table 2- Forecasted rainfall using GP and groundwater recharge

سال Year	بارندگی پیش بینی شده Forecasted rainfall (mm)	ارتفاع تغذیه Recharge height (mm)	حجم تغذیه Recharge volume (MCM)
1399-1400	467	75.7	130.4
1400-1401	455	75.3	127
1401-1402	448	72.6	125

شده و سود حاصل از کشت هر محصول با بررسی سال‌های گذشته به صورت نسبتی از قیمت محصول در هر سال محاسبه گردید. همان طور که شکل ۴ نشان داده شده است، با افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی، درآمد کشاورزان نیز افزایش می‌یابد؛ اما در برداشت‌های بیشتر از ۲۲۳/۵، ۲۲۵/۲ و ۲۲۵/۱ میلیون متر مکعب به ترتیب برای سال‌های زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، ۱۴۰۱-۱۴۰۰ و ۱۴۰۲-۱۴۰۱

حداکثر درآمد کشاورزان و الگوی کشت منطقه نیز برای هر سناریو برداشت با استفاده از برنامه ریزی خطی با محدودیت‌های کل زمین در دسترس برای کشاورزی و میزان برداشت تعیین شده در هر سناریو به دست آمد. همچنین مساحت کشت هر محصول به حداقل ۳۰٪ و حداکثر ۱۷۰٪ سطح زیر کشت فعلی محدود شد. قیمت هر محصول با توجه به میانگین تورم بلندمدت کشور، یعنی ۲۰٪ پیش‌بینی

پیروی از الگوی کشت بهینه، درآمد کشاورزان منطقه ۱۸٪ افزایش می‌یابد؛ به صورتی که، سطح کشت محصولات گندم و ذرت علوفه‌ای نسبت به سطح کشت فعلی تا محدوده مجاز تعریف شده افزایش یافته و سپس به منظور حداکثرسازی تابع هدف، به دلیل صرفه اقتصادی محصول شلتوک نسبت به جو، سطح کشت آن افزوده می‌شود.

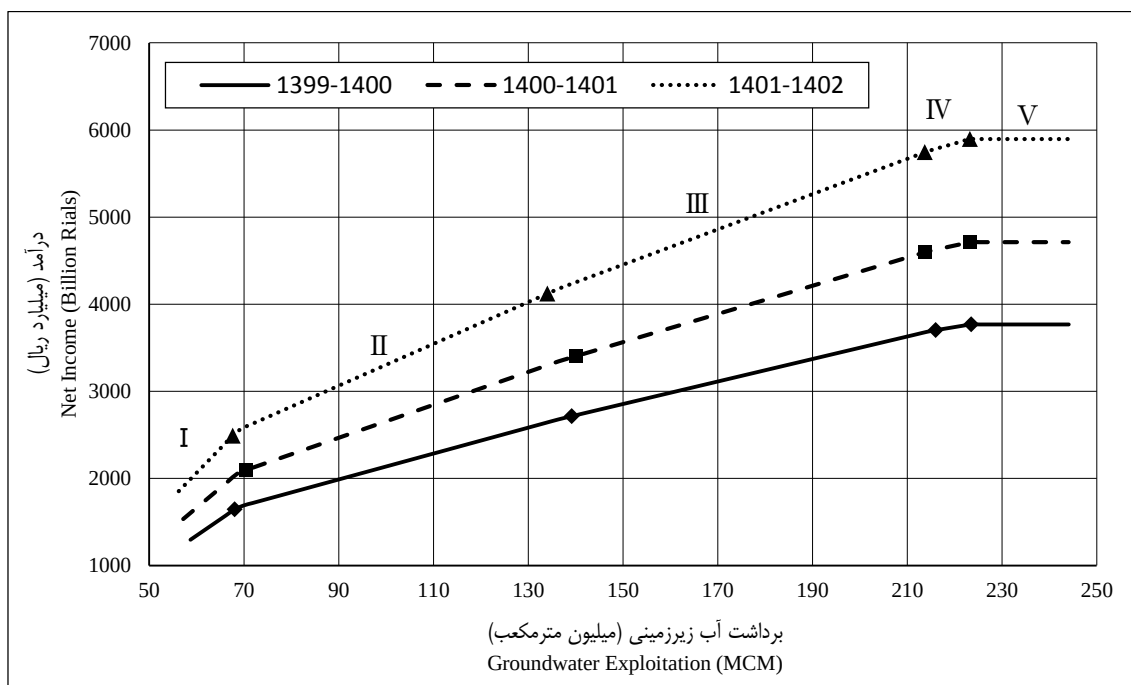
نتایج بررسی الگوریتم‌ها و توابع جریمه

پس از تعیین درآمد کشاورزان در سناریوهای برداشت مختلف برای سه سال آینده، عملکرد دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای حداکثرسازی درآمد کشاورزان و رسیدن به جواب‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی بررسی شد؛ در این راستا به‌منظور نامقیدسازی مسئله تعیین الگوی کشت، محدودیت‌های زمین قابل کشت و آب قابل برداشت در هر سناریو به‌صورت توابع جریمه ضرب شونده تعریف شدند. همچنین تعداد جمعیت و ضرایب عملگرهای تقاطع و جهش در هر دو الگوریتم یکسان در نظر گرفته شدند. همان‌طور که در شکل ۷، تعداد تکرارهای دو الگوریتم برای سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ نشان داده شده است، به‌طور کلی الگوریتم ازدحام ذرات در این مسئله بسیار سریع‌تر به جواب می‌رسد. به طور میانگین تعداد تکرارهای الگوریتم ازدحام ذرات برای حل هر سناریو در این مسئله، ۳۸٪ تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی است. الگوریتم تکامل تفاضلی با تغییر شرایط مسئله، در تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به جواب، تغییرات محسوسی از خود نشان می‌دهد.

۱۴۰۱ محدودیت کل زمین قابل کشت مانع از افزایش سطح زیر کشت محصولات شده و با افزایش برداشت، درآمد کشاورزان ثابت می‌ماند. همچنین منحنی درآمد هر سال از پنج خط تشکیل شده است که در طول هر پاره خط، سطح کشت یک محصول افزایش پیدا کرده و باعث افزایش درآمد می‌شود. در طول پاره خط پنجم نیز سطح کشت تمام محصولات ثابت باقی‌مانده که به دنبال آن درآمد نیز ثابت می‌شود. همچنین به دلیل در نظرگیری تورم در تخمین قیمت سه سال آینده محصولات کشاورزی، منحنی درآمد در طی سال‌های متوالی افزایش یافته است.

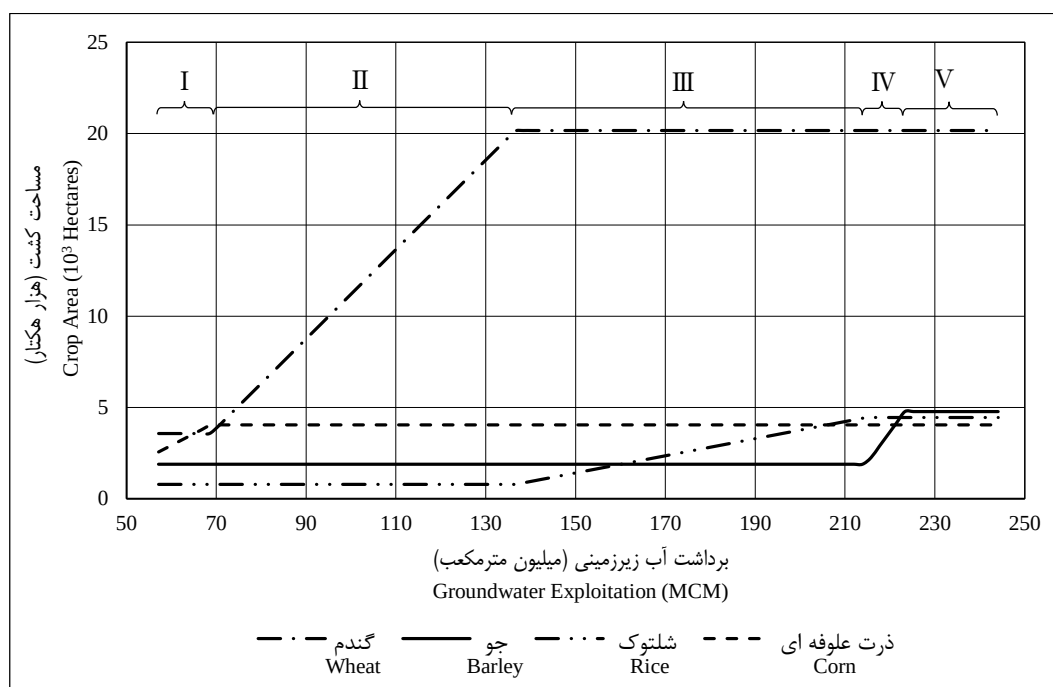
شکل ۵ مساحت کشت بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی را در سناریوهای برداشت مختلف برای سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ نشان می‌دهد. ترتیب تغییر مساحت کشت محصولات بیانگر آن است که اولویت افزایش سطح کشت یک محصول هم‌زمان افزایش میزان برداشت، رابطه مستقیمی با به‌صرفه بودن آن محصول از نظر سود خالص و مصرف آب دارد؛ به بیان دیگر با مصرف مقدار مشخصی آب، به ترتیب محصولات ذرت، گندم، شلتوک و جو بیشترین درآمد را نصیب کشاورزان می‌کنند. روند کلی تغییرات سطح کشت محصولات با افزایش برداشت آب برای دو سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ و ۱۴۰۱-۱۴۰۰ نیز به همین صورت است.

با مقایسه الگوی کشت بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی و الگوی کشت بهینه فعلی که در شکل ۶ نشان داده شده است می‌توان دریافت، در صورت عدم تغییر میزان برداشت از آب‌های زیرزمینی و

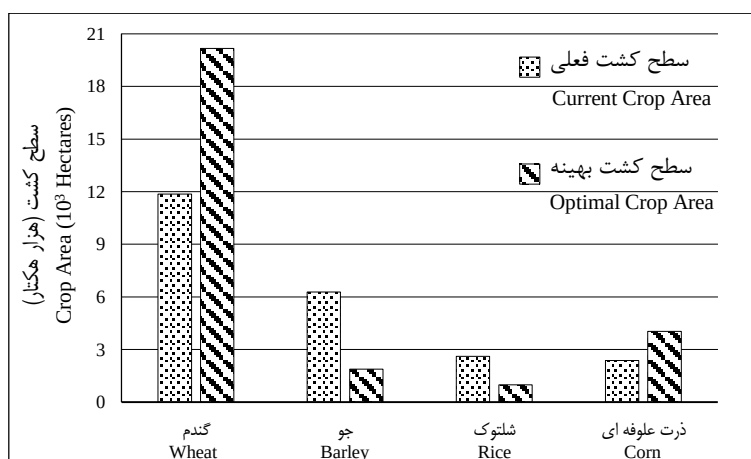


شکل ۴- درآمد خالص کشاورزان متناسب با برداشت آب

Figure 4- The net income of farmers in proportion to water exploitation



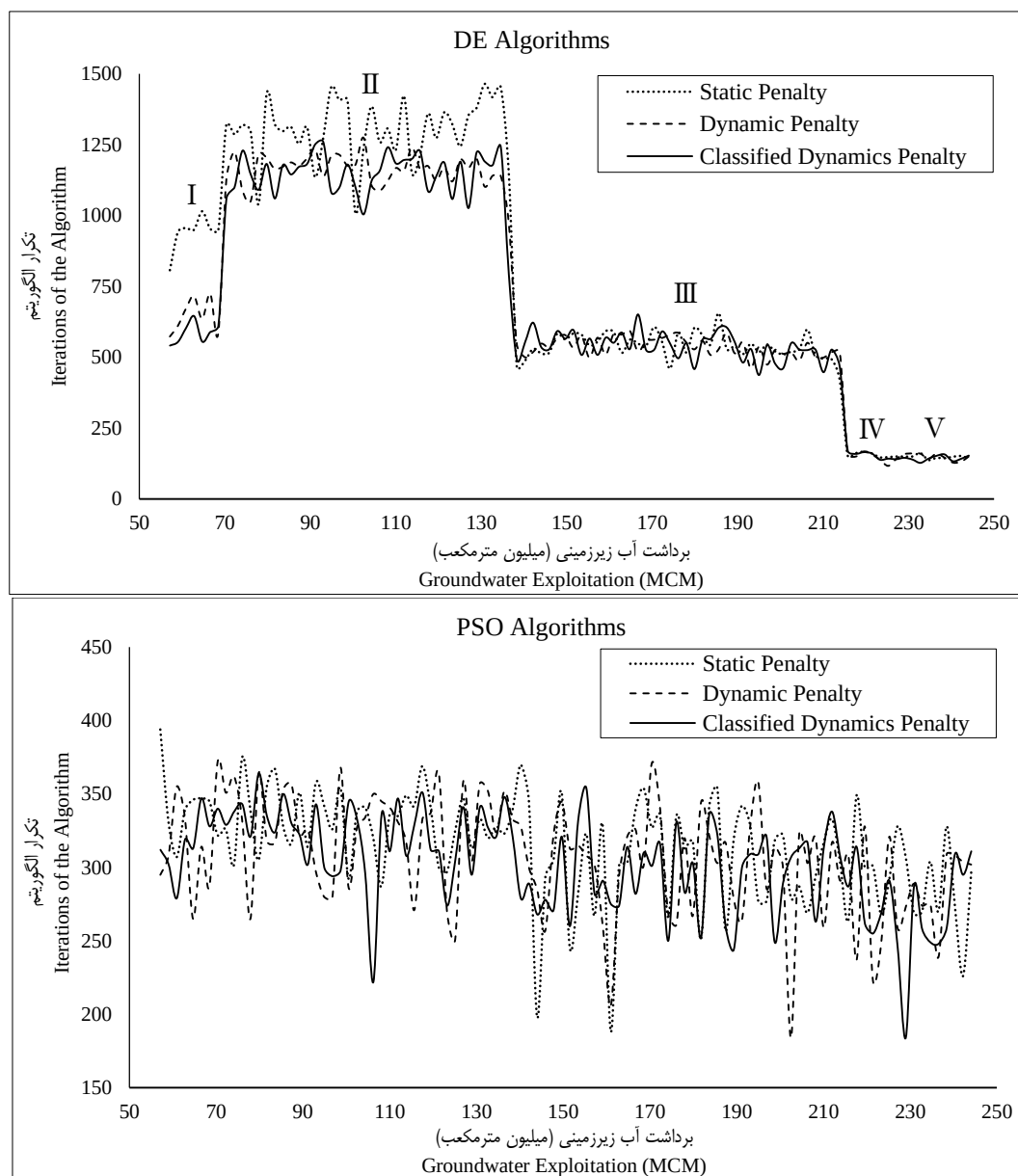
شکل ۵- الگوی کشت بهینه محصولات کشاورزی در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰
Figure 5- Optimal cropping pattern of agricultural products in 2021-2022



شکل ۶- الگوی کشت فعلی و بهینه با میزان برداشت آب یکسان
Figure 6- Current and optimal cropping pattern with the same amount of water exploitation

اعمال توابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده، پویا و ساکن به ترتیب بیشترین تأثیر را در کاهش تعداد تکرارهای الگوریتم برای رسیدن به پاسخ بهینه حاصل از برنامه‌ریزی خطی ایفا می‌کنند. روند کلی تعداد تکرارهای دو الگوریتم برای رسیدن به پاسخ‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی در دو سال دیگر نیز به همین صورت است.

منظور از تغییر شرایط مسئله، تغییر محصول انتخابی برای افزایش سطح کشت با افزایش برداشت است. پنج ناحیه متناظر در شکل‌های ۴ و ۵ که شرایط مسئله در آن‌ها تغییر می‌کند نیز در شکل ۷ نشان داده شده است. در نظر گرفتن یک تابع جریمه یکتا برای تمام مسائل بهینه‌سازی به دلیل حساسیت بالای کیفیت پاسخ‌ها به پارامترهای جریمه، غیرممکن است؛ اما طبق نتایج مندرج در شکل ۷،



شکل ۷- تعداد تکرار الگوریتم‌های تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات با سه نوع تابع جریمه برای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰
Figure 7- Number of iterations of DE and PSO algorithms with three types of penalty functions for 2021-2022

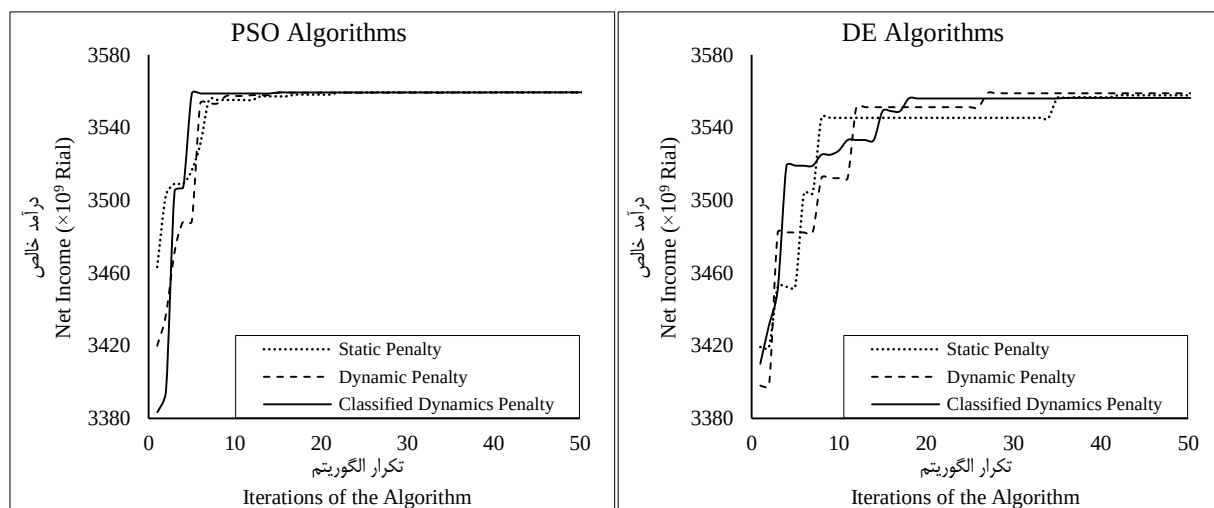
کشاورزان، در ۱۰۰ تکرار ابتدایی دو الگوریتم، نشان داده شده است. این نتایج متعلق به حداکثرسازی درآمد در سال ۱۴۰۰-۱۴۰۱ و متناسب با سناریو برداشت ۱۵۰ میلیون مترمکعب می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، الگوریتم تکامل تفاضلی با اعمال تابع جریمه ساکن پس از ۳۶ تکرار و با اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی شده پس از ۱۷ تکرار به پاسخ بهینه همگرا می‌شود که بیانگر تأثیر توابع جریمه در فرایند بهینه‌سازی این الگوریتم می‌باشد.

نتایج مندرج در جدول ۳ حاکی از آن است که الگوریتم تکامل تفاضلی همان‌طور که نسبت به تغییر شرایط مسئله واکنش نشان می‌داد، در اینجا نیز با تغییر تابع جریمه از حالت ساکن به پویای طبقه‌بندی شده، تعداد تکرارهای آن برای رسیدن به جواب برنامه‌ریزی خطی به طور میانگین ۱۱٪ کاهش می‌یابد؛ در مقابل الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به تغییر تابع جریمه واکنش محسوسی نشان نداده و تکرارهای آن به طور میانگین تنها ۳٪ کاهش می‌یابد. در شکل ۸ تاریخچه زمانی فرایند بهینه‌سازی درآمد خالص

جدول ۳- میانگین تعداد تکرار الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات برای تعیین الگوی کشت بهینه در ۱۰۰ سناریو

Table 3- Average number of iterations of DE and PSO algorithms to determine the optimal cropping pattern in 100 scenarios

سال Year	الگوریتم Algorithm	تابع جریمه Penalty Function		
		ساکن Static	پویا Dynamic	پویای طبقه‌بندی شده Classified Dynamics
1399-1400	DE	779	710	701
	PSO	307	305	300
1400-1401	DE	780	707	696
	PSO	315	308	302
1401-1402	DE	791	704	698
	PSO	316	308	306
میانگین درصد کاهش تعداد تکرار الگوریتم نسبت به تعداد تکرار با جریمه ساکن		DE	-	2%
The average percentage reduction of the number of iterations of the algorithm compared to the number of iterations with Static Penalty		PSO	-	10%
				3%
				11%



شکل ۸- تاریخچه زمانی فرایند تعیین حداکثر درآمد کشاورزان

Figure 8- Time history of the process of determining the maximum income of farmers

شده و میزان برداشت در سال‌های گذشته تعیین شد. سپس الگوی کشت بهینه با تابع هدف حداکثرسازی درآمد کشاورزان و محدودیت‌های آب و زمین در دسترس برای هر سناریو برداشت، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به‌دست‌آمده و عملکرد دو الگوریتم تکامل تفاضلی و ازدحام ذرات با سه نوع تابع جریمه ساکن، پویا و پویای طبقه‌بندی‌شده برای رسیدن به جواب‌های به‌دست‌آمده از برنامه‌ریزی خطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند الگوی کشت منطقه بهینه نبوده و با بهینه‌سازی آن، می‌توان درآمد کشاورزان را تا ۱۸٪ افزایش داد. همچنین با افزایش برداشت آب، الگوی کشت منطقه به سمت محصولات آب‌بر خواهد رفت. نتایج بررسی الگوریتم‌ها

الگوریتم ازدحام ذرات نیز با اعمال تابع جریمه ساکن پس از ۱۲ تکرار و با اعمال تابع جریمه پویای طبقه‌بندی‌شده پس از ۷ تکرار به پاسخ بهینه میل می‌کند که این موضوع بیانگر تأثیر کم تغییر توابع جریمه در این الگوریتم می‌باشد. روند کلی تاریخچه زمانی فرایند حداکثرسازی درآمد کشاورزان در سایر سناریوهای برداشت نیز برای هر دو الگوریتم به همین صورت است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش ۱۰۰ سناریو برداشت مختلف از آب‌های زیرزمینی برای سه سال زراعی آینده با توجه به تغذیه ناشی از بارندگی پیش‌بینی

در نهایت پیشنهاد می‌شود سیاست‌های اقتصادی حاکم بر بخش کشاورزی با در نظر گرفتن میزان سود خالص محصولات کشاورزی نسبت به میزان آب مصرفی آن‌ها اتخاذ شود که در صورت افزایش برداشت آب از منابع زیرزمینی، الگوی کشت به سمت محصولات آب‌بر نرود.

و توابع جریمه نیز حاکی از آن است که در حل این مسئله الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم تکامل تفاضلی در ۸۴٪ سناریوها با تعداد تکرار کمتری به پاسخ بهینه می‌رسد. اعمال توابع جریمه طبقه‌بندی شده نیز تعداد تکرارهای الگوریتم تکامل تفاضلی را ۱۱٪ و تعداد تکرارهای الگوریتم ازدحام ذرات را ۳٪ نسبت به استفاده از جریمه ساکن کاهش می‌دهد.

منابع

- 1- Alabdulkader A.M., Al-Amoud A.I., and Awad F.S. 2012. Optimization of the cropping pattern in Saudi Arabia using a mathematical programming sector model. *Agricultural Economics* 58(2): 56-60.
- 2- Amini A., and Mirzaei M. 2014. Consequences of water deficiency crisis and become dry of Zayande-Roud in rural areas (Case study: Baraan plain in eastern Isfahan). *Journal of Community Development* 5(2):157-180. (In Persian with English abstract)
- 3- Birhanu K., Alamirew T., Olumana M.D., Ayalew S., and Aklog D. 2015. Optimizing cropping pattern using chance constraint linear programming for koga irrigation dam, Ethiopia. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, 10.
- 4- Box G.E., Jenkins G.M., and Reinsel G.C. 2011. Time series analysis: forecasting and control. John Wiley & Sons.
- 5- Chen K.Y., and Wang C.H. 2007. A hybrid SARIMA and support vector machines in forecasting the production values of the machinery industry in Taiwan. *Expert Systems with Applications* 32(1): 254-264.
- 6- Coello C.A.C. 2002. Theoretical and numerical constraint-handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 191(11): 1245-1287.
- 7- Hekmatnia M., Hosseini S.M., and Safdari M. 2020. Water Resource Management of the Agricultural Sector in Sistan and Baluchestan Province: a Virtual Water Perspective. *Journal of Irrigation & Water Engineering* 11(41): 137-149. (In Persian with English abstract)
- 8- Homaifar A., Qi C.X., and Lai S.H. 1994. Constrained optimization via genetic algorithms. *Simulation* 62(4): 242-253.
- 9- Joines J.A., and Houck C.R. 1994. On the use of non-stationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GA's. p. 579-584. The first IEEE conference on evolutionary computation, June 1994. IEEE world congress on computational intelligence.
- 10- Kaur B., Sidhu R.S., and Vatta K. 2010. Optimal crop plans for sustainable water use in Punjab. *Agricultural Economics Research Review* 23: 273-284.
- 11- Kennedy J., and Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. p. 1942-1948. ICNN'95-International Conference on Neural Networks, November 1995.
- 12- Komasi M., and Sharghi S. 2019. Recognizing factors affecting decline in groundwater level using wavelet-entropy measure (case study: Silakhor plain aquifer). *Journal of Hydroinformatics* 21(3): 510-522.
- 13- Koza J.R., and Poli R. 1992. Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection. MIT press.
- 14- Lu H.W., Huang G.H., and He L. 2010. Development of an interval-valued fuzzy linear-programming method based on infinite α -cuts for water resources management. *Environmental Modelling & Software* 25(3): 354-361.
- 15- Majidi N., Alizadeh A., and Ghorbani M. 2011. Determining The Optimum Cropping Pattern In Same Direction With Water Resources Management Of Mashhad-CHenaran Plain. *Journal of Water and Soil* 25(4): 776-785. (In Persian with English abstract)
- 16- Michalewicz Z. 1995. Genetic algorithms, numerical optimization, and constraints. p. 151-158. The 6th international conference on genetic algorithms, July 1995. Morgan Kauffman San Mateo.
- 17- Mohammadian F., Shahnooshi N., Ghorbani M., and Aghel H. 2002. Development of a sustainable crop pattern in Fariman-Torbat Jam plain. *Journal of Agricultural Economics* 4(2): 1-41. (In Persian)
- 18- Moradi H.R., Jalili K., and Bozorg Hadad O. 2017. Optimization of Land and Irrigation Water Allocation Based on Water Balance Approach Using Linear Programming. *Journal of Water and Soil* 31(2): 372-385. (In Persian with English abstract)
- 19- Nourani V., Ranjbar S., and Tootoonchi F. 2016. Change Detection of Hydrological Processes Using Wavelet-Entropy Complexity Measure Case Study: Urmia Lake. *Journal of Civil and Environmental Engineering University of Tabriz*, 45(3): 75-86. (In Persian with English abstract)
- 20- Osama S., Elkholy M., and Kansoh R.M. 2017. Optimization of the cropping pattern in Egypt. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4):557-566.
- 21- Parsopoulos K.E., and Vrahatis M.N. 2002. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems. *Intelligent Technologies–Theory and Application: New Trends in Intelligent Technologies* 76(1): 214-

- 220.
- 22- Price K., Storn R.M., and Lampinen J.A. 2006. Differential evolution: a practical approach to global optimization. Springer Science & Business Media.
- 23- Rabani F., and Alikhani A. 2010. Regional Analysis of Climate Change (Drought) in the Karaj River Basin. Water challenge scientific conference in Qom. (In Persian)
- 24- Raju K.S., and Kumar D.N. 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. *Water Resources Management* 18(2): 163-176.
- 25- Reddy M.J., and Kumar D.N. 2007. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal* 52(4): 686-701.
- 26- Selle B., and Muttill N. 2011. Testing the structure of a hydrological model using Genetic Programming. *Journal of Hydrology* 397(1-2): 1-9.
- 27- Shumway R.H., and Stoffer D.S. 2017. Time series analysis and its applications: with R examples. Springer.
- 28- Siasar H., & Honar T. 2017. Optimization of Water Allocation Pattern crops Using a Genetic Algorithm. Proceedings of 3th International Conference on Agricultural Engineering and Natural Resources, July 2017. Ghazvin, Iran. (In Persian with English abstract)
- 29- Storn R., and Price K. 1997. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization* 11(4): 341-359.
- 30- Vahidi A. 2012. The Impact of Climate Change and Drought on Iran's Water Resources. Proceedings of 5th National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management, 2012. The Iranian Society of Irrigation & Water Engineering Kerman. Iran. (In Persian)
- 31- Yang J.M., Chen Y.P., Horng J.T., and Kao C.Y. 1997. Applying family competition to evolution strategies for constrained optimization. p. 201-211. International conference on evolutionary programming, April 1997. Springer, Berlin, Heidelberg.
- 32- Yeniay Ö. 2005. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms. *Mathematical and computational Applications* 10(1): 45-56.
- 33- Yoosefdoost I., Mohamadrezapour O., and Ebrahimi M. 2016. Applying Genetic Algorithms in Determining Optimal Cropping Pattern in Different Weather Conditions in Qazvin Plain. *Journal of Water Research in Agriculture* 30(3): 317-331. (In Persian with English abstract)



Optimization of Cropping Pattern through Groundwater Resources Management Using DE and PSO Algorithms

M. Komasi^{1*} - A. Alizadefard²

Received: 23-02-2021

Accepted: 04-05-2021

Introduction: The occurrence of successive droughts, along with increasing water needs and lack of proper management of water resources has caused a water crisis that has various environmental and economic consequences. In addition to the drought, the change in the cropping pattern towards water crops has also made the water crisis the first critical phenomenon in recent years in the community, which has a direct impact on the agricultural sector as the largest consumer of water. Therefore, optimizing the cropping pattern is one of the most important factors in managing water resources and coping with water shortages. In this study, to determine the optimal cropping pattern of major crops in Silakhor plain in the next three years using two approaches using Linear Programming and Meta-Heuristic Algorithms.

Materials and Methods: In the first step, in order to determine the optimal cropping pattern with the aim of maximizing farmers' incomes in the next three years and the limited water and land available, the amount of rainfall recharge is used as a criterion to determine the water exploitation interval and determine the minimum and maximum exploitation each year. In order to forecast rainfall, SARIMA time series models and Genetic Programming were used considering the data of the last 10 years in both seasonal and monthly modes, and according to RMSE and D.C. criteria, a better model was selected. Then, for each crop year, 100 exploitation scenarios were determined according to the amount of groundwater recharge caused by rainfall and the amount of exploitation in previous years.

In the second step, Linear Programming was used to determine the optimal cropping pattern with the aim of maximizing farmers' incomes and limitations of exploitable water in each scenario and arable land. The price of each product is projected according to the average long-term inflation of the country, i.e., 20%, and the profit from the cultivation of each product was calculated as a proportion of the price of the product in each year by examining the previous years. Finally, the performance of three types of Static, Dynamic, and Classified Dynamics Penalty Functions into two algorithms, Differential Evolution and PSO was investigated to achieve the results obtained from Linear Programming. Static penalty functions use a constant value during the optimization process, whereas in dynamic penalty functions, the fines are modified during the process and depend on the number of generations. In the classified dynamics penalty, groups of violations are also determined, and the penalty of each response is determined according to the amount of violation of the restrictions and the generation number.

Results and Discussion: The results show that with increasing groundwater exploitation, farmers' incomes also increase; However, in the exploitation of more than 223.5, 222.2, and 225.1 million cubic meters for the cropping years 2020-2021, 2021-2022, and 2022-2023, respectively, the limitation of the total arable land has prevented the increase of the area under cultivation, and by increasing exploitation, farmers' incomes remain stable. Also, in order to cultivate four crops of wheat, barley, rice, and corn with the current area under cultivation in Silakhor plain, 142 million cubic meters of water is harvested annually from underground sources. By optimizing the cropping pattern for the four crops studied, with the current water exploitation, the income of farmers in the region will increase by 18%.

In general, the PSO algorithm answers this problem much faster. The average number of iterations of the PSO algorithm to solve each scenario in this problem is 38% of the number of iterations of the Differential Evolution algorithm. Overall, in solving this problem, the PSO algorithm has performed better in 84% of the scenarios. In penalty functions, the best performance in both algorithms belongs to the classified dynamics, dynamic, and static penalty functions, respectively. By changing the penalty function from static to classified dynamics penalty function, the number of iterations of the Differential Evolution algorithm to achieve the Linear Programming solution is reduced by an average of 11%; In contrast, the PSO algorithm did not react significantly to the change in the penalty function, and its repetitions decreased by an average of only 3%.

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor of Water Engineering and Hydraulic Structures, Ayatollah Boroujerdi University, Boroujerd, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: komasi@abru.ac.ir)

DOI: 10.22067/jsw.2021.68763.1025

Conclusion: The results show that the cropping pattern of the region is not optimal, and with the increase of water exploitation, it will move towards the cultivation of water products. Also, by optimizing the cultivation pattern of the region, farmers' incomes can be increased. Examination of Differential Evolution and PSO algorithms with three types of penalty functions also show that using the classified dynamics penalty function in the PSO algorithm can have good results.

Keywords: Groundwater, Linear Programming, Metaheuristic algorithms, Optimization, Silakhor plain



مقاله پژوهشی

تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش

حمزه سعیدیان^{۱*} - حمید رضا مرادی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۰

چکیده

تخمین مقدار رسوبدهی حوزه‌های آبخیز، مقابله با خطرات ناشی از تجمع رسوب در سازه‌های آبی و مخازن سدها از اهداف اساسی در مدیریت منابع آب می‌باشد که باعث توسعه پایدار می‌شود. در این تحقیق به منظور تعیین تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش در کاربری‌های مختلف نهشته‌های سازند گچساران، بخشی از حوزه آبخیز کوه گچ شهرستان ایذه با مساحت ۱۲۰۲ هکتار انتخاب گردید. در این تحقیق تعیین رابطه بین رسوب تولیدی و مؤلفه‌های مختلف فرسایش مانند میزان رواناب و مقدار نفوذپذیری خاک و شروع آستانه رواناب و فرسایش در کاربری‌های مختلف سازند گچساران به کمک رگرسیون چند متغیره انجام گرفت. سپس نمونه‌برداری مؤلفه‌های مختلف فرسایش در ۶ نقطه و با ۳ تکرار و در شدت‌های مختلف بارش ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه در سه کاربری مرتع، منطقه مسکونی و اراضی کشاورزی به کمک دستگاه شبیه‌ساز باران انجام شد. به منظور انجام تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS و EXCEL استفاده گردید. نتایج نشان داد که تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد و می‌توان از آن در سایر حوزه‌های آبخیز استفاده کرد. همچنین نتایج نشان داد که در تخمین رسوب به وسیله مؤلفه‌های مختلف فرسایش، شروع آستانه رواناب و فرسایش بیشترین تأثیرگذاری مثبت و منفی را دارد و در ۸ مورد در مدل‌سازی نقش ایفاء کرده است و سپس میزان نفوذپذیری خاک تأثیرگذاری مثبت و منفی، متوسطی دارد و در ۷ مورد در مدل‌سازی نقش ایفاء کرده است و میزان رواناب نیز در هیچ کدام از سه کاربری و شدت‌های مختلف بارش نقشی در مدل‌سازی ایفاء نکرده است و نشان از نقش بسیار مهمتر میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک در این روش مدل‌سازی در تخمین تولید رسوب دارد.

واژه‌های کلیدی: تخمین رسوب، سازند گچساران، کاربری اراضی، فرسایش

مقدمه

حمل می‌شود (۲۱). همچنین خصوصیات تنشی ذرات خاک در فرآیند انتقال موثر با اهمیت است (۲۵). هر چند فرسایش خاک در طول تاریخ وجود داشته، ولی در دهه‌های اخیر به دلیل دخالت‌های انسانی، مدیریت و کاربری نامناسب اراضی شدت یافته است. این امر در کشورهای در حال توسعه بسیار مهمتر است، زیرا در این کشورها فرسایش خاک خطر جدی برای توسعه پایدار به حساب می‌آید (۵ و ۱۲). فرسایش خاک بر روی زمین‌های زراعی ناشی از برهم کنش بین طبیعت و فعالیت‌های انسانی است (۲۶) که در سال‌های اخیر تشدید شده است. برای برآورد فرسایش و تولید رسوب روش‌های تجربی

مطالعات فرسایش و تولید رسوب در زنجیره مطالعات منابع طبیعی به عنوان یکی از حلقه‌های مهم در تصمیم‌گیری‌ها و موفقیت و کارآمدی طرح‌های آبخیزداری دارای اهمیت زیادی است. جهت برنامه ریزی و آگاهی از وضعیت تخریبی حوزه آبخیز، داشتن میزان فرسایش و رسوب تولیدی از هر حوزه آبخیز لازم و ضروری می‌باشد. اطلاعات درباره بار رسوب حوضه‌ها می‌تواند دورنمای میزان فرسایش حوضه‌ها را نشان دهد، رسوب از سطح خاک به وسیله برخورد قطرات باران و نیروی برشی رواناب کنده می‌شود و به میزان کم به وسیله پاشمان حاصل از قطرات باران و عمدتاً به وسیله رواناب به سمت پایین دست

۲- دانشیار دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، مازندران، نور

۱- استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حافظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات، آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمان، ایران
(*)- نویسنده مسئول:
(Email: Hamzah.4900@yahoo.com)

منطقه مورد مطالعه استفاده می‌شود می‌تواند یک روش برآورد تقریباً دقیق تولید رسوب در کوتاه‌ترین زمان و با صرف کمترین هزینه باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، بخشی از حوزه آبخیز کوه گچ شهرستان ایزه در استان خوزستان است که دارای مساحت ۱۲۰۲ هکتار مساحت می‌باشد. منطقه کوه گچ دارای مختصات جغرافیایی $31^{\circ} 50' 27''$ تا $31^{\circ} 53' 32''$ شرقی و $49^{\circ} 47' 9''$ تا $49^{\circ} 45' 27''$ شمالی می‌باشد.

روش تحقیق

در این تحقیق میزان رسوب تولیدی به روش پلات‌های آزمایشی اندازه‌گیری شد. به منظور بررسی رسوب نهشته‌های سازند گچساران در منطقه مورد مطالعه از یک دستگاه شبیه‌ساز باران صحرایی کامفورست استفاده شد. شبیه‌ساز باران مورد استفاده برای اندازه پلات ۶۲۵ سانتی‌متر مربع طراحی شده و به راحتی قابل حمل است. مساحت پلات‌های آزمایشی برابر ۶۲۵ سانتی‌متر مربع و در سطح هموار انتخاب گردید. این شبیه‌ساز باران برای تعیین خصوصیات فرسایشی خاک، رواناب، میزان نفوذ آب و همچنین برای تحقیقات خاک مناسب بوده و استفاده از آن به‌منظور تعیین رواناب نهشته‌های سطحی در صحرا روشی استاندارد محسوب می‌گردد (۶). در فواصل زمانی ۱۰ دقیقه و در شدت‌های بارش ۰/۷۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه میزان رسوب خارج شده از پلات جمع‌آوری و در ظروف شماره‌گذاری شده به‌صورت جداگانه نگهداری شد. پس از اتمام آزمایش، نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و رسوب موجود اندازه‌گیری شد (۹). همزمان با اندازه‌گیری رسوب سایر مولفه‌های مختلف فرسایش مانند میزان رواناب، میزان نفوذپذیری خاک و شروع آستانه رواناب و فرسایش نیز به دست آمدند. شدت غالب بارش منطقه در این تحقیق با استفاده از داده‌های هواشناسی حدود ۱ میلی‌متر در دقیقه به دست آمد و برای اینکه تغییرات مولفه‌های مختلف فرسایش در پایین‌تر و بالاتر از این شدت دیده شود از دو شدت ۰/۷۵ و ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه نیز استفاده شد. در این تحقیق، نمونه‌ها به صورت تصادفی مشخص و برداشت شد.

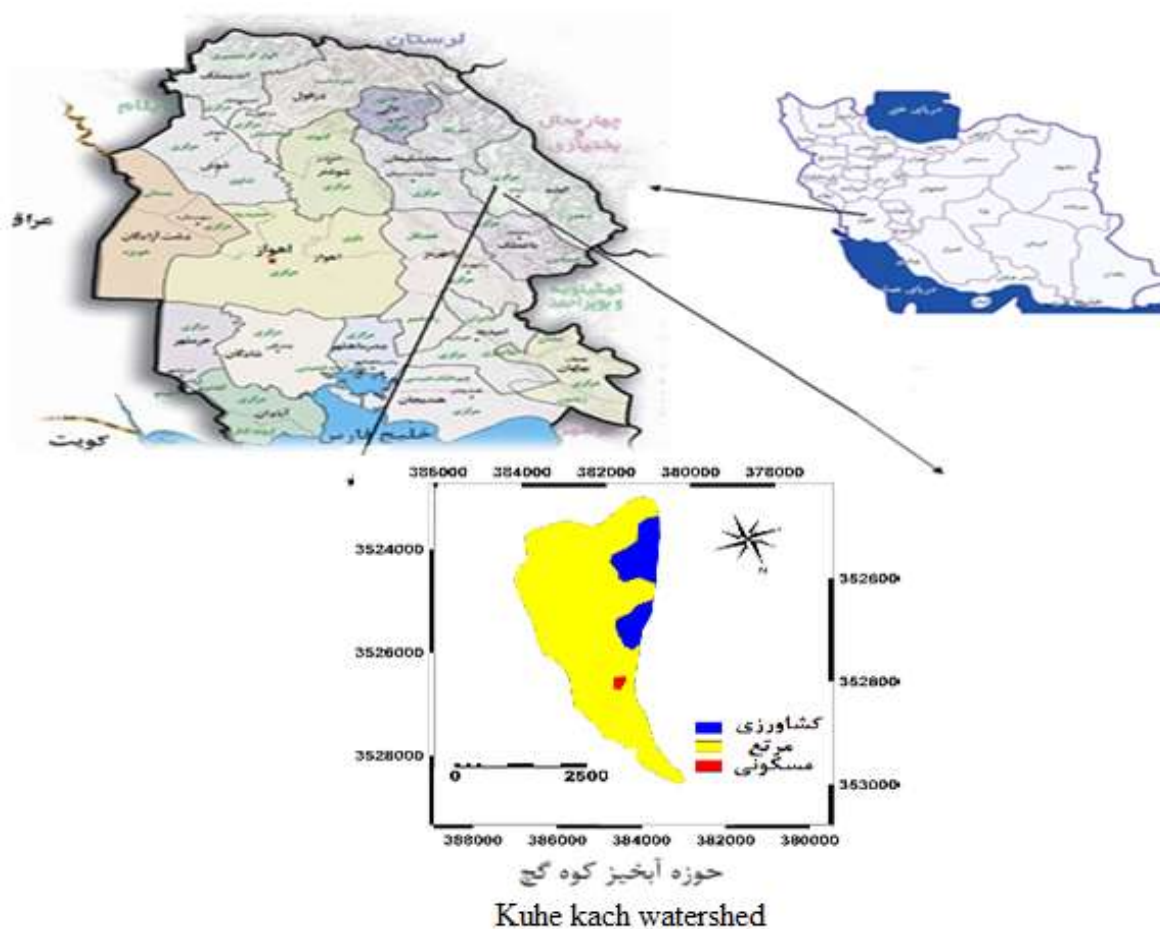
متعددی به کار گرفته می‌شود که معادله جهانی تلفات خاک^۱ (۱۱)، ۲۲ و ۲۳)، معادله اصلاحی تلفات خاک^۲ (۱۵)، معادله تغییر یافته تلفات خاک^۳ (۱۴) و بالاخره روش پسیاک^۴ (۱۳) مهم‌ترین این روش‌ها می‌باشند. واسنجی این روش‌ها نشان داد است که بعضی از آنها حتی تا چندین برابر از مقدار واقعی تفاوت دارند (۲، ۷ و ۱۸). ژانگ و همکاران (۲۴) به بررسی ارتباط میان ویژگی‌های ژئومورفیک حوضه با میزان رسوب در فلات لسی چین پرداختند. در این پژوهش از روش رگرسیون حداقل مربعات جزئی برای بررسی ارتباط بین ۲۹ ویژگی ژئومورفیک حوضه با میزان رسوب استفاده شد. نتایج نشان داد که پارامترهای شکل حوضه، ضریب پیچانرودی رودخانه، طول آبراهه اصلی حوضه، مشخصات ارتفاعی، وضعیت بارندگی و شیب به ترتیب بیشترین تاثیر را روی رسوبدهی حوضه دارند. آرس و همکاران (۳) فاکتورهای کنترل غلظت رسوب را برای منطقه پامپاس آرژانتین مورد تجربه و تحلیل قرار دادند. در این مطالعه ۲۵ رخداد بارندگی طی ۴ سال در منطقه‌ای به وسعت ۵۶۰ هکتار بررسی شد. در این پژوهش روش رگرسیونی چندگانه برای مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل توسعه یافته خطی قادر به توضیح ۸۵ درصد از تغییرات غلظت رسوب است. سانی (۱۹) در حوضه آبریز چاکرار در هند نشان داد که فاکتورهای فرم حوضه، نسبت گردی و نسبت طول شاخه اصلی از پارامترهای موثر بر فرسایش و تولید رسوب هستند. سازند گچساران از مهم‌ترین سازندهای زمین‌شناسی زون زاگرس در سنوزوئیک می‌باشند. سازند گچساران دارای حساسیت بالایی نسبت به فرسایش و رسوب می‌باشد (۴). این سازند حدود ۱۶۰۰ متر بستر داشته و از نظر سنگ‌شناسی مشتمل بر نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ آهک و مقداری شیل می‌باشد. سن گچساران میوسن پایینی می‌باشد (۱). فرسایش و تولید رسوب در ایران و سایر نقاط جهان پدیده‌ای جدی است که پیش‌بینی شدت عمل آن برای مناطق بدون ایستگاه اندازه‌گیری ضرورت پیدا می‌کند. تنوع عوامل موثر در فرسایش و تولید رسوب باعث شده است که ارائه روشی خاص برای برآورد رسوب میسر نگردد و برای منظورهای مختلف روش‌هایی تجربی به کار گرفته شوند که اساساً برای مناطق دیگری از جهان تهیه شده‌اند. البته، در سال‌های اخیر بعضی از مراکز تحقیقاتی به واسنجی این مدل‌ها و ارائه ضرایب اصلاحی پرداخته‌اند ولی شاید کمبود امکانات باعث شده است اغلب کاربران، این روش‌ها را بدون واسنجی و اعمال ضرایب اصلاحی به کار گیرند. بنابراین هدف این تحقیق تخمین رسوب به کمک مولفه‌های مختلف فرسایش می‌باشد که می‌تواند برای حوزه‌های آبخیز دارای ایستگاه اندازه‌گیری رسوب و فاقد ایستگاه اندازه‌گیری مفید باشد و با توجه با اینکه از داده‌های خود

3- RUSLE

4- Pacific Southwest Interagency Committee

1- USLE

2- MUSLE

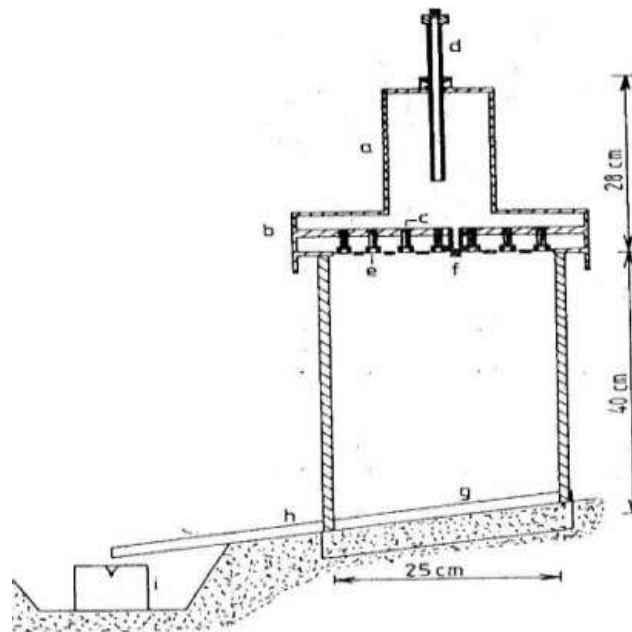


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان و ایران

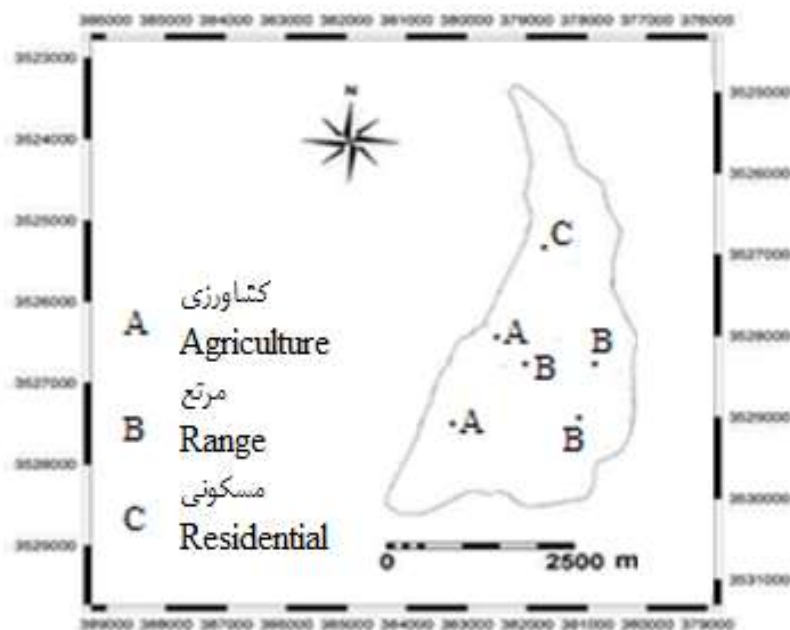
Figure 1- Location of the study area in the province and Iran

بتوان نتایج قابل قبول‌تری به دست آید، بدون پوشش گیاهی در نظر گرفته شد. در مجموع ۱۸ نمونه‌برداری مربوط به رسوب و ۱۸ نمونه‌برداری مربوط به میزان رواناب و ۱۸ نمونه‌برداری مربوط به میزان نفوذپذیری خاک و ۱۸ نمونه‌برداری مربوط به تعیین آستانه رواناب و فرسایش برداشت شد. به منظور انجام کلیه تجزیه و تحلیل‌های آماری از نرم‌افزار SPSS و EXCEL استفاده گردید و سپس مدل‌های نهایی تعیین گردید. لازم به توضیح است که در استفاده از رگرسیون چند متغیره در این تحقیق مقدار رسوب حاصل از به‌کارگیری باران‌ساز در شدت‌های مختلف بارش به عنوان متغیر وابسته و سایر مولفه‌های مختلف فرسایش در هر کاربری اراضی به عنوان متغیر مستقل مورد مطالعه قرار گرفت (۹) و در نهایت نیز سطح معنی‌داری رسوب مشاهده شده و رسوب تخمینی به وسیله رگرسیون چند متغیره با آزمون t جفتی با هم مقایسه شدند.

با توجه به هزینه و زمان، در سازند گچساران در ۶ سطح و هر سطح سه تکرار برای به‌کارگیری باران‌ساز مشخص شد. در سازند گچساران سه نقطه در کاربری مرتع و به صورت تصادفی همراه با پیدا کردن محل مناسب برای به‌کارگیری شبیه‌ساز باران انتخاب شدند و همچنین دو نقطه در کاربری زراعی و در قسمت میانی زمین زراعی انتخاب شدند. البته کاربری زراعی توسط جاده به دو قسمت تقسیم شده بود که یک نقطه در یک طرف جاده و یک نقطه نیز در طرف دیگر جاده برای به‌کارگیری شبیه‌ساز باران انتخاب شدند و همچنین یک نقطه در کاربری مسکونی که معمولاً در نقطه‌ای که محل رفت و آمد روستائیان به غیر از جاده می‌باشد که برای به‌کارگیری شبیه‌ساز باران انتخاب شد که اثر کوبیدگی ناشی از رفت و آمد روستائیان کاملاً مشهود باشد و در تغییرات مولفه‌های مختلف فرسایش بروز کند. سطح پلات نیز برای اینکه در هر سه کاربری شرایط مشابهی به وجود آید و



شکل ۲- مقطع عمودی شبیه‌ساز باران
Figure 2- Vertical Section of Rain simulator



شکل ۳- موقعیت نمونه‌برداری مولفه‌های فرسایش با استفاده از شبیه‌ساز باران
Figure 3- Sampling position of erosion different components using rain simulator

بنابراین روش تخمین رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش می‌تواند به عنوان ابزاری توانمند در مدل‌سازی تولید رسوب به کار گرفته شود.

نتایج و بحث

تخمین دقیق حجم رسوبات حمل شده در حوزه‌های آبخیز در بسیاری از پروژه‌های مدیریت منابع آب دارای اهمیت فراوان است.

جدول ۱- رابطه میزان رسوب در شدت ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه با مؤلفه‌های مختلف فرسایش

Table 1- Relationship between sediment rate at intensity of 0.75 mm/min with erosion different components

کاربری Land use	مدل‌های بدست آمده Obtained Models	ضریب رگرسیونی Regression coefficient
مرتج Range	$Se = 58.23 - 0.126 In - 1.69 Th$	0.67
زراعی Agriculture	$Se = 12.5 - 0.006 In + 0.16 Th$	0.25
مسکونی Residential	$Se = -797.9 + 0.169 In + 176.6 Th$	1

R: ضریب رگرسیون Se: میزان رسوب Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Se: Sediment rate, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

جدول ۲- ضریب بتای میزان رسوب در شدت ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه با مؤلفه‌های مختلف فرسایش

Table 2- Beta coefficient of sediment rate at intensity of 0.75 mm/min with erosion different components

مؤلفه‌های فرسایش Erosion components نوع کاربری Land use type	Ro	In	Th
کاربری مرتج Range land uses	-	-0.82	-0.74
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.08	0.103
کاربری زراعی Agriculture land use	-	-0.145	0.17
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.81	0.78
کاربری مسکونی Residential land use	-	23.3	23.1
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.000	0.000

R: ضریب رگرسیون Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

محاسباتی از شروع آستانه رواناب و فرسایش و سپس از میزان نفوذپذیری خاک دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشی در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری رابطه عکس دارد و با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک کم می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری کشاورزی بیشترین تأثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از شروع آستانه رواناب و فرسایش و سپس از میزان نفوذپذیری خاک دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشی در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش

نتایج تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش در جدول‌های ۱ تا ۶ نشان داده شده است. تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش می‌تواند یک از بهترین و ایده آل‌ترین روش‌های تخمین و مدل‌سازی با کمترین هزینه و زمان اجرایی باشد. در این تحقیق میزان رسوب تولیدی در شدت‌های مختلف بارش در سازند گچساران در رگرسیون چند متغیره به عنوان متغیر وابسته و سایر مؤلفه‌های مختلف فرسایش مانند میزان رواناب و نفوذپذیری خاک و همچنین آستانه شروع رواناب و فرسایش به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مرتج بیشترین تأثیرپذیری را طبق ضریب بتای

۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش رابطه مستقیم و با میزان نفوذپذیری خاک رابطه عکس دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش افزایش و میزان نفوذپذیری خاک کم می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مسکونی بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از میزان نفوذپذیری خاک و سپس از شروع آستانه رواناب و فرسایش دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشی در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش و با میزان نفوذپذیری خاک رابطه مستقیم دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه

رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک زیاد می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مرتع بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از شروع آستانه رواناب و فرسایش دارد. در این کاربری میزان رواناب و نفوذپذیری خاک نقشی در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش رابطه عکس دارد و با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش کم می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱ میلی‌متر در دقیقه در کاربری کشاورزی بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از میزان نفوذپذیری خاک دارد.

جدول ۳- رابطه میزان رسوب در شدت ۱ میلی‌متر در دقیقه با مولفه‌های مختلف فرسایش

Table 3- Relationship between sediment rate at intensity of 1 mm/min with erosion different components

کاربری Land use	مدل‌های بدست آمده Obtained Models	ضریب رگرسیونی Regression coefficient
مرتع Range	$Se = 13.2 - 0.89 Th$	0.23
زراعی Agriculture	$Se = 23.63 - 0.021 In$	0.73
مسکونی Residential	$Se = 29.2 + 0.069 In - 7.68 Th$	1

R: ضریب رگرسیون Se: میزان رسوب Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Se: Sediment rate, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

جدول ۴- ضریب بتای میزان رسوب در شدت ۱ میلی‌متر در دقیقه با مولفه‌های مختلف فرسایش

Table 4- Beta coefficient of sediment rate at intensity of 1 mm/min with erosion different components

مولفه‌های فرسایش Erosion components نوع کاربری Land use type	Ro	In	Th
کاربری مرتع Range land uses	-	-	-0.32
سطح معنی‌داری Significant level	-	-	0.397
کاربری زراعی Agriculture land use	-	-0.73	-
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.098	-
کاربری مسکونی Residential land use	-	0.69	-0.77
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.000	0.000

R: ضریب رگرسیون Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

نفوذپذیری خاک رابطه مستقیم دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش کاهش می‌یابد و میزان نفوذپذیری خاک زیاد می‌شود.

همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مرتع بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از شروع آستانه رواناب و فرسایش دارد. در این کاربری میزان رواناب و نفوذپذیری خاک نقشه در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش رابطه عکس دارد و با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش کم می‌شود.

در این کاربری میزان رواناب و شروع آستانه رواناب و فرسایش نقشه در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با میزان نفوذپذیری خاک رابطه عکس دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان نفوذپذیری خاک کم می‌شود. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مسکونی بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از میزان نفوذپذیری خاک و سپس از شروع آستانه رواناب و فرسایش دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشه در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش رابطه عکس و با میزان

جدول ۵- رابطه میزان رسوب در شدت ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه با مؤلفه‌های مختلف فرسایش

Table 5- Relationship between sediment rate at intensity of 1.25 mm/min with erosion different components

کاربری Land use	مدل‌های بدست آمده Obtained Models	ضریب رگرسیونی Regression coefficient
مرتج Range	$Se = 19.83 - 0.74 Th$	0.1
زراعی Agriculture	$Se = -62.4 + 0.119 In + 5.87 Th$	0.75
مسکونی Residential	$Se = -34.89 + 0.126 In + 5.66 Th$	1

R: ضریب رگرسیون Se: میزان رسوب Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Se: Sediment rate, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

جدول ۶- ضریب بتای میزان رسوب در شدت ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه با مؤلفه‌های مختلف فرسایش

Table 6- Beta coefficient of sediment rate at intensity of 1.25 mm/min with erosion different components

مؤلفه‌های فرسایش Erosion components نوع کاربری Land use type	Ro	In	Th
کاربری مرتج Range land uses	-	-	-0.1
سطح معنی‌داری Significant level	-	-	0.79
کاربری زراعی Agriculture land use	-	2.2	2.2
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.145	0.148
کاربری مسکونی Residential land use	-	0.64	0.7
سطح معنی‌داری Significant level	-	0.000	0.000

R: ضریب رگرسیون Ro: میزان رواناب In: میزان نفوذپذیری Th: شروع آستانه رواناب و فرسایش

R: Regression coefficient, Ro: Runoff rate, In: Infiltration rate, Th: Runoff and erosion threshold

آستانه رواناب و فرسایش و سپس میزان نفوذپذیری خاک دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشه‌ای در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش و با میزان نفوذپذیری خاک رابطه مستقیم دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک زیاد می‌شود. نتایج سطح معنی‌داری رسوب شبیه‌سازی شده به وسیله رگرسیون چند متغیره و رسوب مشاهده‌ای در جدول‌های ۷ تا ۹ و همچنین مقایسه میانگین رسوب مشاهده‌ای و تخمینی در شدت‌های بارش ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری‌های مختلف سازند گچساران نشان داده شده است.

همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری کشاورزی بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی به طور مساوری از شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک دارد. در این کاربری میزان رواناب نقشه‌ای در مدل‌سازی تولید رسوب در شدت بارش ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه نداشته است. میزان رسوب تولیدی در این شدت با شروع آستانه رواناب و فرسایش و با میزان نفوذپذیری خاک رابطه مستقیم دارد. با افزایش میزان رسوب تولیدی، میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که میزان رسوب تولیدی در شدت ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه در کاربری مسکونی بیشترین تاثیرپذیری را طبق ضریب بتای محاسباتی از شروع

جدول ۷- مقایسه رسوب شبیه‌سازی شده و رسوب مشاهده‌ای در کاربری مرتع

Table 7- Comparison of simulated sediment and observational sediment in range land use

نوع کاربری Land use type	شدت بارش Precipitation intensity	انحراف معیار Standard deviation	خطای استاندارد میانگین Standard Error	سطح معنی‌داری Significant laevel
کاربری مرتع Range land use	0.75 میلی‌متر در دقیقه 0.75 mm/min	1.75	0.58	0.815
	1 میلی‌متر در دقیقه 1 mm/min	2.51	0.83	0.962
	1.25 میلی‌متر در دقیقه 1.25 mm/min	7.36	2.45	0.988

جدول ۸- مقایسه رسوب شبیه‌سازی شده و رسوب مشاهده‌ای در کاربری کشاورزی

Table 8- Comparison of simulated sediment and observational sediment in agricultural land use

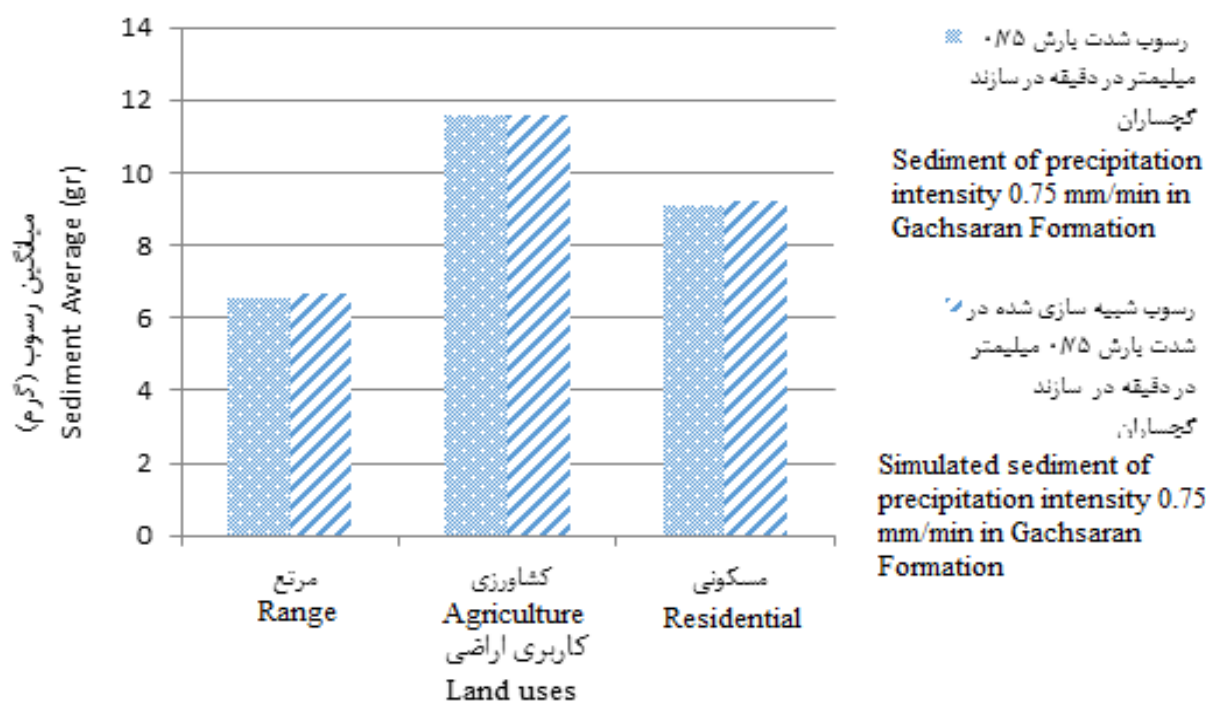
نوع کاربری Land use type	شدت بارش Precipitation intensity	انحراف معیار Standard deviation	خطای استاندارد میانگین Standard Error	سطح معنی‌داری Significant laevel
کاربری کشاورزی Agriculture	0.75 میلی‌متر در دقیقه 0.75 mm/min	0.693	0.283	0.978
	1 میلی‌متر در دقیقه 1 mm/min	0.691	0.282	0.705
	1.25 میلی‌متر در دقیقه 1.25 mm/min	1.76	0.71	0.988

جدول ۹- مقایسه رسوب شبیه‌سازی شده و رسوب مشاهده‌ای در کاربری مسکونی

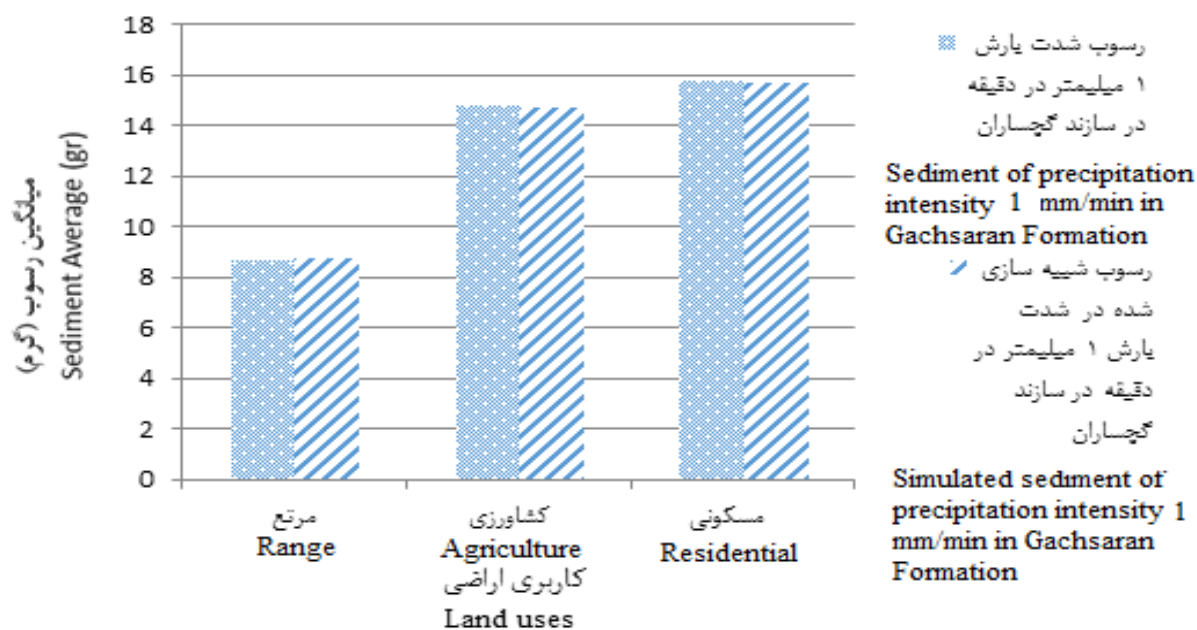
Table 9- Comparison of simulated sediment and observational sediment in residential land use

نوع کاربری Land use type	شدت بارش Precipitation intensity	انحراف معیار Standard deviation	خطای استاندارد میانگین Standard Error	سطح معنی‌داری Significant laevel
کاربری مسکونی Residential land use	0.75 میلی‌متر در دقیقه 0.75 mm/min	0.01	0.005	0.002 *
	1 میلی‌متر در دقیقه 1 mm/min	1.25	0.722	0.002 *
	1.25 میلی‌متر در دقیقه 1.25 mm/min	0.005	0.003	0.002 *

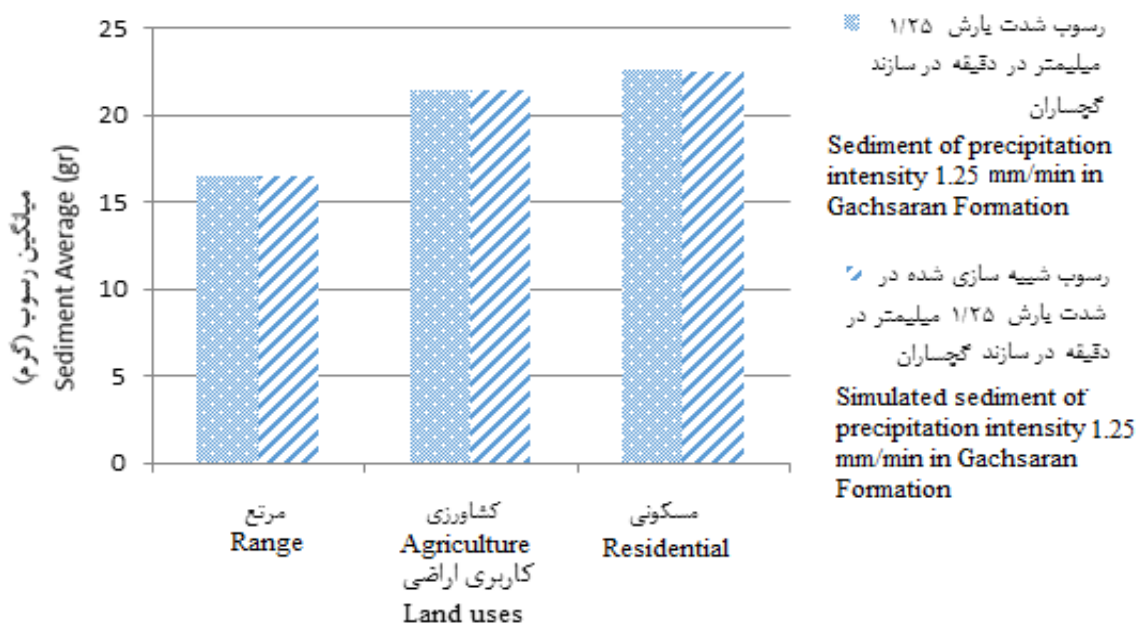
* معنی‌داری در سطح ۵ درصد



شکل ۴- مقایسه رسوب مشاهده‌ای و تخمینی در کاربری‌های مختلف
Figure 4- Comparison of observational and estimated sediment in different land uses



شکل ۵- مقایسه رسوب مشاهده‌ای و تخمینی در کاربری‌های مختلف
Figure 5- Comparison of observational and estimated sediment in different land uses



شکل ۶- مقایسه رسوب مشاهده‌ای و تخمینی در کاربری‌های مختلف
Figure 6- Comparison of observational and estimated sediment in different land uses

دارد مطابقت دارد. به طور کلی نتایج نشان داد در بعضی از مدل‌های این تحقیق که ضریب رگرسیونی پایین‌تری دارند، ولی تخمین رسوب قابل قبول و مناسبی به دست آمد بنابراین نمی‌توان فقط با استفاده از ضریب رگرسیونی و ضریب تعیین و سایر ضرایب دیگر آماری اظهار نظر مناسب و قطعی راجع به صحت و درستی تخمین مدل‌ها انجام داد بلکه باید در کنار سطح معنی‌داری و ایجاد نمودارهای رسوب مشاهده‌ای و تخمینی، به این ضرایب نیز توجه شود. همچنین نتایج کلی نشان داد که در تخمین رسوب به وسیله مولفه‌های مختلف فرسایش، شروع آستانه رواناب و فرسایش بیشترین تاثیرگذاری مثبت و منفی دارد و در ۸ مورد در مدل‌سازی نقش ایفاء کرده است و سپس میزان نفوذپذیری خاک تاثیرگذاری مثبت و منفی، متوسطی دارد و در ۷ مورد در مدل‌سازی نقش ایفاء کرده است و میزان رواناب نیز در هیچ کدام از سه کاربری و شدت‌های مختلف بارش نقشی در مدل‌سازی ایفاء نکرده است و نشان از نقش بسیار مهمتر میزان شروع آستانه رواناب و فرسایش و میزان نفوذپذیری خاک در این روش مدل‌سازی در تخمین تولید رسوب دارد بنابراین رگرسیون چند متغیره در این تحقیق نتایج قابل قبول نشان داد که با نتایج تحقیق مردون و همکاران (۸) که دریافتند رگرسیون چند متغیره کارایی بالایی دارد مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه اندازه‌گیری مستقیم رسوب، کاری بسیار سخت و

همچنین نتایج نشان داد در مقایسه بین میانگین‌های رسوب مشاهده‌ای و رسوب تخمینی به وسیله رگرسیون چند متغیره در کاربری مرتع در شدت بارش ۰/۷۵ میلی‌متر در دقیقه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و این نشان از تخمین مناسب رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش با استفاده از رگرسیون چند متغیره در این کاربری می‌باشد و با نتایج تحقیق وفاخواه و سعیدیان (۲۰) که دریافتند رگرسیون چند متغیره در تخمین میزان رسوب کاربرد مناسبی دارد مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان داد در مقایسه بین میانگین‌های رسوب مشاهده‌ای و رسوب تخمینی به وسیله رگرسیون چند متغیره در کاربری کشاورزی در شدت بارش ۱ میلی‌متر در دقیقه اختلاف معنی‌داری وجود ندارد و این نیز نشان از تخمین مناسب رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش می‌باشد که با نتایج تحقیقات رسترو و همکاران، (۱۶)؛ رومن و همکاران، (۱۷) که معتقدند رگرسیون خطی با دقت نسبتاً مناسبی قادر به مدل کردن میزان رسوب است مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان داد در مقایسه بین میانگین‌های رسوب مشاهده‌ای و رسوب تخمینی به وسیله رگرسیون چند متغیره در کاربری مسکونی در شدت بارش ۱/۲۵ میلی‌متر در دقیقه اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد وجود دارد و این نشان از تخمین کمی ضعیف تر رسوب با استفاده از مولفه‌های مختلف فرسایش در این کاربری می‌باشد البته داده رسوب تخمینی نزدیک به رسوب مشاهده‌ای می‌باشد و خیلی فاصله زیادی ندارد که با نتایج مورات و سیگیزاوغلو (۱۰) که دریافتند رگرسیون چند متغیره دارای عملکرد ضعیفتری نسبت به مدل‌های دیگر در تخمین رسوب

در آینده کاربرد بیشتری در تخمین رسوب در حوزه‌های آبخیز صعب‌العبور ایفاء کند و در حفاظت خاک و کاهش فرسایش با تخمین‌های مناسب و عقلانی تر در اجرای مناسب تر پروژه‌های آبخیزداری موثرتر باشد.

هزینه بر می‌باشد بنابراین می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری‌های غیر مستقیم مانند روش تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش به نتایج قابل قبول در کوتاه‌ترین زمان و با کمترین هزینه اجرایی رسید. تخمین رسوب با استفاده از مدل‌سازی به روش تخمین رسوب با استفاده از مؤلفه‌های مختلف فرسایش نشان داد که می‌تواند

منابع

- 1- Ahmadi H. 2007. Applied geomorphology, 1 volume (water erosion), fifth edition, Tehran university publications, 714p. (In Persian with English Abstarct)
- 2- Arab Khedri M. 1994. Revision of modified global equation of soil losses, Journal of Research and Construction, No. 25, Ministry of Jihad-e Sazandegi.
- 3- Ares M.G., Varni M., and Chagas C. 2016: Suspended sediment concentration controlling factors: an analysis for the Argentine Pampas region. Hydrological Science Journal 61(12): 2237-2248.
- 4- Fathizadeh H., Karimi H., and Tavakoli M. 2016. The Role of Sensitivity to Erosion of Geological Formations in Erosion and Sediment Yield (Case Study: Sub-Basins of Doiraj river in ilam province), Journal of Watershed Management, Volume 7, No. 13, Spring and Summer. (In Persian with English Abstarct)
- 5- Hosseini S.S., and Ghorbani M. 2005. Economics of soil erosion. Ferdowsi University of Mashhad Press, 205 Pp. (In Persian with English Abstarct)
- 6- Kamphorst A. 1987. A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility, Netherlands Journal of Agricultural Science 35: 407-415.
- 7- Khajehei A., Bereshkeh A., Sokooti R., and Arab Khedri M. 2002. Investigating application of MUSLE Empirical Model for Estimating Sediment From Single Storms and Annual Sediment in Shahrchay River Watershed, Proceedings of the National Conference on Land Management- Soil Erosion and Sustainable Development, Arak, Ministry of Agriculture Jihad Publications, pp. 447-436.
- 8- Merdun H., Cinar O., Meral R., and Apan M. 2006. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer function for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity, Soil and Tillage Research 90: 108-116.
- 9- Morady H.R., and Saidian H. 2010. Comparing the Most Important Factors in the Erosion and Sediment Production in Different Land Uses, Journal of Environmental Science and Engineering 4(11): 1-11.
- 10- Murat A., and Cigizoglu H.K. 2007. Suspended sediment load simulation by two artificial neural network methods using hydrometeorological data, Environ. Model.Soft.22:2-13.
- 11- Musgrave G.W. 1947. The Quantitative evaluation of factors in water erosion, a first Approximation, Journal of Soil and Water Conservation 2(3): 133-138.
- 12- Noor H., Mirnia S.Kh., Fazli S., Raisi M.B., and Vafakhah M. 2010. Application of MUSLE for the prediction of phosphorus losses.Water Science and Technology 62(4): 809-815.
- 13- Pasific Southwest Inter-Agency Committee. 1968. Factors Affecting Sediment Yield and Measures for the Reduction of Erosion and Sediment Yield, 13 pp.
- 14- Rendard K.C., Foster G., Yoder D., Et Maccol D. 1994. RUSLE Revised: Status, Questions, Answers and the Future. Journal of Soil Water Conservation 49: 213-220.
- 15- Renfro G.W. 1975. Use of Erosion Equations and Sediment Delivery Ratios for Predicting Sediment Yield. In Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources. Agric. Res. Serv., ARS-S-40, 33-45.US Dept. Agric.,Washington, D.C.
- 16- Restrepo Juan D., Lopez Sergio A., and Restrepo Juan C. 2009, The Effects of Geomorphic Controls on Sediment Yield in the Andean Rivers of Colommbia, Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analusis 16(2): 79-92.
- 17- Roman David C.,Vogel Richard M., and Schwarz Gregory E. 2010, Multivariate Models ofWatershed Suspended Sediment Loads for the Eastern United States. Urban Water Resources Research Council -7th Urban Watershed Management Symposium 3133-3144.
- 18- Shahkarami A. 2002. Investigation of sediment estimation methods of P.S.I.A.C MPS. I.A.C and EPM in Nozhian Watershed, Proceedings of the National Conference on Land Management- Soil Erosion and Sustainable Development, Arak, Ministry of Agriculture Jihad Publications 562-572.
- 19- Soni S. 2017. Assessment of morphometric characteristics of Chakrar watershed in Madhya Pradesh India using geospatial technique.Applied Water Science 7(5): 2089-2102.
- 20- Vafakhah M., and Saeediyen H. 2014. Modeling of observed runoff and sediment with estimative runoff and sediment with using neural network and multi regression in aghajari marls, Journal of Range and Watershed

- Management 67(3): 487-499.
- 21- Walling D.E. 1988. Erosion and sediment yield research-some recent perspectives. *Journal of Hydrology* 100: 113-141.
- 22- Williams J.R. 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Soil Loss Equation Using Runoff Energy Factors, In *Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. Agric. Res. Serv., US Dept. Agric., Washington, D.C., ARS-S-40, 244-252.
- 23- Wischmeier W.H., and Smith D.D. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses- A Guide to Conservation Planning*. Agric. Handbook No.537, US Dept. of Agric., Washington, D.C.
- 24- Zhang H.Y., Shi Z.H., Fang N.F., and Guo M.H. 2015. Linking watershed geomorphic characteristics to sediment yield: Evidence from the Loess Plateau of China. *Geomorphology* 234: 19-27.
- 25- Zhen H., Jiangwen L., Yanhai Li., Xiaojie Gu., Xiaoyan Ch., and Chaofu W. 2021. Eroded sediment in a partially saturated sandy loam soil using scouring experiments, *CATENA* 201: 105234.
- 26- Zhen W, Yi Zeng., Cai L., Hua Y., Shuxia Y., Ling W., and Zhihua Shi. 2021. Telecoupling cropland soil erosion with distant drivers within China, *Journal of Environmental Management* 288(15): 112395.



Sediment Estimation Using Different Erosion Components

H. Saeediyan^{1*}- H.R. Moradi²

Received: 21-02-2021

Accepted: 30-04-2021

Introduction: Erosion and sediment production studies along with other natural resources studies in decision making and success and efficiency of watershed plans are of great importance. In order to plan and be aware of the destructive situation of the watershed, it is necessary to have erosion and sediment production from each watershed. The information about sediment load of basins can show the prospect of erosion. Sediment scatter from the soil surface by the impact of raindrops and shear force of runoff and is transported to downstream by spraying from raindrops and mainly by runoff. Also, the stress characteristics of soil particles are important in the process of effective transport. In recent decades, soil erosion has been intensified due to the human interference, inappropriate land management and land use. This is much more important in developing countries, because soil erosion is a serious risk to sustainable development in these countries. Soil erosion on farmland occurs due to the interaction between nature and human activities that have been being intensified in recent years. Estimation of sedimentation in watersheds, dealing with sediment accumulation risks in water structures and reservoirs of dams are the main objectives in water resources management that leads to sustainable development. One of the most erodibility of Iran is the Gachsaran formation. Gachsaran formation is about 1600 meters thick. A viewpoint of lithology is consisting of salt, anhydrite, colorful lime, and some shale. Gachsaran formation age is lower Miocene.

Materials and Methods: In this study, in order to determine sediment estimation by using different erosion components in different land uses of Gachsaran formation deposits, a part of Kuhe Gypsum watershed of Izeh city with an area of 1202 hectares was selected. In this study, the relationship between produced sediment and different erosion components such as runoff, soil permeability, runoff, and erosion threshold in different land uses of Gachsaran formation was determined by multivariate regression. Then, sampling of erosion different components was done at 6 points with 3 replicates and at rainfall different intensities of 0.75, 1 and 1.25 mm/min in three land uses of rangeland, residential area and agricultural using rain simulator. SPSS and EXCEL softwares were used for statistical analysis.

Results and Discussion: The results showed that sediment estimation using different erosion components presents acceptable results and can be used for other watersheds. The results also showed that in sediment estimation by erosion different components, runoff and erosion threshold had the most positive and negative effect and in eight cases played a role in modeling. Then, soil permeability has the average effect of positive and negative and has played a role in modeling in seven cases. In addition, runoff has not played a role in modeling in any of the three different land uses and intensities of precipitation.

Conclusion: Sediment estimation by erosion different components, the runoff and erosion threshold had the highest effect. Soil permeability had a moderate influence and runoff rate has not played a role in modeling in any of different land uses and precipitation intensities, it indicated the much more important role of runoff and erosion threshold and soil permeability in this modeling method in estimating sediment production. Finally, sediment estimation method by using erosion different components showed that it could be more applicable in sediment estimation in hard-to-reach watersheds in the future and be more effective in soil conservation and erosion reduction with appropriate and rational estimates in more appropriate implementation of watershed projects.

1- Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management Research, Kerman Agricultural and Natural Resource Research Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Kerman, Iran
(*- Corresponding Author Email: hamzah.4900@yahoo.com)

2- Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, College of Natural Resource, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

DOI: 10.22067/jsw.2021.69031.1029

Keywords: Erosion, Gachsaran formation, Land use, Sediment estimation



مقاله پژوهشی

مطالعه ژنتیکی و میکرومورفولوژی خاک‌های واقع بر سطوح مختلف ژئومورفیک در پلایای جازموریان

صالح سنجرى^۱ - محمدهادی فرپور^{۲*} - مجید محمودآبادی^۳ - سعید برخوردارى^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۹

چکیده

پلایا یکی از شکل‌های اراضی مهم در مناطق خشک بوده و سطح زیادی را در این مناطق به خود اختصاص داده است. این شکل اراضی از سطوح مختلف ژئومورفیک تشکیل شده است. هدف از انجام این پژوهش بررسی خصوصیات فیزیکی-شیمیایی، طبقه‌بندی (براساس دو سامانه آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵)) و میکرومورفولوژی خاک‌های واقع در سطوح مختلف ژئومورفیک پلایای جازموریان بود. سطوح مسطح رسی-سدیمی، مسطح رسی، فن دلتا، نوار مرطوب، مسطح رسی پف کرده و پوسته نمکی طی مطالعات صحرایی و بررسی‌های تصاویر گوگل، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی شناسایی شدند. بر روی هر واحد ژئومورفیک یک یا چند خاکرخ حفر، تشریح و پس نمونه‌برداری تحت آزمایش‌های معمول قرار گرفتند. نتایج مطالعه نشان داد که میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک‌ها در محدوده ۰/۵ تا ۲۲۲/۲ دسی زیمنس بر متر متغیر است، که کمترین و بیشترین میزان هدایت الکتریکی به ترتیب مربوط به سطوح ژئومورفیک فن دلتا و پوسته نمکی می‌باشد. بلورهای عدسی شکل گچ و پوشش رس در این پلایا شناسائی شدند. پوشش رس مشاهده شده در این منطقه، نوعی متفاوت از پوشش رس می‌باشد که تحت اثر پراکندگی سدیم تبدیلی ایجاد شده است. نام‌گذاری خاک‌ها، نشان از مزیت طبقه‌بندی جهانی نسبت به رده‌بندی آمریکایی می‌باشد به نحوی که خاک‌های شور و خاک‌های شور و سدیمی را به خوبی از یکدیگر تفکیک کرده و در دو گروه مرجع مختلف سولوننتز و سولونچاک قرار می‌دهد، در حالی که رده‌بندی آمریکایی خاک‌ها را فقط در زیررده سالیندر قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پوشش رس، خاک شور، رده‌بندی آمریکایی، ژئومورفولوژی، طبقه‌بندی جهانی

مقدمه

پیدایش اشکال اراضی نشان‌دهنده اصول اساسی ژئومورفولوژی خاک یا ژئوپدولوژی است (۲۸ و ۳۴). مقبلی و همکاران (۱۷)، طی مطالعه ارتباط خاک و لندسکیپ در منطقه خشک فاریاب در استان کرمان بیان داشتند که با حرکت از لندفرم‌های مخروط‌افکنه و تپه به سمت اراضی پست، بافت خاک سنگین‌تر، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل، هدایت الکتریکی، پهاش و میزان سدیم جذبی بیشتر اما میزان گچ کمتر می‌شود.

یکی از تکنیک‌های مهم و حتی شاید ضروری در مطالعه‌ی خاک‌ها که توسط اکثر محققین به‌کار می‌رود، مطالعات میکرومورفولوژی می‌باشد. ویژگی‌های میکرومورفولوژی همراه با سایر

پلایا یکی از زمین‌نماهای مهم مناطق خشک است که حدود یک درصد کل خشکی‌ها را پوشش می‌دهند و مورد علاقه و پژوهش خاک‌شناس‌ها و ژئومورفولوژیست‌ها می‌باشد (۹). رُزن (۲۴) پلایا را به‌عنوان یک حوضه درون قاره‌ای معرفی می‌کند که حساس به تغییرات اقلیمی است. با توجه به اینکه پلایا در مناطق خشک و بیابانی منشأ ریزگرد می‌باشد، لذا شناسایی خاک آن‌ها برای تبدیل به منشأ ریزگرد حائز اهمیت است.

فرآیندهای تشکیل خاک ارتباط نزدیکی و متقابلی با اشکال اراضی و فرآیندهای ژئومورفیک دارد. تعادل بین پیدایش خاک و

۴- استادیار مهندسی طبیعت، دانشکده‌ی منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت

DOI: 10.22067/jsw.2021.67332.0

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

(*) - نویسنده مسئول: (Email: farpoor@uk.ac.ir)

کردند که سامانه طبقه‌بندی جهانی برای تفسیر خاک‌های شور، سدیمی، گچی، آهکی و جوان، به دلیل استفاده از توصیف‌کننده‌های مختلف در انعکاس خصوصیات خاک‌ها کارایی بیشتری نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی دارد.

اطلاعات محدودی در مورد خصوصیات ژنتیکی خاک‌های پلائی جازموریان موجود است. در واقع تنها اطلاعات این حوضه به مطالعه کرینزلی (۱۶) بر روی پلائی‌های ایران بر می‌گردد که سعی کرد سطوح ژئومورفیک پلائی جازموریان را بر اساس تفسیر عکس‌های هوایی (البته عدم حضور در منطقه و عدم ارتباط این سطوح با خاک) جدا نماید. پژوهش حاضر برای دستیابی به این هدف‌ها صورت پذیرفت: ۱. بررسی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکرومورفولوژی خاک‌های پلائی جازموریان در ارتباط با سطوح مختلف ژئومورفیک؛ ۲. نام‌گذاری خاک‌ها بر اساس دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵).

مواد و روش‌ها

مطالعات صحرایی

پلائی جازموریان بخش مهمی از حوضه جازموریان می‌باشد که در دو استان کرمان و سیستان و بلوچستان واقع شده است (شکل ۱). این پلائی یک فروافتادگی خشک‌زائی مربوط به اواخر پلیوسن می‌باشد (۱۹)، که در ارتفاعی در حدود ۳۶۰ متر از سطح دریا واقع شده و دارای ۶۵ کیلومتر طول و ۴۵ کیلومتر عرض است. این منطقه در حداقل طول‌های جغرافیایی 58° تا 60° شرقی و عرض‌های جغرافیایی 27° تا 28° شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). مساحت آن در حدود ۳۷۷۵ کیلومتر مربع یا پنج درصد از سطح کل آبریز جازموریان می‌باشد. این پلائی از هر طرف توسط رشته کوه‌هایی احاطه شده که ارتفاع آن‌ها به ۳۰۰۰-۱۰۰۰ متر از سطح دریا می‌رسد. از شمال توسط رشته کوه‌های آذرین جبالبارز، ارتفاعات غربی توسط سنگ‌های آذرین نفوذی و بیرونی، حد شرقی آن سنگ‌های گسل‌خورده دوره میوسن مرکب از سنگ‌های تخییری متعلق به تشکیلات قرمز بالایی و در حاشیه جنوبی آن آمیزه‌های رنگی مکران قرار دارند (۱۸). جدول ۱ ویژگی‌های اقلیمی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه به ترتیب اریدیک و هایپرترمیک است (۱)، که البته به صورت موضعی رژیم رطوبتی آکوئیک نیز مشاهده گردید.

ویژگی‌های خاک اطلاعات مهمی را برای بازسازی فرآیندهای تشکیل و شرایط محیطی خاک‌های مدفون، پلی‌ژنتیک و مدفون فراهم می‌کند (۱۴). خرمالی و همکاران (۱۵) در مطالعه‌ی میکرومورفولوژیکی افق آرچلیک خاک‌های شور و سدیمی، نوع متفاوتی از پوسته‌های رسی را مشاهده کردند که در معرض سدیم بالا قرار داشتند. اغلب این پوسته‌ها به صورت قطعات پراکنده مشاهده گردیدند و به نظر می‌رسد که پوسته‌ها از نوع رس درشت تشکیل شده باشند. این نوع پوسته‌های رسی، ویژه‌ی افق‌های ناتریک می‌باشند که رس درشت در اثر انتشار توسط یون سدیم، حرکت و تجمع می‌یابد. همچنین، قاسم زاده و همکاران (۹) در مطالعه میکرومورفولوژی خاک‌های حاشیه پلائی بجستان عوارض خاکساز پوشش رس، نادل کلسیت و فرم‌های عدسی شکل گچ را گزارش کردند. فرپور و همکاران (۶) طی مطالعه ارتباط خاک-ژئومورفولوژی در پلائی سیرجان-جنوب ایران مرکزی، پوشش و پرشدگی آهک را در شکل اراضی پدیمنت و عوارض خاکساز بلورهای عدسی شکل و صفحات درهم قفل شده گچ را در اشکال اراضی دشت دامنه‌ای و پلائی گزارش کردند. آنان پوشش و پرشدگی رس را در دشت دامنه‌ای به اقلیم مرطوب‌تر گذشته نسبت دادند. سرمست و همکاران (۲۷) طی مطالعه میکرومورفولوژی خاک‌های ایران مرکزی در سطوح مختلف ژئومورفیک، عوارض خاکساز رس (پوشش)، کلسیت (نادل)، پوشش، کوازی کوتینگ و پرشدگی)، انهدیریت (نادل)، گچ (عدسی شکل، کرمی شکل و صفحات در هم قفل شده) و هالیت (پوشش) را گزارش کردند.

برای مدیریت و استفاده بهینه از خاک، نیاز به طبقه‌بندی درست خاک‌ها و شناسایی ویژگی‌های اصلی آن‌ها می‌باشد. دو سامانه رده‌بندی آمریکایی^۱ و طبقه‌بندی جهانی^۲ به طور وسیع برای نام‌گذاری خاک‌ها در ایران (۴) و بیشتر کشورهای جهان (۸) استفاده می‌شوند. بنابراین، طبقه‌بندی خاک‌ها به روش آمریکایی و جهانی، دو شیوه‌ی معمول می‌باشند که هر دو از مقبولیت عمومی برخوردار هستند اما سامانه طبقه‌بندی جهانی از قابلیت خوبی در نام‌گذاری خاک‌ها برخوردار است. اولیایی و همکاران (۲۳) طی مطالعه خاک‌های مناطق نیمه‌خشک جنوب غربی ایران، زیر گروه کلسیک جیپسیک هیلویوستالفز را برای زیررده یوستالفز از سامانه رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) گزارش کردند. در مجموع، تفاوت در سطوح طبقه‌بندی و تعداد گروه‌های خاک در بالاترین سطح، تفاوت در تعریف افق‌های با خصوصیات مشخصه مشابه، و تأکید بیشتر بر رژیم‌های حرارتی و رطوبت خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی در مقایسه با سامانه طبقه‌بندی جهانی از جمله بیشترین دلایل همبستگی اندک بین این دو سیستم طبقه‌بندی می‌باشد (۴). سنجر و همکاران (۲۶) در طبقه‌بندی خاک‌های خشک و فراخشک منطقه ایرانشهر-دلگان بیان

جدول ۱- ویژگی‌های محیطی چهار منطقه مطالعاتی

Table 1- Environmental characteristics of four sites under study

مناطق مطالعاتی Study areas	ارتفاع از سطح دریا Elevation above sea level (asl) (m)	مختصات جغرافیایی Geographical coordinates		میانگین بارندگی سالیانه (mm)	میانگین دمای سالیانه (°C)
		طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude		
رودبار جنوب Roodbar-e-Jonoob	490	57° 59'	28° 2'	82	26
قلعه گنج Ghaleganj	410	57° 52'	27° 31'	105	27
دلگان Dalgan	390	59° 27'	27° 28'	101.7	29.9
ایران شهر Iranshahr	570	60° 41'	27° 12'	106.6	28.9

استات آمونیوم در pH=7 استفاده شد (۲). مقدار عددی نسبت جذبی سدیم، با استفاده از مقادیر سدیم، کلسیم و منیزیم محلول ($\text{mmol}^{(+)} \text{L}^{-1}$) و بر اساس معادله ذیل محاسبه شد:

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

در نهایت، از دو سیستم طبقه‌بندی آمریکایی (اداره شناسایی خاک آمریکا، ۲۰۱۴) و جهانی (کارگروه انجمن بین المللی علوم خاک، ۲۰۱۵) برای نام‌گذاری خاک‌های منطقه مورد مطالعه استفاده گردید.

به منظور انجام مطالعات میکرومورفولوژی، کلوخه‌های دست‌نخورده با استفاده از رزین سه‌جزئی وستاپول^۱ و تحت مکش، تلقیح و در شرایط هوای آزاد سخت و خشک شدند. در نهایت تفسیر مقاطع نازک تهیه‌شده، توسط میکروسکوپ پلاریزان مدل BK-POL در دو حالت نور پلاریزه‌ای صفحه‌ای (PPL) و متقاطع (XPL) بر اساس راهنمای استوپس (۳۳) صورت پذیرفت و از قسمت‌های مورد نظر عکسبرداری گردید.

نتایج

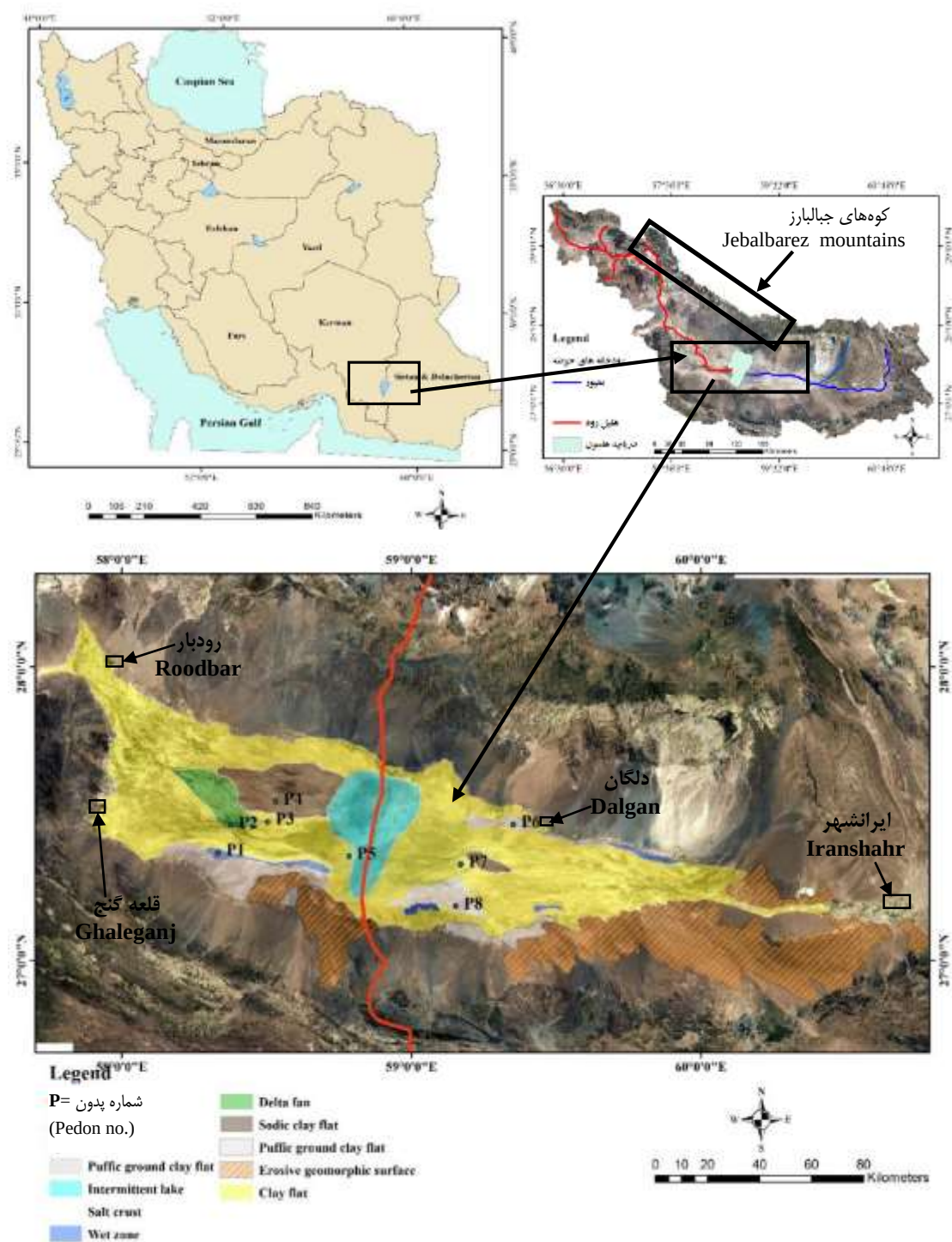
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی

موقعیت سطوح مختلف ژئومورفیک پلایا در شکل‌های (۱ و ۲) نشان داده شده است. جدول ۲ برخی از خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی این خاک‌ها به همراه رده‌بندی آن‌ها بر اساس دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و طبقه‌بندی جهانی (۲۰۱۵) در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ۴ پیشنهادات ارائه شده طی تحقیق حاضر برای دو سیستم رده‌بندی را نشان می‌دهد. بافت خاک منطقه به طور کلی نیمه‌سنگین تا سنگین می‌باشد (جدول ۳).

رودخانه‌های اصلی آن شامل؛ هلیل‌رود که بزرگترین این رودخانه هاست، از ارتفاعات استان کرمان (حجم آب این رودخانه بستگی به ذوب شدن برف‌های انباشته شده در ارتفاعات بافت و رابر و ریزش باران دارد) به دریاچه جازموریان ختم‌شده و شور نیست. رود بمپور از ارتفاعات ایران‌شهر سرچشمه گرفته و از سازندهای تبخیری شرق منطقه عبور می‌کند و به دریاچه مرکزی ختم می‌شود که دارای املاح بیشتری نسبت به رودخانه هلیل‌رود می‌باشد (شکل ۱). براساس مطالعات صحرایی و بررسی‌های تصاویر گوگل، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های توپوگرافی این پلایا به سطوح ژئومورفیک؛ مسطح رسی، مسطح رسی-سدیمی، مسطح رسی پف کرده، پسته نمکی، منطقه مرطوب، فن دلتا و دریاچه موقت تفکیک گردید (شکل ۱ و ۲). از مجموع ۲۱ خاک‌رخ حفر شده در سطوح مختلف ژئومورفیک منطقه مطالعاتی، هشت خاک‌رخ شاهد به منظور پوشش حداکثری تغییرات خاک مورد توصیف (۲۹) و نمونه‌برداری قرار گرفتند. شکل ۱ موقعیت خاک‌رخ‌های شاهد را نشان می‌دهد.

بررسی‌های آزمایشگاهی

نمونه خاک‌های هوا خشک شده و کوبیده شده، از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند و ذرات درشت (ذرات بزرگتر از دو میلی‌متر) تعیین گردید (۳۲). در این تحقیق برای بررسی توزیع اندازه ذرات خاک از روش پیپت (۷) استفاده گردید. به ترتیب از دستگاه پ‌هاش‌متر و هدایت‌سنج الکتریکی مدل جن‌وی برای اندازه‌گیری پ‌هاش خمیر اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره‌ای اشباع خاک استفاده شد. برای اندازه‌گیری گچ از روش ترسیب با استون (۲۰) استفاده شد. اندازه‌گیری کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (۲۰) انجام شد. کربن آلی به روش والکی-بلک اندازه‌گیری شد (۲۱). به‌منظور تعیین ظرفیت تبادل کاتیونی از جایگزینی استات سدیم توسط



شکل ۱- منطقه مطالعاتی، نقشه ژئومورفولوژی و موقعیت خاکرخ‌های شاهد

Figure 1- Study area, geomorphic map, and location of the representative pedons



شکل ۲- نمایی از سطوح مختلف ژئومورفیک در پلایای جازموریان
Figure 2- View of different geomorphic surfaces in Jazmoorian Playa

جدول ۲- برخی خصوصیات مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه

Table 2- Selected morphological properties of studied pedons

Table 2 - Selected morphological properties of studied pedons									
عمق		مرز افق	رنگ		پایداری		ساختمان	جوشش	پوشش ها یا تجمعات
افق	Depth		خشک	مرطوب	خشک	مرطوب			
Horizon	(cm)	Boundaries ¹	Dry	Moist	Dry	Moist	Structure ³	Effervescence ⁴	Concentrations ⁵
Pedon 1 Playa (wet zone) 370m above sea level									
Az	0-15	A, S	10YR 7/2	10YR 5/2	MH	FR	2m, sbk	SL, H2	FDS, TOT
Bzn	15-30	C, S	10YR 7/2	10YR 5/2	HA	FI	2m, sbk	SL, H2	FDS, TOT
Btzn1	30-45	C, S	10YR 7/2	10YR 5/2	VH	VFI	3m, cpr	SL, H2	FDS, TOT
Btzn2	45-95	C, S	10YR 7/2	10YR 5/2	VH	VFI	3m, cpr	SL, H2	FDS, TOT
Bzng1	95-125	G, S	10YR 7/2	10YR 5/2	HA	FI	m	SL, H2	FDS, TOT
Bzng2	125-170	-	10YR 7/2	10YR 5/2	HA	FI	m	SL, H2	FDS, TOT
Pedon 2 Playa (fan delta) 378m above sea level									
A	0-20	A, S	10YR 6/3	10YR 4/3	SH	VFR	1f, abk	SL, H2	FDC, TOT
C1	20-55	C, S	10YR 6/2	10YR 4/2	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
C2	55-85	C, S	10YR 7/3	10YR 4/3	SH	FR	2m, abk	SL, H2	FDC, TOT
C3	85-130	C, S	10YR 6/3	10YR 4/3	SH	VFR	1f, abk	SL, H2	FDC, TOT
C4	130-160	-	10YR 6/2	10YR 4/2	S	L	sg	SL, H2	FDC, TOT
Pedon 3 Playa (clay flat) 364m above sea level									
A	0-20	A, S	10YR 7/3	10YR 5/3	MH	FR	1m, abk	SL, H2	FDC, TOT
C	20-60	C, S	7.5YR 6/2	7.5YR 5/2	S	L	1f, abk	SL, H2	FDC, TOT
2Cz	60-90	C, S	10YR 7/4	10YR 4/4	S	L	sg	SL, H2	FDS, TOT
3Btznb1	90-120	C, S	10YR 7/4	10YR 4/4	HA	VFI	3m, cpr	SL, H2	FDS, TOT
3Btznb2	120-150	-	10YR 6/3	10YR 4/3	HA	VFI	2m, cpr	SL, H2	FDS, TOT
Pedon 4 Playa (sodic clay flat) 368m above sea level									
Az	0-15	A, S	10YR 5/4	10YR 4/4	SH	VFR	1m, abk	SL, H2	FDS, TOT
Btzn	15-35	C, S	10YR 6/4	10YR 4/4	VH	VFI	2m, sbk	SL, H2	FDS, TOT
C	35-50	C, S	10YR 7/2	10YR 5/2	S	L	sg	SL, H2	FDS, TOT
2Bzn1	50-75	C, S	10YR 7/2	10YR 5/2	HA	VFI	1m, sbk	SL, H2	FDS, TOT
2Bzn2	75-110	C, S	10YR 6/3	10YR 4/3	HA	VFI	1m, sbk	SL, H2	FDS, TOT
2C	110-145	-	10YR 6/2	10YR 4/2	S	L	sg	SL, H2	FDS, TOT
Pedon 5 Playa (clay flat) 366m above sea level									
Az	0-30	A, S	10YR 6/3	10YR 5/3	VR	R	m	SL, H2	FDS, TOT
Bzn	30-70	G, S	10YR 6/2	10YR 4/2	VR	R	m	ST, H2	FDS, TOT
Bzng1	70-120	G, S	10YR 6/2	10YR 4/1	VR	R	m	SL, H2	FDS, TOT
Bzng2	120-200	-	10YR 6/2	10YR 5/1	VR	R	m	SL, H2	FDS, TOT
Pedon 6 Playa (puffy ground clay flat) 374m above sea level									
Azn	0-30	A, S	10YR 7/3	10YR 5/3	MH	VFI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn1	30-60	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn2	60-90	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn3	90-135	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn4	135-155	-	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	SL, H2	m, 1, SAX, MAT
Pedon 7 Playa (clay flat) 367m above sea level									
Azn	0-30	A, S	10YR 7/3	10YR 5/3	MH	VFI	1m, abk	SL, H2	m, 1, SAM, MAT
Bzn	30-60	C, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	3m, abk	SL, H2	m, 1, SAM, MAT
Btzn	60-90	C, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	3m, sbk	SL, H2	m, 1, SAM, MAT
Bzn1	90-115	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	3m, sbk	SL, H2	m, 1, SAM, MAT
Bzn2	115-135	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	3m, sbk	ST, H2	m, 1, SAM, MAT
Bzn3	135-175	-	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	3m, sbk	SL, H2	m, 1, SAM, MAT
Pedon 8 Playa (salt crust) 367m above sea level									
Azn	0-30	A, S	10YR 7/3	10YR 5/3	MH	VFI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn1	30-60	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn2	60-90	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn3	90-120	G, S	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT
Bzn4	120-155	-	10YR 7/3	10YR 5/3	HA	FI	m	ST, H2	m, 1, SAX, MAT

¹ مرز (Boundary): تمایز distinctness (A: ناگهانی abrupt, C: واضح clear, G: تدریجی gradual); توپوگرافی topography (S: صاف smooth).

² پایداری (Consistency): خشک dry (S: نرم soft, SH: کمی سخت slightly hard, MH: سختی متوسط moderately hard, HA: سخت hard, VH: خیلی سخت very hard, VR: خیلی سفت very rigid); مرطوب moist (L: سست loose, VFR: خیلی شکننده very friable, FR: شکننده friable, FI: محکم firm, VFI: بسیار محکم, R: سفت rigid).

³ ساختمان (Structure): درجه grade (1: ضعیف weak, 2: متوسط moderate, 3: قوی strong); اندازه size (f: ریز fine, m: متوسط medium); نوع type (abk: مکعبی زاویه‌دار angular blocky, sbk: مکعبی بدون زاویه sub angular blocky, cpr: ستونی columnar, sg: تک دانه single grain, m: توده‌ای massive).

⁴ جوشش (Effervescence): کلاس class (sl: جوشش کم slightly effervescent); عامل شیمیایی chemical agent (H2: اسید هیدروکلریک نرمال normal, hydrochloric acid).

⁵ میزان تجمعات (Concentrations): میزان quantity (m: زیاد many); اندازه size (f: ریز fine); نوع kind (FDC: کربنات‌های ریز نامشهود finely disseminated carbonates, FDS: نمک‌های ریز نامشهود SAM: نمک‌های نمکی salt masses, SAX: کریستال‌های نمکی (salt crystals) موقعیت location (MAT: در ماتریکس خاک TOT: سرتاسر متن خاک throughout).

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 3- Selected physical and chemical properties of studied pedons

افق Horizon	عمق Depth (cm)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	RF (%)	بافت خاک Textural Class	pH	ECe (dS m ⁻¹)	CCE (%)		کج Gypsum (%)	کربن آلی OC (%)	SAR (mmol l ⁻¹) ^{0.5}	CEC (cmol kg ⁻¹)
Pedon 1	Playa (wet zone) 370m above sea level, USDA: Loamy, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Aquisalids; WRB: Gleyic Salic Solonetz (Cutanic, Differentic, Episiltic, Hypernatric, Loamic, Ochric)													
Az	0-15	2.4	74.56	23.04	0	SiL	7.3	78.2	15.0	0.25	0.4	0.5	189.5	15.8
Bzn	15-30	8.4	70.56	21.04	0	SiL	7.5	57.3	16.0	ng	1.2	0.4	120.4	14.3
Btnz1	30-45	8.4	60.56	31.04	0	SiCL	7.5	57.1	15.5	ng	1.3	0.5	118.7	18.5
Btnz2	45-95	0.0	70.96	29.04	0	SiCL	8.2	43.3	15.5	ng	0.6	0.4	179.3	17.6
Bzng1	95-125	6.4	68.56	25.04	0	SiL	8.4	32.7	15.7	ng	0.6	0.3	151.7	13.7
Bzng2	125-170	30.4	48.56	21.04	0	L	8.1	30.2	17.0	ng	0.5	0.3	77.7	14.1
Pedon 2	Playa (fan delta) 378m above sea level, USDA: Loamy, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Torrifluvents; WRB: Calcaric Orthofluvic Fluvisols (Pantoloamic, Aridic, Ochric)													
A	0-20	32.4	46.56	21.04	0	L	7.5	1.8	13.0	0.25	ng	0.2	4.0	11.4
C1	20-55	62.4	26.56	11.04	0	SL	7.9	0.5	14.0	ng	ng	0.1	2.7	9.2
C2	55-85	2.4	60.56	37.04	0	SiCL	8.3	1.2	16.7	ng	ng	0.1	8.5	19.6
C3	85-130	28.4	54.56	17.04	0	SiL	8.5	1.3	16.2	ng	ng	0.1	11.6	10.3
C4	130-160	50.4	36.56	13.04	0	L	8.4	1.0	14.7	ng	ng	0.2	7.3	9.7
Pedon 3	Playa (clay flat) 364m above sea level; USDA: Loamy, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Torriorthents; WRB: Calcaric Regosols (Amphisiltic, Aridic, Epiloamic, Ochric, Raptic) Over Salic Solonetz (Clayic, Cutanic, Differentic, Ochric)													
A	0-20	8.4	64.56	27.04	0	SiCL	8.3	3.2	16.2	0.5	ng	0.3	14.0	16.7
C	20-60	20.4	70.56	9.04	0	SiL	7.7	11.1	16.5	ng	ng	0.1	44.4	6.5
2Cz	60-90	0.0	76.24	23.76	0	SiL	7.6	23.6	16.7	ng	ng	0.2	69.8	13.9
3Btnzb1	90-120	1.7	50.0	48.3	0	SiC	7.6	27.2	14.7	ng	ng	0.2	75.7	26.7
3Btnzb2	120-150	9.68	42.56	47.76	0	SiC	7.7	32.1	14.0	ng	ng	0.2	101.5	25.6
Pedon 4	Playa (sodic clay flat) 368m above sea level; USDA: Fine, Mixed, Active, Hyperthermic Typic Haplosalids; WRB: Salic Solonetz (Cutanic, Differentic, Epiclayic, Loamic, Ochric)													
Az	0-15	3.68	60.56	35.76	0	SiCL	7.3	202.0	12.7	ng	1.1	0.1	359.9	19.2
Btnz	15-35	0.0	46.24	53.76	0	SiC	7.0	108.1	13.2	ng	0.6	0.4	117.5	30.2
C	35-50	0.0	84.24	15.76	0	SiL	7.2	60.2	17.5	ng	0.2	0.2	62.0	10.8
2Bzn1	50-75	1.68	68.56	29.76	0	SiCL	7.1	87.4	16.2	ng	0.4	0.2	121.2	17.6
2Bzn2	75-110	13.68	60.56	25.76	0	SiL	7.5	58.1	16.5	ng	0.3	0.2	130.2	14.9
2C	110-145	9.68	78.56	11.76	0	SiL	7.9	24.5	18.2	ng	ng	0.1	111.9	7.2
Pedon 5	Playa (clay flat) 366m above sea level; USDA: Very fine, Mixed, Active, Hyperthermic Typic Aquisalids; WRB: Sodic Gleyic Solonchak (Calcaric, Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Ochric, Pantoclayic)													
Az	0-30	1.28	30.0	68.72	0	C	7.8	143.0	14.0	ng	0.4	0.5	213.8	36.2
Bzn	30-70	9.28	20.0	70.72	0	C	7.7	224.0	23.0	ng	3.5	0.7	376.1	37.9
Bzng1	70-120	11.28	18.72	70.0	0	C	8.0	120.0	16.0	ng	0.7	0.3	207.2	36.0
Bzng2	120-200	7.28	16.0	76.72	0	C	7.9	101.0	13.0	ng	3.4	0.5	315.1	40.2
Pedon 6	Playa (puffy ground clay flat) 374m above sea level; USDA: Fine, Mixed, Active, Hyperthermic Typic Haplosalids; WRB: Sodic Solonchak (Anoclayic, Calcaric, Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Ochric, Puffic)													
Az	0-30	0.4	47.3	52.3	0	SiC	8.3	92.7	11.5	ng	4.8	0.2	813.1	23.4
Bzn1	30-60	4.4	45.3	50.3	0	SiC	8.2	70.6	11.7	ng	4.3	0.2	485.6	27.3
Bzn2	60-90	0.0	67.7	32.3	0	SiCL	8.2	99.4	11.0	ng	1.7	0.3	704.2	23.4
Bzn3	90-135	0.4	59.3	40.3	0	SiC	8.3	69.8	13.0	ng	0.5	0.3	493.8	22.6
Bzn4	135-155	14.4	51.3	34.3	0	SiCL	8.2	49.5	13.0	ng	ng	0.2	318.6	20.0
Pedon 7	Playa (clay flat) 367m above sea level; USDA: Fine, Mixed, Active, Hyperthermic Typic Haplosalids; WRB: Salic Solonetz (Cutanic, Differentic, Endoclayic, Loamic, Ochric)													
Az	0-30	0.0	64.2	35.8	0	SiCL	7.2	92.7	13.5	ng	0.1	0.4	146.0	19.8
Bzn	30-60	0.0	62.2	37.8	0	SiCL	7.3	63.8	11.0	ng	0.5	0.3	45.7	20.9
Btnz	60-90	0.0	56.2	43.8	0	SiC	7.6	48.7	11.2	ng	0.3	0.3	92.1	24.2
Bzn1	90-115	0.0	58.2	41.8	0	SiC	7.7	43.5	14.0	ng	0.3	0.3	121.9	23.1
Bzn2	115-135	1.1	68.6	30.3	0	SiCL	8.4	34.3	15.0	ng	0.1	0.1	170.4	18.4
Bzn3	135-175	3.1	60.6	36.3	0	SiCL	8.4	31.8	13.2	ng	1.3	0.1	162.5	20.3
Pedon 8	Playa (salt crust) 367m above sea level; USDA: Fine, Mixed, Superactive, Hyperthermic Typic Haplosalids; WRB: Sodic Solonchak (Calcaric, Chloridic, Gypsic, Hypersalic, Ochric, Pantoloamic)													
Az	0-30	3.8	64.6	31.6	0	SiCL	8.1	222.2	17.2	0.25	2.2	0.4	385.1	19.2
Bzn1	30-60	1.8	60.6	37.6	0	SiCL	8.2	138.4	18.0	ng	0.9	0.2	261.0	22.8
Bzn2	60-90	5.8	58.6	35.6	0	SiCL	8.0	78.1	15.5	ng	2.0	0.3	204.4	21.6
Bzn3	90-120	15.8	48.6	35.6	0	SiCL	8.0	51.4	15.5	ng	1.7	0.1	181.1	20.3
Bzn4	120-155	17.8	52.6	29.6	0	SiCL	8.0	35.6	15.0	ng	2.3	0.1	163.0	18.6

RF: ذرات درشت (rock fragments); CCE: کربنات کلسیم معادل (calcium carbonate equivalent); SAR: نسبت سدیم جذبی (sodium adsorption ratio);

CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی (cation exchange capacity); ECe: هدایت الکتریکی خاک اشباع (electrical conductivity of soil saturated paste);

* negligible (ناچیز)

خاکرخ سوم (شکل ۲ج) و افق Bzn2 خاکرخ هشتم (شکل ۲و) مشاهده شد. جعفرزاده و بورنهام (۱۳) گزارش کردند که امکان تشکیل بلورهای عدسی شکل گچ در تمامی شرایط آب و هوایی وجود دارد. نویسندگان این پژوهش تشکیل این عارضه را به منافذ کوچک با بافت ریز و شوری زیاد نسبت دادند (جدول ۳). بنابراین به نظر می‌رسد وجود کلرید سدیم، با شرایط فوق اشباع محلول خاک با توجه به سولفات کلسیم در منافذ ریز در طی دوره‌های طولانی مدت، می‌تواند در تشکیل پدوفیچرهای عدسی شکل گچ در این سطوح ژئومورفیک کمک کند. فرپور و همکاران (۵) چنین نتیجه‌ای را برای خاک‌های گچی رفسنجان گزارش کردند. هاشمی و همکاران (۱۰) معتقدند که حضور کلرید سدیم منجر به دهیدراته شدن و جذب رطوبت از محیط اطراف شده، لذا به رشد بلورهای گچ کمک می‌کند.

طبقه‌بندی خاک‌ها و بررسی کارایی دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵)

خاک‌های منطقه بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی در دو رده اریدی سولز و انتی سولز و در سه زیر رده سالدیز، فلوونتر و آرتنتر و بر اساس طبقه‌بندی جهانی در چهار گروه مرجع سولونتر، سولونچاک، فلوویسولز و رگوسولز طبقه‌بندی شدند (جدول ۳).

خاکرخ اول در سطح منطقه مرطوب پلائیای جازموریان (شکل ۱) و در رژیم رطوبتی آکوئیک^۱ قرار دارد. موقعیت این سطح ممکن است در گذشته تغییر کرده باشد و همچنین در آینده نیز موقعیت آن جابه‌جا شود. صعود موئینگی املاح در این ناحیه، باعث شوری زیاد خاک سطحی شده است، ولی از آن جایی که رطوبت در این ناحیه زیاد است مانع از ایجاد سله‌های نمکی و سطوح پفکی شده است. رده‌بندی این خاک در سیستم رده‌بندی آمریکایی با توجه به رژیم رطوبتی آکوئیک به صورت تیپیک آکوئ سالدیز^۲ و در سامانه طبقه‌بندی جهانی به صورت گلیک سالیك سولونتر^۳ نام‌گذاری گردید (جدول ۳). سیستم رده‌بندی آمریکایی توجهی به افق ناتریک در نام‌گذاری این خاک ندارد، بنابراین با توجه به بحث مدیریتی پیچیده خاک‌های سدیمی، به نظر می‌رسد سیستم رده‌بندی آمریکایی بایستی در رده‌بندی خاک‌های شور و سدیمی، به افق ناتریک توجه نماید. بنابراین با وجود اینکه رده‌بندی آمریکایی بر اساس محدوده‌کننده‌ترین عامل برای رشد ریشه گیاه (که در این خاکرخ شوری و آب زیرزمینی بالا می‌باشد)، رده‌بندی می‌کند اما توصیه می‌شود با افزودن زیر گروه ناتریک آکوئ سالدیز^۴، خصوصیات این نوع خاک‌ها را بهتر نشان دهد.

بیشترین میزان رس (حدود ۷۰ درصد) در خاکرخ پنجم (سطح مسطح رسی) که در مرکز این پلایا قرار دارد، مشاهده شد (جدول ۳). دلیل آن، قدرت حمل اندک رسوبات توسط دو رودخانه هلیل رود و بمپور در مرکز پلایا می‌باشد. پهاش خاک‌ها در محدوده ۷/۰ تا ۸/۵ گزارش شد (جدول ۳). هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک‌ها منطقه در محدوده ۰/۵ تا ۲۲۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. کمترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به خاکرخ دوم می‌باشد که مستقیماً متأثر از رودخانه هلیل رود است. از سوی دیگر، بیشترین آن مربوط به خاکرخ هشتم از سطح ژئومورفیک پوسته نمکی است، که متأثر از رودخانه بمپور و رسوبات تبخیری شرق و جنوب شرق منطقه می‌باشد. میزان گچ در محدوده ناچیز تا ۴/۸ درصد و میزان کربنات کلسیم معادل در محدوده ۱۱ تا ۲۳ درصد گزارش شد (جدول ۳). مقادیر کربن آلی خاک نیز با توجه به فقر پوشش گیاهی کم است (جدول ۳). نکته قابل توجه تغییرات میزان کربن آلی با عمق در تمامی خاک‌ها بود که بیانگر رسوبگذاری متوالی در دوره‌های مختلف می‌باشد. در خاک‌های منطقه دو افق سالیك و ناتریك مشاهده شد. مشاهده افق سالیك با توجه به سازگار تشکیل پلایا قابل توجیه می‌باشد. همچنین مشاهده افق ناتریك را می‌توان به مقادیر بالای سدیم نسبت داد (جدول ۳). قبلی و همکاران (۱۷) و سنجرى و همکاران (۲۵) به ترتیب در مناطق فاریاب و جیرفت واقع در استان کرمان چنین نتیجه‌ای را گزارش کردند. پوشش رس پراکنده مشاهده شده در مطالعات میکرومورفولوژی نشان‌دهنده مطلب فوق است.

خصوصیات میکرومورفولوژی

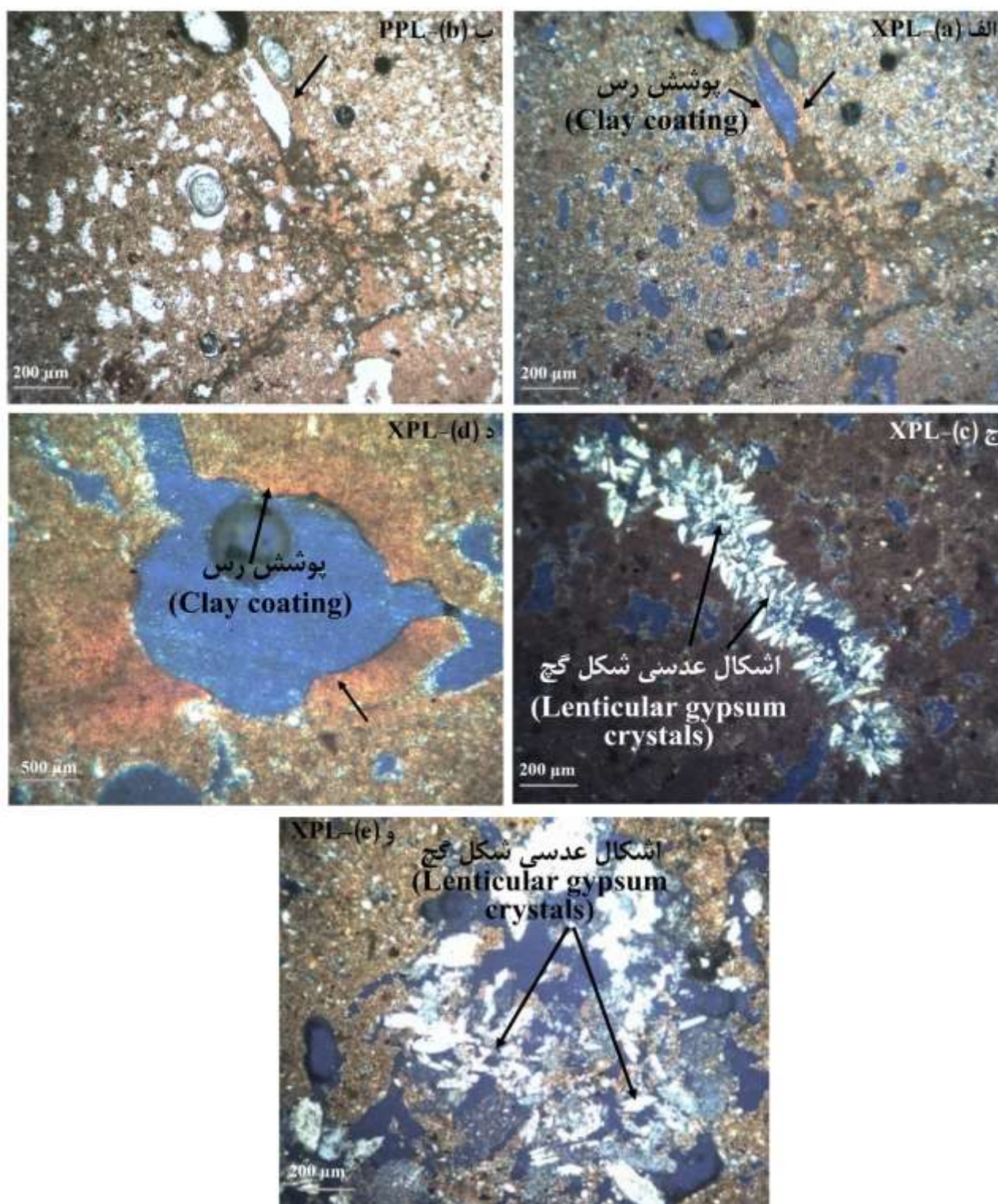
طی مطالعه میکرومورفولوژی خاک‌های پلائیای جازموریان عوارض خاک‌ساز پوشش رس و بلورهای عدسی شکل گچ مشاهده شدند (شکل ۲). مطالعه میکرومورفولوژیک افق Btnz2 خاکرخ اول (شکل ۲الف) و افق Btnz خاکرخ هفتم (شکل ۲د) نوع متفاوتی از پوشش رس را نشان می‌دهد که در معرض سدیم بالا ایجاد شده است. این نوع پوشش‌های رسی پراکنده، ویژه‌ی افق‌های ناتریك می‌باشند که علت آن خصوصیت پراکنش‌دهندگی سدیم و نقش مهم آن در تلاشی کردن خاکدانه‌ها و در نتیجه انتقال سریعتر کلوئیدهای رسی به اعماق خاک است (۱۵). نسبت جذب سطحی سدیم (بیش از ۱۳) زیاد این خاکرخ‌ها، نقش اقلیم خشک کنونی منطقه را در تشکیل این نوع پوشش‌های رسی تأیید می‌نماید. سنجرى و همکاران (۲۵) در مطالعه خود در منطقه جیرفت چنین عارضه‌ای را گزارش کردند. عارضه خاک‌ساز بلورهای عدسی شکل گچ در افق 3Btnzb1

3- Gleyic Salic Solonetz

4- Natric Aquisalids

1- Aquic moisture

2- Typic Aquisalids



شکل ۲- تصاویر مقاطع نازک الف و ب) پوشش رس در افق Btnz2 خاکرخ اول؛ ج) اشکال عدسی شکل گچ در افق 3Btnzb1 خاکرخ سوم؛ د) پوشش رس در افق Btnz خاکرخ هفتم؛ و) اشکال عدسی شکل گچ در افق Bzn2 خاکرخ هشتم

Figure 2- Thin sections of a and b) clay coatings in Btnz2 horizon, pedon 1 (XPL and PPL), c) lenticular forms of gypsum crystals in 3Btnzb1 horizon, pedon 3 (XPL), d) clay coating in Btnz horizon, pedon 7 (XPL), e) lenticular forms of gypsum crystals in Bzn2 horizon, pedon 8 (XPL)

خاکرخ شماره ۲ در سطح فن دلتا واقع شده است. بر اساس مطالعات میدانی این فلوویسول^۱ دارای ذرات شن با توزیع ذرات متفاوت بوده، که متأثر از تغییرات رژیم رودخانه هلیل رود است. بنابراین تفاوت در توزیع اندازه ذرات این خاکرخ بیانگر ته‌نشینی رسوبات آبرفتی رودخانه هلیل رود در طی زمان‌ها و رژیم‌های رطوبتی متفاوت است. که این باعث توزیع نامنظم ذرات شن در این خاکرخ شده است. خاک این سطح بر عکس سایر سطوح ژئومورفیک پلایا فاقد شوری بود که با توجه به نحوه تشکیل فن دلتا و متأثر بودن از رودخانه هلیل رود (فاقد شوری و املاح)، چنین چیزی دور از انتظار نمی‌باشد. کاربری این اراضی مراتع متراکم می‌باشد. بر اساس دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی و جهانی این خاک به ترتیب به صورت تیپیک توری فلوونتر^۲ و کلکریک اورتوفلوویک فلوویسول^۳ نام‌گذاری گردید (جدول ۳). با توجه به تنوع توصیف‌کننده‌ها برای تفسیر خاک‌های جوان، طبقه‌بندی جهانی کارایی بهتری نسبت به رده‌بندی آمریکایی دارد.

خاکرخ‌های سوم، پنجم و هفتم در سطح مسطح رسی قرار دارند. خاکرخ سوم از دو خاک جوان و مدفون تشکیل شده، که خاک متکامل مدفون دارای افق ناتریک و سالیک بود که توسط رسوبات اخیر پوشیده شده است و بر اساس معیارهای دو سامانه طبقه‌بندی به عنوان خاک مدفون^۴ شناخته می‌شود. خاک مدفون زیرین در دستورالعمل تشریح خاک آمریکایی (۲۹) با پسوند b نشان داده می‌شود، اما این خاک حتی در سطح فامیل در سامانه رده‌بندی خاک آمریکایی (۲۰۱۴) ذکر نشده است. این در حالی است که در سامانه طبقه‌بندی جهانی، خاک مدفون با جزئیات طبقه‌بندی شده، و با کلمه over از خاک جوان رویین جدا می‌شود. در سامانه رده‌بندی آمریکایی فقط خاک مدفون آلی به عنوان زیرگروه "تیپو-هیستیک"^۵ استفاده می‌شود. به طور کلی به دلیل تمرکز سامانه رده‌بندی آمریکایی بر روی مناطق کشاورزی و مدیریت مناطق ریشه، غفلت از خاک‌های مدفون ممکن است قابل قبول باشد. اما با توجه به شواهد مشترک خاک‌های مدفون در ایران، استفاده از سامانه طبقه‌بندی جهانی در مقایسه با رده‌بندی آمریکایی توصیه می‌گردد، تا به خوبی مشخصات این خاک‌ها را نشان دهد. چنین پیشنهادی قبلاً توسط اسفندیارپور و همکاران (۳) در مقایسه رده‌بندی چنین خاک‌هایی با دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی (۲۰۱۰) و جهانی (۲۰۰۷) نیز ارائه شده است. از سوی دیگر، خاک جوان با افق‌های A و C یک خاک متأثر از رسوبات آبرفتی بوده و همچنین با

وجود افق 2Cz یک خاک متأثر از رسوبات بادرفتی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱ مشخص است مناطق فعال فرسایش بادی (سطوح ژئومورفیک فرسایشی فعال) در بالادست این خاکرخ سبب رسوب ذرات خاک توسط باد در این لایه شده است. وجود این لایه در این خاکرخ به عنوان یک نتیجه از افزوده شدن توسط رسوبات بادی و نحوه توصیف این ویژگی در سیستم طبقه‌بندی جهانی از جنبه‌های جالب این رده‌بندی می‌باشد. این ویژگی با توصیف‌کننده اریدیک در سامانه طبقه‌بندی جهانی نشان داده شده است. از طرفی این انقطاع در عمق صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متری از یک خاکرخ توسط توصیف‌کننده رپتیک^۶ در برخی از گروه مرجع‌های خاک در سیستم طبقه‌بندی جهانی مشخص می‌شود. از سوی دیگر، این ناپیوستگی در سامانه رده‌بندی آمریکایی توسط انقطاع در نام‌گذاری افق‌ها مشخص شده است. نکته قابل تأمل دیگر در این خاکرخ، تعریف افق سالیک در سامانه طبقه‌بندی جهانی (میزان قابلیت هدایت الکتریکی حداقل ۱۵ دسی زیمنس بر متر و حاصلضرب ضخامت در میزان قابلیت هدایت الکتریکی بیشتر از ۴۵۰)، می‌باشد که پیشنهاد می‌شود این تعریف برای افق سالیک در رده‌بندی آمریکایی با توجه به نقشی که نمک در محدود کردن گیاه بازی می‌کند، نیز لحاظ گردد تا همبستگی بین این دو سامانه بیشتر شود (جدول ۴). سنجرى و همکاران (۲۶) چنین تعریفی را برای افق سالیک به رده‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) پیشنهاد کردند.

خاکرخ پنجم دارای رژیم رطوبتی آکوئیک می‌باشد. در این خاکرخ بر خلاف خاکرخ سوم فقط افق سالیک مشاهده شد، اما افق ناتریک مشاهده نشد (جدول ۳). اگرچه میزان سدیم تبدلی بالا بود اما برخی از ویژگی‌های افق ناتریک در این خاک مشاهده نشد (جدول ۳). لذا بر اساس سامانه رده‌بندی آمریکایی فقط می‌توان حضور افق مشخصه سالیک را در سطح زیربرده به نمایش گذاشت. این در حالی است که معادل آن در سامانه جهانی (نام کلاس با گروه مرجع و توصیف‌کننده‌ها) توانسته است علاوه بر این افق، حضور چشم‌گیر یون‌های سدیم و کلراید را نیز در نام کلاس این خاکرخ به نمایش گذارد. این خاک بر اساس دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی و جهانی به ترتیب به صورت تیپیک آکوئی سالیدز^۷ و سودیک گلیک سولونچاک^۸ نام‌گذاری گردید.

5- Tapto-Histic
6- Raptic
7- Typic Aquisalids
8- Sodic Gleyic Solonchak

1- Fluvisols
2- Typic Torrifluvents
3- Calcaric Orthofluvic Fluvisol
4- Buried soil

جدول ۴- پیشنهادهای ارائه شده برای دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی (۲۰۱۴) و جهانی (۲۰۱۵)

Table 4- Suggestions for Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) systems

Pedon no.	پیشنهادهای Suggestions	
	Soil Taxonomy (2014)	WRB (2015)
1	Natric Aquisalids	-
2	-	-
3	توجه به تعریف افق سالیک به مانند سامانه طبقه‌بندی جهانی Attention to the definition of the salic horizon similar to the WRB	-
4	Natrisalids	-
5	توجه به نوع نمک و میزان هدایت الکتریکی Attention to the salt type and the electrical conductivity amount	-
6	Puffic Haplosalids	-
7	Typic Natrisalids, Natric Haplosalids	-
8	Chloridic and Hypersalic diagnostic material	-

۳). بر اساس دو سامانه طبقه‌بندی آمریکایی و جهانی این خاک به ترتیب به صورت تیپیک هیلوسالیدز^۳ و سالیک سولونتر^۴ نام‌گذاری گردید. همانگونه که در تفسیر خاکرخ‌های فوق‌الذکر گفته شد، سامانه طبقه‌بندی جهانی توانسته است حضور توأم هر دو افق سالیک و ناتریک را در نام‌گذاری خاک وارد کرده، اما در سیستم رده‌بندی آمریکایی توجهی به افق ناتریک در خاک‌های شور نشده است. بنابراین گروه بزرگ ناتری سالییدز^۵ برای زیررده سالییدز به رده بندی آمریکایی پیشنهاد می‌گردد (جدول ۴). تا ضمن بهتر نشان دادن محدودیت اصلی، هماهنگی بیشتری با طبقه‌بندی جهانی ایجاد گردد. خاکرخ ششم در اراضی مسطح رسی پف کرده واقع شده است. هدایت الکتریکی در این خاک بالا است که با افزایش عمق، روند کاهش‌ی نشان می‌دهد (جدول ۳). شور بودن افق‌های سطحی را می‌توان به تبخیر آب از سطح این خاک نسبت داد. سطوح پف‌کرده حاوی نمک در سطح خاک‌های این موقعیت ژئومورفیک به دلیل همین سازوکار تشکیل شده است (۲۵). نام‌گذاری این خاک براساس سیستم رده بندی آمریکایی به صورت تیپیک هیلوسالیدز^۶ و براساس سیستم جهانی به صورت سودیک سولونچاک^۷ رده بندی شد. یکی از توصیف‌کننده‌های کلیدی که برای توصیف خاک‌هایی با سطح اراضی پف‌کرده در سامانه طبقه‌بندی جهانی به کار رفته، توصیف‌کننده پوفیک^۸ می‌باشد. در مقابل، سامانه رده‌بندی آمریکایی برای نام‌گذاری خاک شور به چنین مشخصه‌ای توجه نکرده است، بنابراین با توجه به تنوع توصیف‌کننده‌های موجود در سیستم طبقه‌بندی جهانی برای خاک‌های شور، این سیستم کارایی بهتری دارد. لذا برای هماهنگ

همانگونه که از نام‌گذاری این خاک در سیستم طبقه‌بندی جهانی مشخص است (جدول ۳)، این سامانه در نام‌گذاری خاک‌های شور به دلیل تنوع در توصیف‌کننده‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است. لذا توصیه می‌شود، سامانه رده‌بندی آمریکایی برای رده‌بندی خاک‌های شور به نوع نمک و میزان هدایت الکتریکی توجه نماید (جدول ۴). از طرفی خاکرخ هفتم به دلیل دریافت املاح بیشتر از رودخانه بمپور دارای میزان املاح محلول بیشتری نسبت به خاکرخ سوم (واقع در استان کرمان و متأثر از رودخانه هلیل رود) دارد (جدول ۳). رده‌بندی این خاک در سامانه رده‌بندی آمریکایی به صورت تیپیک هیلوسالیدز^۱ و در سامانه طبقه‌بندی جهانی به صورت سالیک سولونتر^۲ می‌باشد. سامانه طبقه‌بندی جهانی اهمیت بیشتری برای افق ناتریک نسبت به افق سالیک در خاک‌های شور قائل شده است که این باعث کارایی بهتر طبقه‌بندی جهانی نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی در مدیریت این نوع خاک‌ها خواهد شد. بنابراین توصیه می‌شود در رده‌بندی جامع آمریکایی به اهمیت افق ناتریک نسبت به سالیک در خاک‌های شور توجه شود، هم‌چنین برای زیررده خاک‌های سالییدز، زیرگروه‌های تیپیک ناتری سالییدز (افق ناتریک در ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک) و ناتریک هیلوسالیدز (افق ناتریک در ۱۵۰ سانتی‌متری از سطح خاک) پیشنهاد می‌گردد (جدول ۴).

خاکرخ چهارم در اراضی مسطح رسی-سدیمی قرار دارد. هدایت الکتریکی در سطح خاک (۲۰۲ دسی‌زیمنس بر متر) بیشتر از عمق می‌باشد، که به تبخیر و حرکت رو به بالای املاح مربوط است. با توجه به شوری زیاد و سهم بالای سدیم از کاتیون‌های تبادلی، مقدار نسبت جذبی سدیم (SAR) در این موقعیت از ۱۳ بیشتر است (جدول

6- Typic Haplosalids
7- Sodic Solonchak
8- Puffic

1- Typic Haplosalids
2- Salic Solonetz
3- Typic Haplosalids
4- Salic Solonetz
5- Natrisalids

انتشار توسط یون سدیم ایجاد شده‌اند. از سوی دیگر، بلورهای عدسی شکل گچ، به منافذ کوچک با بافت ریز و شوری زیاد نسبت داده شدند. خاک‌های منطقه بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی در دو رده اریدی سولز و انتی سولز و بر مبنای طبقه‌بندی جهانی در چهار گروه مرجع سولونتر، سولونچاک، فلوویسولز و رگوسولز نام‌گذاری شدند. نتایج حاصل از نام‌گذاری خاک‌ها نشان‌دهنده این مطلب است، که سامانه طبقه‌بندی جهانی به خوبی خاک‌های شور و خاک‌های شور و سدیمی را از یکدیگر تفکیک کرده در حالی که سامانه رده‌بندی آمریکایی هر دو این خاک‌ها را در زیر رده سالیذز قرار می‌دهد. به منظور هماهنگی بیشتر این دو سامانه طبقه‌بندی پیشنهاد می‌گردد که گروه بزرگ ناتری سالیذز، تیپیک ناتری سالیذز و پوفیک هیپوسالیذز به سامانه طبقه‌بندی آمریکایی اضافه گردد. در مجموع سامانه طبقه‌بندی جهانی به دلیل تنوع در استفاده از توصیف‌کننده‌ها، برای نام‌گذاری خاک‌های این منطقه کارایی بهتری نسبت به طبقه‌بندی آمریکایی دارد.

کردن دو سامانه طبقه‌بندی، پیشنهاد می‌شود در توصیف چنین خاک‌هایی در سیستم رده‌بندی آمریکایی، زیرگروه پوفیک هیپوسالیذز^۱ اضافه گردد (جدول ۴). نورایی (۲۲) نیز چنین زیرگروهی را به سامانه رده‌بندی آمریکایی (۲۰۰۶) پیشنهاد کرده است.

سطح ژئومورفیک پوسته نمکی یکی دیگر از سطوح ژئومورفیک پلایا جازموریان می‌باشد که فقط در قسمتی از کفه جازموریان که در استان سیستان و بلوچستان واقع شده، قرار دارد. به نظر می‌رسد به دلیل بیشتر بودن املاح رودخانه فصلی بمپور است. این رودخانه از ارتفاعات ایرانشهر سرچشمه می‌گیرد و از سازندهای تخییری شرق و جنوب شرقی منطقه عبور می‌کند، بنابراین دارای املاح محلول بیشتری نسبت به رودخانه هلیل رود است. از طرفی در این سطح پلی‌گون‌های نمکی در سطح با ضخامت کم نسبت با سایر پلایاهای ایران (مانند پلایای سیرجان، پلایای کویر لوت) مشاهده گردید. خاکرخ هشتم در این سطح قرار دارد. بیشترین میزان املاح (۲۲۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر) در سطح این خاک مشاهده گردید (جدول ۳). طبقه‌بندی جهانی در نام‌گذاری این خاکرخ، با توجه به تنوع توصیف‌کننده‌هایی مانند کلریدیک^۲، کلریدیک^۳، جیپسیریک^۴ و هایپرسالیک^۵ که در نام‌گذاری وارد شده است، از کارایی بهتری نسبت به رده‌بندی آمریکایی (که فقط در سطح زیرگروه به صورت تیپیک هیپوسالیذز^۶ در نظر گرفته شده است) برخوردار است (جدول ۳). لذا به مانند خاکرخ پنجم توصیه می‌شود، سامانه رده‌بندی آمریکایی جهت نام‌گذاری خاک‌های شور به نوع نمک و میزان هدایت الکتریکی توجه نماید، بنابراین ویژگی کلریدیک و هایپرسالیک (برای خاک‌هایی با شوری بیشتر از ۵۰ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان مواد مشخصه به سیستم رده‌بندی آمریکایی پیشنهاد می‌گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک‌ها در محدوده ۰/۵ تا ۲۲۲/۲ دسی‌زیمنس بر متر متغیر است، که کمترین میزان هدایت الکتریکی مربوط به سطح ژئومورفیک فن دلتا متأثر از رودخانه هلیل رود می‌باشد. از سوی دیگر، بیشترین آن مربوط به سطح ژئومورفیک پوسته نمکی است که تحت تأثیر رودخانه بمپور و رسوبات تخییری شرق و جنوب شرقی منطقه می‌باشد. نتایج مطالعات میکرومورفولوژی خاک‌ها نشان‌دهنده عوارض خاکساز پوشش رس و بلورهای عدسی شکل گچ می‌باشد. پوشش‌های رسی پراکنده در این پلایا، ویژه‌ی افق‌های ناتریک می‌باشند که در اثر

4- Gypsic
5- Hypersalic
6- Typic Haplosalids

1- Puffic Haplosalids
2- Calcaric
3- Chloridic

منابع

- 1- Banaie M.H. 1998. Soil Moisture and Temperature Regimes Map of Iran. Soil and Water Research Institute of Iran, Iran.
- 2- Bower C.A., and Hatcher J.T. 1966. Simultaneous determination of surface area and cation exchange capacity. Soil Science Society American Journal 30: 525–527.
- 3- Esfandiarpour Borujeni I., Salehi M.H., Karimi A., and Kamali A. 2013. Correlation between soil taxonomy and World Reference Base for soil resources in classifying calcareous soils: (A case study of arid and semi-arid regions of Iran). Geoderma 197-198: 126-136.
- 4- Esfandiarpour-Borujeni I., Mosleh Z., and Farpoor M.H. 2018. Comparing the ability of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) to distinguish lithologic discontinuity and an abrupt textural change in major soils of Iran. Catena 165: 63–71.
- 5- Farpoor M.H., Eghbal M.K., and Khademi H. 2003. Genesis and micromorphology of saline and gypsiferous Aridisols on different geomorphic surfaces in Nough area, Rafsanjan. Journal of Science & Technology of Agriculture & Natural Resources 7: 71–93. (In Persian with English abstract)
- 6- Farpoor M.H., Neyestani M., Eghbal M.K., and Esfandiarpour Borujeni I. 2012. Soil–geomorphology relationships in Sirjan playa, south central Iran. Geomorphology 138(1): 223–230.
- 7- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle size analysis. In: Klute, A. (Ed.), Methods of Soil Analysis. Agron. Monger, No Vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, pp. 388–409.
- 8- Gerasimova M.I. 2010. Chinese soil taxonomy: between the American and the international classification systems. Eurasian Soil Science 43(8): 945–949.
- 9- Ghasemzadeh M., Karimi A., Zeinadini A., and Khorassani R. 2017. Investigation of Clay Mineralogy, Micromorphology and Evolution of Soils in Bajestan Playa. Journal of Water and Soil 30(6): 2046-2059. (In Persian with English abstract)
- 10- Hashemi S.S., Baghernejad M., Owliaie H.R., and Najafi-Ghiri M. 2014. Effect of soil moisture regime on micromorphology of gypsum pedofeatures in soils of Fars province. Journal Water and Soil Conservation 21: 59-83.
- 11- IUSS Working Group WRB. 2007. World reference base for soil resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- 12- IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- 13- Jafarzadeh A.A., and Burnham C.P. 1992. Gypsum Crystals in Soils. Soil Science 43: 409-421.
- 14- Kemp R.A., Tomas P.S., Sayago J.M., Debyshire E., King M., and Wagner L. 2003. Micromorphology OSL dating of the basalt part of the loess-paleosol sequence at La Mesuda in Tucuman province, northwest Argentina. Quaternary International 106–107: 111–117.
- 15- Khormali F., Abtahi A., Mahmoodi S., and Stoops G. 2003. Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. Catena 53(3): 273–301.
- 16- Krinsley D.B. 1970. A Geomorphological and Paleoclimatological Study of the Playas of Iran. Geological Survey, United States Department of Interior, Washington DC, 227 pp.
- 17- Moghbeli M., Owliaie H.R., Sanjari S., and Adhami E. 2019. Genetic Study of Soil-Landscape Relationship in Arid Region of Faryab, Kerman Province. Journal of Water and Soil 33(2): 333-347. (In Persian with English abstract)
- 18- Mohammadi A. 2010. Sedimentology and sedimentary geochemistry of Jazmuriyan playa. Arid Biom Scientific and Research Journal 1(1): 68-78. (In Persian with English abstract)
- 19- Namaki L. 2003. Analysis of Makran aeromagnetic data, M.Sc.thesis, 88pp. University of Tehran, Institute of Geophysics.
- 20- Nelson R.E. 1982. Carbonate and Gypsum. P. 181-196. In: A. L. Page et al. (ed), Methods of Soil Analysis. Part II. 2nd ed., Agron. Monogar. No: 9. ASA and SSSA. Madison, WI.
- 21- Nelson D.W., and Sommers L.E. 1982. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. p. 539-577. In: A. L. Page et al (Ed), Methods of Soil Analysis. Part II. 2nd ed., Agron. Monogar. No: 9. ASA and SSSA. Madison, WI.
- 22- Noorae K. 2010. Soil Genesis and Classification in Sirch-Kaleshoor Toposequence, Loot Watershed, Kerman. MSc thesis. Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- 23- Owliaie H.R., Adhami E., Najafi Ghiri M., and Shakeri S. 2018. Pedological Investigation of a Litho-Toposequence in a Semi-Arid Region of Southwestern Iran. Eurasian Soil Science 51(12): 1447–1461.
- 24- Rosen M.R. 1994. The importance of groundwater in playas: a review of playa classifications and the sedimentology and hydrology of playas. In: Rosen, M.R. (Ed.), Palaeoclimate and basin evolution of playa systems: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 289: 1–18.
- 25- Sanjari S., Farpoor M.H., Eghbal M.K., and Esfandiarpour Borujeni I. 2011. Genesis, micromorphology and clay

- mineralogy of soils located on different geomorphic surfaces in Jiroft area. *Journal of Water and Soil* 25(2): 411-425. (In Persian with English abstract)
- 26- Sanjari S., Farpoor M.H., Mahmoodabadi M., and Barkhori S. 2020. Comparison of Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) in classification of soils in Iranshahr and Dalgan Regions, Sistan and Baluchestan Province. *Journal of Water and Soil* 34(5): 1081-1091. (In Persian with English abstract)
- 27- Sarmast M., Farpoora M.H., Jafaria A., and Esfandiarpour Borujeni I. 2019. Tracing environmental changes and paleoclimate using the micromorphology of soils and desert varnish in central Iran. *Desert* 24(2): 331-353.
- 28- Schaetzel R., and Anderson S. 2005. *Soils: Genesis and Geomorphology*. Cambridge University Press, 817 pp.
- 29- Schoeneberger P.J., Wysocki D.A., Benham E.C., and Soil Survey Staff. 2012. *Field book for describing and sampling soils*. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- 30- Soil Survey Staff. 2006. *Keys to Soil Taxonomy*. 10th., ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- 31- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- 32- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- 33- Stoops G. 2003. *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Madison, WI: Soil Science Society of America.
- 34- Zinck J.A. 2016. The geopedologic approach. In: Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., De Valle, H.F. (Eds.), *Geopedology: An integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Springer, p. 556 <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19159-1>.



Genesis and Micromorphology of Soils Located on Different Geomorphic Surfaces in the Jazmoorian Playa

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

Received: 29-12-2020

Accepted: 27-02-2021

Introduction: Playa, as an important geomorphic position in arid areas, covers about 1% of the continents and has attracted attention of soil scientists and geomorphologists. Soil genetic processes related to landforms and geomorphic processes are of great importance. Micromorphology is among necessary techniques in soil studies which has been used by several researchers. Micromorphological features together with other soil characteristics provide invaluable data for reconstructing soil genetic processes. Moreover, classification and identifying characteristics of soils are pre-requisites for the optimum use and management of soil resources. Soil Taxonomy and World Reference Base (WRB) is among the most extensively used classification systems worldwide.

Since no data about soils of the Jazmoorian Playa is available, the present research was performed with the following objectives: 1) studying physical, chemical, and micromorphological properties of soils in the Jazmoorian Playa related to different geomorphic surfaces, and 2) classifying soils of the region by Soil Taxonomy (2014) and WRB (2015) systems.

Materials and Methods: The Jazmoorian playa is located in Kerman and Sistan Baloochestan provinces. The Jazmoorian Playa is a continental depression of late Pliocene. The playa is about 360 m above sea level with about 65 km length and 45 km width located between 58° to 60° longitudes and 27° to 28° latitudes. The area extends to the igneous Bazman Mountains to the northeast, the igneous Jebalbarez Mountains (granodiorite, andesite, granite) to the north and northwest, the Beshagard Ophiolite Mountains of Cretaceous and Paleocene to the south, and the colored Mélanges to the Oman Sea. Soil moisture and temperature regimes of the area were aridic (and aquic in limited areas) and hyper thermic, respectively. Wet zone, fan delta, clay flat, puffy ground clay flat, sodic clay flat, and salt crust were among the geomorphic surfaces investigated in the playa. In order to study the maximum soil variations in the area, eight representative pedons were described and sampled. Collected soil samples were air dried, grounded, and passed through a 2 mm sieve, and routine physical and chemical soil properties were then analyzed. Undisturbed soil samples were used for micromorphological observations. The soils were classified according to Soil Taxonomy (33) and WRB (11) systems.

Results and Discussion: Results showed that EC contents of the saturated extracts ranged from 0.5 (fan delta) to 222.2 (salt crust) dS/m. The soils of the playa in Kerman Province affected by the Halilrood River had less salinity compared to the soils on playa surfaces in Sistan Baloochestan Province under influence of the Bampoor River. In addition, salt crust was only formed in parts of the playa located in Sistan Baloochestan Province. Clay coating and lenticular gypsum crystals were among the micromorphological features observed in the Jazmoorian Playa's soils. The clay coating was formed due to high Na content. However, lenticular gypsum was formed due to small volume pore spaces as well as high salinity of the area. High soluble salts (Table 3) caused a salt coating around pore spaces to be formed due to evaporation of saline water table. WRB system could better classify soils into Solonchak and Solonetz RSGs compared to Soil Taxonomy system which classifies all soils as the Salids sub order. Natric Aquisalids, Typic Natrisalids, Natric Haplosalids, and Puffic Haplosalids sub groups and Natrisalids great group are recommended to be added to Soil Taxonomy system for more harmonization between the two classification systems. Furthermore, the definition of salic horizon in WRB system (EC of at least 15 dS/m and the EC multiplied by thickness of at least 450) is recommended to be included in Soil Taxonomy, because of limitations induced by salts and for a better correlation of the two systems.

Conclusion: Results of physicochemical properties clearly showed that electrical conductivity of soil saturated extracts was in the range of 0.5 to 222.2 dS/m. The part of the playa located in Sistan Baloochestan Province is more saline than the part in Kerman Province. More salinity of playa in Sistan Baloochestan Province was attributed to the Bampoor River which passes through evaporative formations located in east and southeast of the

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

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

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

DOI: 10.22067/jsw.2021.67332.0

area. Micromorphological observations showed clay coatings and lenticular gypsum crystals as pedogenic features. The soils of the area were classified as Aridisols and Entisols (according to Soil Taxonomy system) and Solonetz, Solonchaks, Fluvisols, and Regosols Reference Soil Groups based on WRB classification system. Moreover, WRB system was capable of separating saline from saline-sodic soils, however, Soil Taxonomy classifies both soils as Salids suborder. Therefore, WRB system is better suited for classification of the soils of our study area as compared with Soil Taxonomy.

Keywords: Clay coating, Geomorphology, Saline soils, Soil Taxonomy, WRB



مقاله پژوهشی

تأثیر ویژگی‌های خاک بر عملکرد و تهیه جدول نیازهای ریشی پرتقال در مناطق انتخابی کشور ایران

علی زین الدینی^{۱*} - میرناصر نویدی^۲ - علی اسدی کنگرشاهی^۳ - مهناز اسکندری^۴ - سیدعلیرضا سیدجلالی^۵ - آناهید سلمان‌پور^۶ - جواد سیدمحمدی^۷ - مالک قاسمی^۸ - سید علی غفاری نژاد^۹ - غلامرضا زارعیان^{۱۰}

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۱۶

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر خصوصیات اراضی بر عملکرد پرتقال، درجه‌بندی آن‌ها و تهیه جدول نیازهای ریشی برای تعیین تناسب اراضی برای کشت این گیاهان به روش فائو بود. به همین منظور، ۱۳۸ باغ پرتقال (۱۱۸ باغ برای درجه‌بندی و ۲۰ باغ برای صحت‌سنجی) در استان‌های فارس، مازندران، گیلان، کرمان و جنوب کرمان انتخاب شد. در هر باغ، پرسش‌نامه‌ای تکمیل و یک پدون حفر و مطالعه شد. سپس، نمونه‌های خاک برای آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی تهیه گردید. ویژگی‌های انتخاب شده شامل شوری، درصد سدیم قابل تبادل (ESP)، واکنش خاک، گچ، آهن، رس، شن، سیلت، سنگریزه، پتاسیم و فسفر قابل دسترس خاک بود. از کل داده‌ها، ۲۰ داده برای اعتبارسنجی انتخاب و بقیه داده‌ها وارد مدلسازی شامل روابط رگرسیونی چندمتغیره به روش گام‌به‌گام و ساده شد. در این معادلات ارتباط بین عملکرد به عنوان متغیر وابسته با ویژگی‌های خاک به عنوان متغیرهای مستقل بررسی شد. به کمک نمودارها، درجه‌بندی خصوصیات اراضی به روش فائو بدست آمده و جدول نیازهای ریشی پیشنهاد شد. این جدول، با داده‌های اعتبار سنجی، صحت‌سنجی شد. رابطه رگرسیونی چندمتغیره نشان داد که شوری، ESP، آهن، گچ، سنگریزه، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، با ضریب تبیین ۰/۹۵ بیشترین اثر را بر عملکرد پرتقال دارند و معادلات رگرسیونی ساده مشخص کردند شوری خاک، ESP، گچ، آهن و سنگریزه، بیشترین اثر را در کاهش و کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس، بیشترین اثر را در افزایش عملکرد دارند. ضریب تبیین عملکرد با شاخص خاک بدست آمده از جدول نیازهای خاک و اراضی پیشنهادی برای پرتقال نیز ۰/۷۹ بدست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول جدول پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی: الگوی کشت، تناسب اراضی، مرکبات، نیاز ریشی

مقدمه

در دنیا به خود اختصاص می‌دهد. استان‌های مازندران، فارس، کرمان و هرمزگان، مهم‌ترین تولیدکنندگان مرکبات در ایران می‌باشند. این استان‌ها، ۸۸/۳۶ درصد سطح زیر کشت و ۹۱/۱۳ درصد تولید کشور را در اختیار دارند (۱۴) که بیش از ۵۰ درصد آن به پرتقال اختصاص دارد. هرچند که ممکن است مرکبات در اراضی مختلف با دامنه گسترده‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی مانند سطح آب زیرزمینی بالا، زهکشی ضعیف، شوری و سدیمی بودن زیاد خاک و

مرکبات یکی از منابع بسیار مهم اقتصادی، مبادلات تجاری و اشتغال ساکنین حدود ۵۰ کشور تولید کننده مرکبات جهان است (۷). کشورهای پیشرو در تولید مرکبات شامل چین، برزیل، هند، آمریکا، مکزیک، اسپانیا، ایران و مصر هستند (۷). ایران با تولید ۴/۳ میلیون تن و حدود ۲۹۰ هزار هکتار سطح زیر کشت، جایگاه هفتم را

۸- استادیار پژوهش، پژوهشکده مرکبات و میوه‌های نیمه گرمسیری، موسسه تحقیقات علوم باغبانی، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، رامسر، ایران
۱۰- استادیار پژوهش، مرکز تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، زرقان، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2021.68421.1017

۱، ۲، ۴، ۵، ۷ و ۹- استادیاران پژوهش، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: ali_zeinadin@yahoo.com

۳- استادیار پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران
۶- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران

کردند و مشاهده کردند ریسک پرورش مرکبات با افزایش عرض جغرافیایی زیاد شد که نشان از اثر دما در پرورش و عملکرد مرکبات داشت. نواز و همکاران (۱۶) نیز گزارش کردند که اقلیم تاثیر عمده‌ای بر مراحل رشد و نمو میوه و ویژگی‌های فیزیکی آن دارد. بهترین اندازه و رنگ میوه در اقلیم نیمه‌گرمسیری نسبت به اقلیم گرمسیری بدست آمد. زین‌الدینی و همکاران (۲۷) با تهیه و تدوین جداول نیازهای رویشی گیاهان مهم زراعی و باغبانی کشور نشان دادند ویژگی‌های اقلیمی متعددی مانند میانگین دمای دوماه پس از برداشت، رطوبت نسبی سردترین ماه سال، رطوبت نسبی مرحله گلدهی و رسیدن میوه از جمله عوامل مهم تاثیرگذار در عملکرد مرکبات می‌باشد.

این پژوهش، با هدف بررسی اثر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و حاصلخیزی اراضی بر عملکرد پرتقال در مناطق مهم تحت کشت این گیاه، مطالعه روابط رگرسیونی بین ویژگی‌های مختلف خاک با عملکرد و درجه‌بندی پارامترهای خاک و اراضی انجام شده است. نتایج این مطالعه در نهایت منجر به تهیه جدول نیازهای رویشی پرتقال و صحت‌سنجی آن در استان‌های مهم کشور از نظر تولید پرتقال شامل فارس، مازندران، کرمان، گیلان و جنوب کرمان گردید. به کمک جداول پیشنهادی می‌توان ارزیابی تناسب اراضی برای این محصول مهم باغبانی (پرتقال) را انجام داد که از مهمترین مراحل در تهیه الگوی کشت هر منطقه یا کشور است.

مواد و روش‌ها

نخست ۱۳۸ باغ (۱۱۸ باغ برای درجه‌بندی و ۲۰ باغ برای صحت‌سنجی) در استان‌های گیلان، مازندران، فارس، کرمان و بخش‌های جنوبی استان کرمان انتخاب گردیدند. باغ‌های انتخابی در مناطق تحت کشت مرکبات در استان‌های مازندران، گیلان، فارس، جنوب کرمان و کرمان هر یک به ترتیب شامل ۴۰، ۲۱، ۲۴، ۲۳ و ۲۹ باغ بود که دارای مدیریت تقریباً مشابه بودند (از لحاظ استفاده از نهاده‌ها، متوسط و سیستم آبیاری آن‌ها غرقابی و رقم کشت شده با پایه‌های غالب (در شمال کشور، پایه‌های نارنج، سیترنج‌ها و سیتروملو، در استان فارس، نارنج و لیموترش و در استان کرمان، نارنج و لکامریانا) بود). لیکن، در طیف متنوعی از عملکرد و شرایط خاک قرار داشتند. بدین ترتیب اثرات عواملی مانند مدیریت، اقلیم و سن درخت تا حد ممکن در تحقیق حذف شده و امکان بررسی اثرات خصوصیات اراضی بر عملکرد پرتقال ممکن شد. در هر باغ یک بدون حفر، تشریح و طبقه‌بندی گردید (۲۳) و از هر باغ نمونه برداری خاک انجام شد. آزمایش‌های انجام شده شامل pH گل اشباع، EC عصاره گل اشباع، آهک به روش تیتراسیون برگشتی، کربن آلی به روش والکلی-بلاک

واکنش متوسط یا بالا کشت شوند، لیکن وجود این محدودیت‌ها در اراضی تحت کشت سبب افت عملکرد مرکبات می‌شود. برپایه مطالعات انجام شده، تحمل مرکبات نسبت به شرایط نامناسب خاک در مقایسه با دیگر درختان میوه کمتر است (۱، ۲، ۲۵، ۲۶ و ۲۸). مرکبات نسبت به مقادیر بالای شوری، گچ و آهک خاک حساس بوده و در صورت کشت در این اراضی افت عملکرد مشهود است (۹، ۱۰، ۲۰ و ۲۷). مطالعات خاکشناسی باغ‌های مرکبات مناطق شرق مازندران (۲۲) نشان می‌دهد با افزایش مقدار آهک از آمل و بابل (کمتر از ۱ درصد) به سمت ساری و نکا (بیشتر از ۴۰ درصد) ناهنجاری‌های تغذیه‌ای و فیزیولوژیکی زیادی برای مرکبات منطقه ایجاد شده است. محققان این ناهنجاری‌ها را به افزایش بی‌کربنات و بالا رفتن pH محلول خاک در منطقه ریشه و شیره سلولی گیاه نسبت دادند. محققان دیگری نیز (۳، ۱۱ و ۱۷) گزارش کردند بی‌کربنات محلول در خاک‌های آهکی بر راندمان فیزیولوژیکی آهن در ریشه‌ها و برگ‌ها تاثیر زیادی دارد که منجر به کاهش غلظت کلروفیل، کند شدن تشکیل برگ‌های جدید و عارضه ریزبرگی^۱ می‌شود.

شومان (۱۸) رابطه رگرسیونی بین عملکرد پرتقال در فلوریدا و برخی ویژگی‌ها شامل عمق خاک، عمق آب زیرزمینی، شاخص کلروفیل برگ، عناصر غذایی برگ و شاخص NDVI بدست آورد. رابطه رگرسیونی نشان داد ۹۰ درصد تغییرات مکانی عملکرد که بوسیله شاخص NDVI قابل ارزیابی است، توسط ویژگی‌های خاک مانند مواد آلی، رنگ، انعکاس مادون قرمز نزدیک، شوری خاک و عمق آب زیرزمینی قابل توضیح می‌باشد. مان و همکاران (۱۳) ارتباط برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند ظرفیت نگهداشت آب، توزیع اندازه ذرات و رنگ خاک را با عملکرد مرکبات در فلوریدا بررسی کردند. این محققان باغ‌های مورد مطالعه را به پنج کلاس از بسیار ضعیف تا بسیار خوب طبقه‌بندی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که باغ‌هایی که درختان مسن‌تری دارند، دارای مقادیر رس و ظرفیت نگهداشت آب بالاتری بودند و خاک رنگ تیره‌تری داشت. در باغ‌هایی که سن درختان کمتر بود هدایت هیدرولیکی اشباع بیشتر بود که محققان آن را به وجود مقدار شن بیشتر در خاک ارتباط دادند. همچنین بین عملکرد و جرم مخصوص ظاهری خاک، ارتباط معنی‌دار مشاهده نشد. مان و همکاران (۱۲) همچنین دریافتند بین عملکرد پرتقال و حجم تاج پوشش گیاهی، NDVI و EC_a ، همبستگی مثبت و با ارتفاع، همبستگی منفی وجود دارد. نقشه پراکنش عملکرد می‌تواند برای برنامه‌ریزی‌های تهیه نمونه خاک و بررسی تغییرات خاک در یک منطقه جدید استفاده گردد.

دوان و همکاران (۵) بر اساس ویژگی‌های اقلیمی مناطق نیمه گرمسیری، چین را به سه منطقه با ریسک کم، متوسط و زیاد تقسیم

اصلاح شده، فسفر قابل جذب به روش اولسن، پتاسیم قابل جذب گیاه با روش عصاره‌گیری با استات آمونیم، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم، درصد گچ با روش استن، صورت گرفت. همچنین جداسازی اجزای مختلف شن، سیلت و رس به روش هیدرومتر انجام شد (۲۴).

پردازش آماری داده‌ها

ابتدا آمار توصیفی داده‌های بدست آمده بررسی شد. وضعیت پراکنش داده‌ها، گام اساسی در توصیف کمی و آماری آن‌ها می‌باشد (۸). شاخص‌هایی مانند میانگین، حداکثر و حداقل، اطلاعاتی در رابطه با موقعیت قرارگرفتن توزیع داده‌ها یا نقطه ثقل توزیع را نشان می‌دهد. واریانس و انحراف معیار نیز چگونگی پراکندگی داده‌ها را بررسی می‌نمایند (۱۵). سپس، اثرات خصوصیات مختلف خاک و اراضی بر عملکرد پرتقال، با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و روابط رگرسیونی بررسی شد. پیش از انجام آنالیزهای آماری میانگین وزنی برای خصوصیت خاک در هر پروفیل محاسبه شد (۲۰). وضعیت داده‌های پرت با استفاده از نمودار جعبه‌ای و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از شاخص‌های کشیدگی و چولگی و آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف بررسی شد. مجموعه داده اعتبارسنجی ۲۰ داده بود که از کل داده‌ها بصورت تصادفی انتخاب شد. بررسی‌های آماری شامل آمار توصیفی، رگرسیون چندمتغیره و رگرسیون ساده بین عملکرد (متغیر وابسته) با ویژگی‌های خاک و زمین (متغیرهای مستقل) بر روی سایر داده‌ها انجام گردید. خصوصیات اراضی انتخاب شده شامل شور و سدیمی بودن خاک، واکنش خاک، گچ، آهک، شن، سیلت، رس، کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل دسترس و سنگریزه بود. در نهایت، مهم‌ترین عوامل خاک و زمین که بر عملکرد تأثیر دارند انتخاب شدند. تجزیه و تحلیل‌ها با استفاده نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ انجام گردید.

درجه‌بندی خصوصیات اراضی و تهیه جدول نیازهای رویشی پرتقال

با توجه به اینکه جدول تهیه شده برای پرتقال به منظور مطالعات تناسب اراضی بر مبنای روش فائو (۶) انجام شده است، لذا مرز کلاس‌های مختلف تناسب در جدول پیشنهادی، مطابق با جداول ساینس و همکاران (۲۰) می‌باشد. پس از مشخص شدن ویژگی‌های موثر بر عملکرد پرتقال و بررسی معادلات رگرسیونی ساده بین عملکرد با هر خصوصیت اراضی، منحنی بین عملکرد با خصوصیات اراضی بر اساس معادله رگرسیونی ساده به صورت مجزا ترسیم گردید. محل تلاقی نقاط ۸۵، ۶۰، ۴۰ و ۲۵ درصد عملکرد با ویژگی‌های خاک در هر کدام از معادلات، مشخص کننده مرز کلاس‌های تناسب اراضی هستند. محل تلاقی خط از منحنی به محور ویژگی از عملکرد

۸۵ درصد، نشان‌دهنده مرز S1 و S2، عملکرد ۶۰ درصد، مرز S2 و S3، عملکرد ۴۰ درصد (عملکرد سر به سر) مرز S3 و N1 و در نهایت، عملکرد ۲۵ درصد، تعیین کننده مرز N1 و N2 می‌باشد. همچنین برای تعیین عملکرد سربه سر و مرز S3 با N1، از بررسی‌های اقتصادی و تعیین هزینه‌های متغیر تولید یک کیلوگرم محصول پرتقال در یک سال زراعی نیز استفاده شد. برای خصوصیتی که با بررسی آماری امکان درجه‌بندی و تعیین حدود مرز کلاس‌ها برای آن‌ها وجود نداشت مانند سطح آب زیرزمینی و عمق خاک، درجه‌بندی براساس مقادیر بهینه آن‌ها برای پرتقال بر پایه منابع معتبر، بررسی‌های میدانی، مطالعات صحرایی و بررسی دقیق کارت‌های تشریح پروفیل انجام شد. در نهایت جدول نیازهای خصوصیات خاک و اراضی برای پرتقال در مناطق مورد مطالعه استخراج شد که می‌تواند در محاسبات ارزیابی تناسب اراضی برای کشت این محصول در سطح کشور مورد استفاده قرار گیرد.

اعتبارسنجی

به منظور راستی آزمایی جدول نیازهای رویشی خاک و اراضی پیشنهادی برای پرتقال، درجه‌بندی خصوصیات اراضی به روش پارامتریک برای ۲۰ مجموعه داده که در تهیه جدول به کار نرفته بودند، انجام شد. سپس، رابطه عملکردهای واقعی با شاخص اراضی برای هر مجموعه به کمک رگرسیون ساده، بررسی و تحلیل شد. بر این اساس، درجه‌بندی خصوصیات اراضی در جدول پیشنهادی ارزیابی شده و در صورت نیاز اصلاح گردید.

نتایج و بحث

آمار توصیفی متغیرها

نتایج خلاصه آمار توصیفی داده‌های بدست آمده در جدول ۱ نشان داده شده است. برپایه این جدول، واریانس برای پتاسیم قابل جذب، شن، رس، سنگریزه و آهک، زیاد و برای واکنش و کربن آلی خاک، ناچیز می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد پرتقال در طیف وسیعی از خاک‌ها کشت می‌شوند. هر چه مقدار واریانس کمتر باشد، پراکندگی داده‌ها کمتر است و بالعکس. بنابراین اکثر ویژگی‌های خاک دارای گستردگی زیادی هستند. همچنین دامنه تغییرات آهک بین ۱۰ تا ۳۳/۳ درصد متغیر بود. وجود آهک در خاک به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث کاهش قابلیت دسترسی بسیاری از عناصر مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی و مس می‌گردد (۱). اسدی کنگر شاهی و همکاران (۱) نشان دادند با افزایش آهک کل و فعال خاک، میانگین غلظت آهن فعال برگ کاهش می‌یابد. بر اساس جداول ساینس و همکاران (۱۹۹۱) نیز مقدار مناسب آهک در خاک برای پرتقال تا ۵ درصد می‌باشد.

جدول ۱- آماره‌های توصیفی داده‌های خصوصیات خاک و عملکرد

Table 1- Descriptive statistics of soil properties and yield

	CaCO ₃ آهک	Gypsum گچ	OC (%) کربن آلی	pH	EC (dS.m ⁻¹) شوری	ESP (%) درصد سدیم تبادلی	K _{ava.} (mg.kg ⁻¹) پتاسیم قابل دسترس	P _{ava.} (mg.kg ⁻¹) فسفر قابل دسترس	Sand (%) شن	Clay (%) رس	Silt (%) سیلت	Gravel (%) سنگریزه	Yield (kg.ha ⁻¹) عملکرد
Mean میانگین	33.3	3.54	0.89	7.8	5.4	10.7	224	21.6	60.9	26.2	12.8	23.4	24901.3
Median میانه	33.0	2.70	0.82	7.78	5.05	9.0	231.5	18.05	60.0	25.50	11.00	24.0	24125
Mode مد	27.0	2.70	0.27	7.80	6.00	4.0	225	14.00	50.0	3.00	15.00	0.00	32500
Std. Deviation انحراف معیار	10.8	2.66	0.65	0.40	3.48	6.79	61.9	9.64	22.5	15.96	8.32	15.0	14470.4
Variance واریانس	116.75	7.07	0.42	0.16	12.08	46.22	3835.9	93.03	507.2	254.9	69.18	225.1	209393707
Skewness چولگی	.05	1.42	1.23	0.38	0.611	0.85	-0.249	0.62	-0.32	0.019	1.4	0.050	0.428
Kurtosis کشی‌دگی	-.76	1.35	2.29	0.66	-0.431	-.17	-0.507	-0.698	-0.66	-1.410	2.16	-0.99	-1.095
Range دامنه	45.0	11.64	3.48	2.17	12.59	26.30	260.0	37.90	86.0	54.0	37.50	55.0	49650
Minimum کمینه	10.0	0.36	0.05	6.63	0.61	1.70	100.0	8.00	10.0	2.0	1.00	0.00	6350
Maximum بیشینه	55.0	12.0	3.53	8.80	13.20	28.0	360.0	45.90	96.0	56.0	38.50	55.00	56000
CV ضریب تغییرات	32.4	75.14	73.03	5.12	64.4	63.4	27.6	44.6	36.9	60.9	65	65.1	58.1

مطالعه از ۰/۰۵ تا ۳/۵۳ درصد متغیر بود. میانگین درصد ماده آلی ۰/۸۹ بود که نشان می‌دهد عمده خاک‌ها کشور از نظر ماده آلی فقیر هستند. واکنش خاک، درصد کربن آلی و گچ، سه ویژگی از خاک بودند که دامنه پراکنش کمی داشتند. میانگین، حداقل و حداکثر پتاسیم قابل جذب به ترتیب ۲۲۴، ۱۰۰ و ۳۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم بدست آمد. مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر فسفر قابل دسترس نیز به ترتیب ۲۱/۶، ۸ و ۴۵/۹ میلی گرم بر کیلوگرم بود. میانگین فسفر و پتاسیم خاک در باغات بررسی شده برای پرتقال از حدود بحرانی کمتر است.

رگرسیون چندمتغیره

نتایج حاصل از ورود متغیرهای شوری خاک، قلیائیت، واکنش، گچ، آهک، شن، سیلت، رس، کربن آلی، فسفر قابل دسترس، پتاسیم قابل جذب و سنگریزه به عنوان متغیر مستقل و عملکرد به عنوان متغیر وابسته در نرم افزار بیانگر آن است که از میان متغیرهای مستقل، به ترتیب شوری خاک، ESP، گچ، آهک، فسفر، پتاسیم و سنگریزه وارد معادله شده است.

میانگین شوری خاک در باغ‌های مورد مطالعه ۵/۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. کمینه، بیشینه و میانگین مقدار درصد سدیم قابل تبادل خاک، به ترتیب ۱/۷، ۲۸ و ۱۰/۷ درصد بود. بدین مفهوم که مقدار حداکثر سدیم قابل تبادل در نمونه‌ها، بیش از حد مجاز برای پرتقال بوده است (۲۱). بیشینه، کمینه و میانگین گچ به ترتیب ۱۲، ۰/۳۶ و ۳/۵۴ درصد بود. بیشترین مقدار گچ مربوط به باغات پرتقال مناطق بم و شهداد استان کرمان و کمترین آن مربوط به مازندران و گیلان است. شوری خاک از ۰/۶۱ در نمونه‌های مازندران تا ۱۳/۲ دسی‌زیمنس بر متر در کرمان متغیر بود. واکنش خاک در اراضی بررسی شده از ۶/۶۳ تا ۸/۸ متغیر و میانگین آن، ۷/۸ گزارش شده است. دلالت و همکاران (۴) مقادیر مناسب واکنش خاک برای باغ‌های پرتقال در برزیل را بین ۵/۵ تا ۶ و مقادیر مناسب یون کلسیم و منیزیم در خاک را ۲۱ تا ۴۰ میلی‌مول در هر سانتی‌متر مکعب خاک گزارش کردند. واکنش خاک کنترل‌کننده حلالیت عناصر در محلول خاک می‌باشد و بر جذب عناصر توسط ریشه تاثیر دارد. ماده آلی خاک نیز در باغ‌های مورد

جدول ۲- نتایج همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و عملکرد

Table 2- Pearson correlation results between independent variables and yield

	CaCO ₃ آهک	Gypsum گچ	OC (%) کربن آلی	pH	EC (dS.m ⁻¹) شوری	ESP % درصد سدیم تبادلی	K _{ava} . (mg.kg ⁻¹) پتاسیم قابل دسترس	P _{ava} . (mg.kg ⁻¹) فسفر قابل دسترس	Sand (%) شن	Clay (%) رس	Silt (%) سیلت	Gravel (%) سنگریزه	Yield (kg.ha ⁻¹) عملکرد
CaCO ₃ آهک	1	0.868**	-0.349**	0.557**	0.898**	0.904**	-0.887**	-0.865**	0.459**	-0.556**	-0.173	0.862**	-0.842**
Gypsum گچ	0.868**	1	-0.242**	0.498**	0.921**	0.916**	-0.874**	-0.738**	0.310**	-0.395**	-0.081	0.826**	-0.752**
OC (%) کربن آلی	-0.349**	-0.242**	1	-0.557**	-0.168	-0.202*	0.156	0.126	-0.444**	0.490**	0.262**	-0.188*	0.143
pH	0.557**	0.498**	-0.557**	1	0.494**	0.520**	-0.403**	-0.335**	0.651**	-0.686**	-0.443**	0.386**	-0.346**
EC (dS.m ⁻¹) شوری	0.898**	0.921**	-0.168	0.494**	1	0.967**	-0.924**	-0.841**	0.326**	-0.394**	-0.126	0.889**	-0.855**
ESP (%) درصد سدیم تبادلی	0.904**	0.916**	-0.202*	0.520**	0.967**	1	-0.868**	-0.813**	0.430**	-0.497**	-0.207*	0.821**	-0.795**
K _{ava} (mg.kg ⁻¹) پتاسیم قابل دسترس	-0.887**	-0.874**	0.156	-0.403**	-0.924**	-0.868**	1	0.870**	-0.225*	0.296**	0.041	-0.955**	0.938**
P _{ava} (mg.kg ⁻¹) فسفر قابل دسترس	-0.865**	-0.738**	0.126	-0.335**	-0.841**	-0.813**	0.870**	1	-0.212*	0.324**	-0.048	-0.881**	0.900**
Sand (%) شن	0.459**	0.310**	-0.444**	0.651**	0.326**	0.430**	-0.225*	-0.212*	1	-0.963**	-0.857**	0.167	-0.197*
Clay (%) رس	-0.556**	-0.395**	0.490**	-0.686**	-0.394**	-0.497**	0.296**	0.324**	-0.963**	1	0.688**	-0.254**	0.274**
silt (%) سیلت	-0.173	-0.081	0.262**	-0.443**	-0.126	-0.207*	0.041	-0.048	-0.857**	0.688**	1	0.035	0.006
gravel سنگریزه	0.862**	0.826**	-0.188*	0.386**	0.889**	0.821**	-0.955**	-0.881**	0.167	-0.254**	0.035	1	-0.961**
yield (kg.ha ⁻¹) عملکرد	-0.842**	-0.752**	0.143	-0.346**	-0.855**	-0.795**	0.938**	0.900**	-0.197*	0.274**	0.006	-0.961**	1

**Correlation is significant at the 0.01 level.

*Correlation is significant at the 0.05 level.

جدول ۳- تجزیه واریانس رابطه رگرسیون چندمتغیره بین عملکرد و متغیرهای مستقل

Table 3- Analysis of variance of multivariate regression relationship between yield and independent variables

Model مدل	Sum of Squares مجموع مربعات	Df درجه آزادی	Mean Square مربع میانگین	F	Sig.
Regression رگرسیون	23385990180	7	3340855740	330.162	0.0001
Residual باقیمانده	1113073643	110	10118851.300		
Total مجموع	24499063820	117			

نشان می‌دهد که دارای ضریب تبیین حدود ۰/۹۵۵ و ضریب تبیین تعدیل شده ۰/۹۵ می‌باشد. مفهوم آن این است که متغیرهای وارد شده به مدل توانسته اند حدود ۹۵ درصد از واریانس تغییرات مربوط به متغیر وابسته را تعیین نمایند. ضریب تبیین تعدیل یافته از ضریب رگرسیون، حقیقی تر است زیرا کمتر تحت تأثیر حجم و تعداد نمونه

متغیرهای واکنش خاک، کربن آلی، رس و سیلت وارد معادله نشدند که نتیجه مذکور قابل انتظار می‌باشد. چراکه متغیرهای وارد شده در معادله چند متغیره دارای بیشترین همبستگی با عملکرد بودند. ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و عملکرد در جدول ۲ ارائه شده است. رابطه ۱، بهترین معادله رگرسیونی چندمتغیره را

در تحلیل رگرسیون، امکان بررسی تغییرات متغیر وابسته پیش‌بینی و سهم هر متغیر در تبیین متغیر وابسته مشخص می‌شود (۱۹). کاربرد اصلی رگرسیون ساده در این بررسی‌ها، درجه‌بندی خصوصیات اراضی با عملکرد می‌باشد. رابطه رگرسیون تک متغیره برای همه خصوصیات مورد بررسی با عملکرد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و همه معادلات ممکن مانند خطی، لگاریتمی، نمایی، درجه دوم، توانی و سایر معادلات، استخراج شدند. در نهایت معادله تک متغیره‌ای که دارای بیشترین مقدار ضریب همبستگی بود، انتخاب شد. بهترین معادلات به‌دست آمده برای هر یک از پارامترها، در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین نمونه‌ای از این روابط مربوط به عملکرد و ویژگی‌های خاک در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

قرار می‌گیرد (۸). نتایج تجزیه واریانس معادله چندمتغیره در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه ارزش P value کمتر از ۰/۰۱ است، بنابراین با اطمینان ۹۹ درصد می‌توان گفت که رابطه مذکور دارای معنی‌داری است و تجزیه واریانس و ایجاد معادله با دقت قابل قبول انجام شده است. همچنین مقدار میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده^۱ ۰/۱۲۳ می‌باشد که دلالت بر دقت زیاد رابطه رگرسیون استخراج شده می‌باشد.

$$Y=418.3EC-372.5ESP-2.86CaCO_3+1751.8Gypsum+97.5K+229.6P-614.4Gravel+8081.6 \quad (1)$$

تحلیل رگرسیون ساده

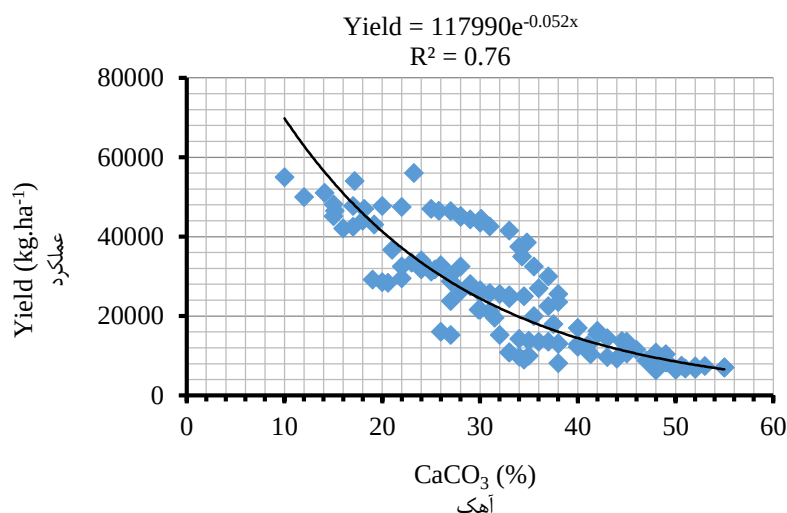
جدول ۴- معادلات استخراج شده با بیشترین ضریب تبیین بین ویژگی‌های خاک و زمین و عملکرد

Table 4- The extracted equations with the highest coefficient of determination between soil and land properties and yield

Independent variable متغیر مستقل	Equation type نوع معادله	(R ²) ضریب تبیین	Equation معادله	Significance level سطح معنی‌داری
آهک CaCO ₃	نمایی Exponential	0.76	Yield = 117990e ^{-0.052x}	0.0001
گچ Gypsum	نمایی Exponential	0.77	Yield = 45930x ^{-0.793}	0.0001
کربن آلی OC	توانی Power	0.05	Yield = 22046x ^{0.1602}	0.014
اسیدیته خاک pH	درجه دوم Quadratic	0.19	Yield = -15181x ² + 227070x - 820069	0.0001
شوری خاک EC	درجه سوم Cubic	0.85	Yield = -34.175x ³ + 1054.5x ² - 11990x + 59279	0.0001
قلیائیت ESP	درجه سوم Cubic	0.78	Yield = -6.0253x ³ + 357.76x ² - 7453.2x + 65221	0.0001
پتاسیم K. ava.	درجه سوم Cubic	0.96	Yield = -0.0077x ³ + 5.8724x ² - 1171.8x + 75985	0.0001
فسفر P ava.	توانی Power	0.84	Yield = 396.64x ^{1.3278}	0.0001
شن Sand	درجه سوم Cubic	0.64	Yield = -0.038x ³ - 13.794x ² + 1882.7x - 19523	0.0001
رس Clay	درجه سوم Cubic	0.62	Yield = -0.7214x ³ + 4.7959x ² + 1792.3x - 799.39	0.0001
سیلت Silt	درجه سوم Cubic	0.40	Yield = 0.6736x ³ - 129.15x ² + 3956x + 554.45	0.0001
سنگریزه Gravel	درجه سوم Cubic	0.96	Yield = 0.236x ³ - 6.3781x ² - 1128.4x + 49461	0.0001

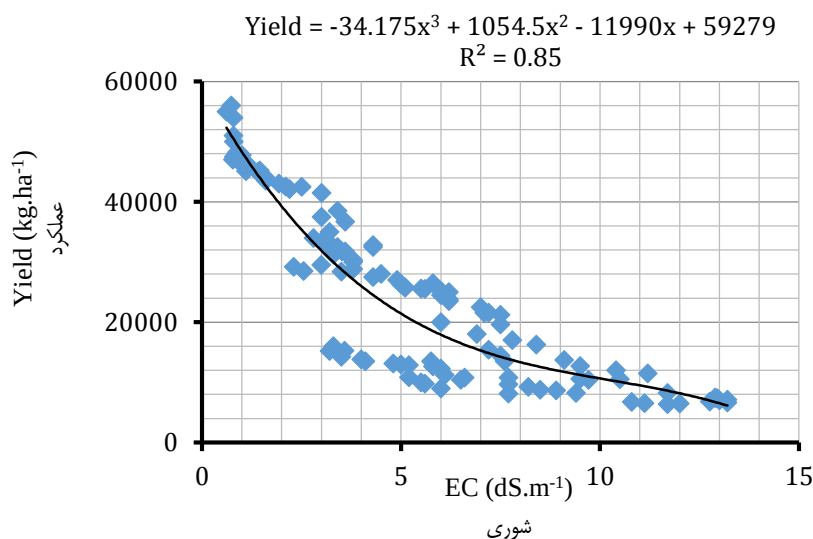
*در معادلات فوق x متغیر مستقل و Yield عملکرد پرتقال می‌باشد.

*In above equations, x is the independent variable and Yield is the yield of citrus.



شکل ۱- معادله نمایی بین مقدار عملکرد پرتقال و آهک خاک

Figure 1-Exponential equation between citrus yield and soil lime



شکل ۲- معادله درجه سه بین مقدار عملکرد پرتقال و شوری خاک

Figure 2- Cubic equation between citrus yield and soil EC

حدود مجاز و بحرانی هر ویژگی خاک

با توجه به بررسی‌های آماری (رگرسیون چند متغیره و ساده) از جداول درجه‌بندی خصوصیات اراضی روابط رگرسیون و منحنی‌های عملکرد-متغیر، حدود مجاز^۱ و بحرانی^۲ برای ویژگی‌های مهم و موثر خاک بر رشد و عملکرد سر به سر^۳ پرتقال به شرح جدول ۶ پیشنهاد می‌گردد.

پس از استخراج معادلات تک متغیره و انتخاب مناسب‌ترین آن‌ها برای هر متغیر، جدول نیازمندی‌های خصوصیات خاک برای پرتقال در مناطق مورد مطالعه استخراج گردید که می‌تواند در محاسبات ارزیابی تناسب اراضی برای کشت این محصول مورد استفاده قرار گیرد. این جدول که بر پایه درجه‌بندی خصوصیات از ۱۰۰ تا صفر تهیه شده در جدول ۵ ارائه شده است.

- 1- Threshold limit
- 2- Critical level
- 3- Break even production

جدول ۵- نیازهای خاکی و زمین نما برای پرتقال
Table 5- Soil and land requirements for citrus (orange)

Table 5 - Soil and Land Requirements for Crops (Rating)							
Class, degree of limitation and rating scale							
کلاس، درجه محدودیت و دامنه درجه‌بندی							
Characteristics	S1		S2		S3	N1	N2
خصوصیات	0	1	2		3	4	
	100	95	85	60	40	25	0
Topography (t)							
توپوگرافی							
Slope (%)	0 - 3	3 - 5	5 - 9		9 - 15	15 - 18	> 18
شیب							
Wetness (w)							
خیسی							
Flooding	F0		F1		F2	F3	F4
سیل‌گیری							
Drainage	Well, Good	-	Moderate		Imperfect, Poor and Aeric	Poor but Drainable	Poor not Drainable, Very Poor
زهکشی							
Physical soil Characteristics (s)							
خصوصیات فیزیکی خاک							
*Texture / Structure	L, SiL, SL, SiCL	CL, Si, LfS	SCL, LS, SC, fS, SiCs		S, Co, C-60s	SiCm, C-60v, C+60s	Cm, C+60v
بافت/ساختمان							
Coarse Fragment (%)	0 - 5	5 - 15	15 - 35		35 - 55	55 - 65	> 65
ذران درشت							
Soil Depth (cm)	>150	150 - 110	110 - 90		90 - 70		< 70
عمق خاک							
CaCO ₃ (%)	0 - 5	5 - 20	20 - 35		35 - 50	50 - 55	> 55
آهک							
Gypsum (%)	0 - 2	2 - 5	5 - 8		8 - 12	> 12	
گچ							
Soil fertility characteristics (f)							
خصوصیات حاصلخیزی خاک							
pH (H ₂ O)	6.5 - 7.2	7.2 - 7.8	7.8 - 8.3		8.3 - 8.5	-	> 8.5
واکنش خاک	6.5 - 5.8	5.8 - 5.5	5.5 - 5.2		5.2 - 5	< 5	-
Organic Carbon (%)	>1.5	1.5-1	1-0.6		<0.6		
کربن آلی							
Salinity & Alkalinity (n)							
شوری و قلیائیت							
EC (dS.m ⁻¹)	0 - 1.7	1.7 - 2.6	2.6 - 4.5		4.5 - 6.5	6.5 - 8	> 8
شوری							
ESP (%)	0 - 3.6	3.6 - 5.2	5.2 - 8.5		8.5 - 12.5	12.5 - 16	> 16
درصد سدیم تبادلی							

*Cm: massive clay رس با ساختمان فشرده

SiCm: massive silty clay رس سیلتی با ساختمان فشرده

C+60v: very fine clay, vertisol structure رس خیلی ریز، ساختمان ورتی‌سول‌ها

C+60s: very fine clay, blocky structure رس خیلی ریز، ساختمان مکعبی

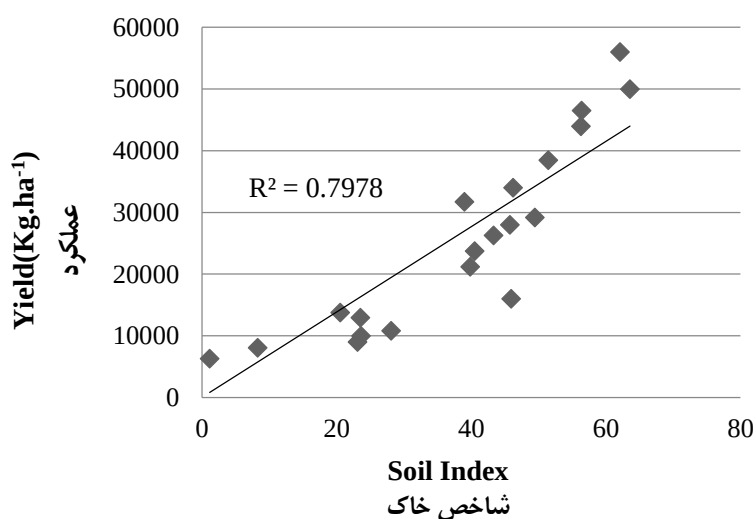
C-60v: clay, vertisol structure رس، ساختمان ورتی‌سول‌ها

C-60s: clay, blocky structure رس، ساختمان مکعبی

جدول ۶- حدود مجاز یا بحرانی برخی پارامترهای خاک برای پرتقال

Table 6- Permissible or critical limits of some soil parameters for citrus

Soil and land properties خصوصیات اراضی	Unit واحد	Permissible threshold / critical limit آستانه مجاز / حد بحرانی	Critical production تولید بحرانی (عملکرد سر به سر)
شوری خاک EC	dS.m ⁻¹	حد مجاز: 2.4 Permissible threshold: 2.4	8
قلیائیت ESP	-	حد مجاز: 5 Permissible threshold: 5.0	12
گچ Gypsum	%	حد مجاز: 1.5 Permissible threshold: 1.5	9
آهک CaCO ₃	%	حد مجاز: 20 Permissible threshold: 20	40
عمق خاک Soil depth	cm	حد بحرانی: 110 Critical limit: 110	70
فسفر قابل دسترس P _{ava.}	mg.kg ⁻¹	حد بحرانی: 22 Critical limit: 22	-
پتاسیم قابل جذب K _{ava.}	mg.kg ⁻¹	حد بحرانی: 280 Critical limit: 280	-
عمق آب زیرزمینی Groundwater depth	m	2>	-



شکل ۳- رابطه میان شاخص خاک و مقدار عملکرد ۲۰ باغ پرتقال (مجموعه اعتبارسنجی)

Figure 3- Relationship between soil index and yield of 20 orange orchards (validation set)

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد خصوصیات اراضی اصلی محدودکننده تولید پرتقال در کشور، شور و سدیمی بودن خاک، آهک و گچ زیاد، خصوصیات فیزیکی نامناسب خاک و ویژگی‌های حاصلخیزی خاک است. از بین این ویژگی‌ها، شور و سدیمی بودن خاک، عامل اصلی و موثر در کنترل کاهش عملکرد است. لذا معرفی ارقام سازگار با این شرایط خاک بسیار ضروری بوده و اعمال مدیریت مناسب در این

صحت‌سنجی نتایج

نتایج صحت‌سنجی جدول نیازهای رویشی خاک و اراضی مستخرج از نتایج این پژوهش در شکل ۳ آمده است. رابطه رگرسیونی خطی بین عملکرد و شاخص خاک مقدار ضریب تبیین ۰/۷۹ را نشان می‌دهد که به مفهوم قابل اعتماد بودن درجه‌بندی خصوصیات اراضی و جدول تهیه شده در این پژوهش می‌باشد.

تبادلی، گچ، کربن آلی، فسفر و پتاسیم می‌باشند.

با توجه به اینکه جدول نیازهای رویشی پیشنهادی بر مبنای خصوصیات اراضی مناطق تحت کشت پرتقال کشور تهیه و صحت سنجی شده است، بنابراین دقت لازم برای انجام مطالعات تناسب اراضی را دارد. این مطالعات برای انواع پرتقال و به ویژه ارقام کشت شده در مناطق شمال و جنوب، ضروری است. همچنین با توجه به محدودیت منابع تولید در اکثر مناطق تحت کشت پرتقال کشور، شناسایی باغ‌ها با عملکرد غیر اقتصادی، حذف یا تغییر کشت آن‌ها، لازم و ضروری می‌باشد.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های موسسه تحقیقات خاک و آب برای به انجام رسیدن پروژه تحقیقاتی با شماره مصوب ۹۵۰۵-۹۴۵۲-۱۰-۱۴، که این مقاله از آن استخراج شده است، صمیمانه تشکر می‌نمایند.

خصوص و انجام عملیات اصلاحی و آبشویی برای اصلاح خاک‌ها با مقادیر نمک و سدیم بالا بسیار ضروری می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه مقدار آهک خاک در برخی مناطق تحت کشت پرتقال مانند استان‌های فارس و کرمان، بیش از حد مجاز برای پرتقال است، مدیریت تغذیه گیاهی و حاصلخیزی خاک برای خاک‌های آهکی در این استان‌ها باید مدنظر قرار گیرد. افزون‌بر این در مناطق مورد مطالعه، میانگین فسفر و پتاسیم قابل دسترس خاک کمتر از حد بحرانی برای پرتقال بود که باید در برنامه مدیریتی تغذیه و حاصلخیزی باغات مدنظر قرار گیرد. بر پایه نتایج، محدودیت‌های عمده اراضی تحت کشت پرتقال در برخی باغ‌های استان مازندران، خصوصیات فیزیکی خاک (بافت خاک)، در استان گیلان، بافت خاک و مقادیر پتاسیم و فسفر، در استان فارس، آهک، گچ، شوری و درصد سدیم تبادلی و ویژگی‌های حاصلخیزی (کربن آلی و فسفر)، در جنوب کرمان شوری و درصد سدیم تبادلی، مقدار آهک، گچ و کربن آلی و خصوصیات فیزیکی خاک و در کرمان نیز شوری و درصد سدیم

منابع

- Asadi Kangarshahi A., Akhlaghi Amiri N., and Samar M. 2015. Possibility of Using Chlorosis Degree and Active Iron (Fe²⁺) to Assess the Tolerance of Some Citrus Rootstocks to Calcareous Soils. Iranian Journal of Soil Research 29(3): 296-284. (In Persian with English abstract)
- Asadi Kangarshahi A., and Akhlaqi Amiri N. 2013. branch wilt, citrus deterioration and some environmental damage of citrus in East Mazandaran. Extension Technical Journal No. 01/217/92, Mazandaran Agricultural Jihad Organization.
- Castle W.S., and Nunnallee J. 2009. Screening citrus rootstocks and related selections in soil and solution culture for tolerance to low-iron stress. HortScience 44: 638-645.
- De Leão M.G., Marques Júnior J., Souza Z.M.D., Siqueira D.S., and Pereira G.T. 2011. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. Engenharia Agrícola 31(4): 643-651.
- Duan H., Qian H., and Du Y. 2010. Assessing the climate risk to citrus in subtropics of China. Acta Geographica Sinica 65(3): 301-312.
- FAO. 1976. A Framework for Land Evaluation. FAO Soils Bulletin No. 32. Rome.
- FAO. 2018. Statistics Division (FAOSTAT).
- Ghiasvand A. 2016. Application of statistics and SPSS software in data analysis. 4th Ed. Motefakkeran Publications. (In Persian)
- Golein B., Rabiei V., Mirabbasi F., Fifaei R., and Halaji Sani M.F. 2016. Effect of Salinity Stress on Physiological and Biochemical Traits in Citrus Genotypes. Journal of Horticultural Science (Agricultural Science and Technology) 29(3): 416-425. (In Persian with English abstract)
- Homaee M. 2001. Plants response to salinity. Publications of the National Irrigation and Drainage Committee of Iran. (In Persian)
- Kosegarten H., Hoffman B., Rroco E., Grolig F., Gluesenkamp K., and Mengel K. 2004. Apoplastic pH and Fe^{III} reduction in young sunflower (*Helianthus annuus*) roots. Physiologia Plantarum 122: 95-106.
- Mann K.K., Schumann A.W., and Obreza T.A. 2011. Delineating productivity zones in a citrus grove using citrus production, tree growth and temporally stable soil data. Precision Agriculture 12(4): 457-472.
- Mann K.K., Schumann A.W., Obreza T.A., Harris W.G., and Shukla S. 2010. Spatial variability of soil physical properties affecting Florida citrus production. Soil Science 175(10): 487-499.
- Ministry of Jihad Agriculture, Information and Communication Technology Center. 2018. Agricultural Statistics of 1396, Volume 3: Horticultural Products. (In Persian)
- Mohammadi J. 2006. Pedometry: Classical Statistics. Volume One, Pelk Publications, Tehran. (In Persian)
- Nawaz R., Abbasi N.A., Hafiz I.A., and Khalid A. 2020. Impact of climate variables on growth and development of Kinnow fruit (*Citrus nobilis* Lour x *Citrus deliciosa* Tenora) grown at different ecological zones under climate change scenario. Scientia Horticulturae 260, 108868.

17. Romheld V. 2000. The chlorosis paradox: Fe inactivation as a secondary event in chlorotic leaves of grape vine. *Journal of Plant Nutrition* 13: 1629-1643.
18. Schumann A.W. 2006. Nutrient management zones for citrus based on variation in soil properties and tree performance. *Precision Agriculture* 7(1): 45-63.
19. Soltani A.R. 2001. Probability and Statistics for Science and engineering. 2nd ed. Shiraz University Press. (In Persian)
20. Sys C., Van Ranst E., and Debaveye I.J. 1991. Land evaluation. Part I: principles in land evaluation and crop production calculations. General Administration for Development Cooperation, Agricultural Publication-No. 7, Brussels, Belgium, p 274.
21. Sys C., Van Ranst E., Debaveye I.J., and Beernaert F. 1993. Land evaluation. Part III: crop requirements. General Administration for Development Cooperation, Agricultural Publication-No. 7, Brussels, Belgium, p 199.
22. Tehrani M.M., Pasandideh M., and Davoodi M.H. 2011. Determining the distribution and recommendation of trace elements in irrigated lands of Gilan, Mazandaran, Hamedan, Kermanshah, West Azerbaijan and Isfahan provinces. Ministry of Jihad Agriculture, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Soil and Water Research Institute. Report No. 1618.
23. USDA. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 3, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
24. USDA. 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
25. Zeinodini A. 2001. Qualitative and quantitative land evaluation studies for selected agricultural and horticultural crops in Bam region. Report No.8446, Soil and Water Research Institute.Tehran Iran.
26. Zeinodini A. 2011. Qualitative land suitability for important crops in Bafq plain, Kahnooj area. Report No.39208, Soil and Water Research Institute.
27. Zeinodini A., Toomanian N., Navidi M.N., Farajnia A., and Seyed Jalali A.R. 2019. Horticultural crops requirements. Soil and Water Research Institute. (In Persian)
28. Zeinodini A., and Ebrahimi F. 2014. Land quality studies of important agricultural and horticultural crops in Shahdad region, Kerman province. Proceedings of the First National Conference on Sustainable Management of Soil and Environmental Resources, Kerman, Iran.



Effect of Soil Characteristics on Yield and Preparing the Crop Requirements Table of Oranges in Selected Areas of Iran

A. Zeinadini^{1*} - M.N. Navidi² - A. Asadi Kangarshahi³ - M. Eskandar⁴ - S.A. Seyed Jalali⁵ - A. Salmanpour⁶ - J. Seyedmohammadi⁷ - M. Ghasemi⁸ - S.A. Ghaffarinejad⁹ - Gh. Zareian¹⁰

Received: 25-01-2021

Accepted: 06-05-2021

Introduction: Iran is one of the most important countries in citrus (oranges) production. Citrus fruits are grown in different soils with a wide range of physical, chemical and fertility properties in the country, although some restrictions in the cultivated lands cause yield loss. In this regard, the present study was conducted to investigate the effect of physical, chemical and soil fertility characteristics on citrus yield in important areas under cultivation, the regression relationships of characteristics with yield, and the rating of soil and land parameters.

Materials and Methods: The 138 oranges orchards (118 orchards for rating and 20 orchards for validation) were selected in Fars, Mazandaran, Kerman and Guilan provinces. In each garden, a questionnaire was completed, a soil pedon was studied and soil samples were taken to carry out the appropriate physicochemical analyses. The selected soil and land characteristics were soil salinity (EC), exchangeable sodium percentage (ESP), pH, gypsum content, soil calcium carbonate (TNV), organic carbon (OC), clay, sand, silt, gravel, and soil available phosphorus and potassium contents. From the whole obtained data, 20 data were considered for validation purpose and the remaining data were used for modeling based on stepwise multivariate and simple regression methods. In these equations, the relationship between yield, as dependent variable, with soil and land characteristics, as independent variables, was investigated. Finally, land characteristics rating was obtained by the FAO method and the proposed crop requirements table was evaluated using the validation dataset.

Results and Discussion: The results of descriptive statistics analysis showed that the variance values for available potassium, sand, clay, gravel and TNV were high and for pH and OC and gypsum were negligible. Therefore, most soil properties have a wide range of variation which could be related to the fact that oranges are grown in a wide range of soil types. The value of TNV varied between 10 and 33.3%. The presence of carbonate in soil reduces the availability of macro- and micronutrient elements in direct and indirect manners. The average of EC in the studied orchards was 5.4 dS.m⁻¹. Minimum, maximum and average of ESP were 1.7, 28 and 10.7, respectively. The lowest and highest salinity and sodicity were observed in Mazandaran and Kerman soils, respectively. Maximum, minimum and average percentage of gypsum were 12, 0.36 and 3.54%, respectively. The highest amount of gypsum was observed in Bam and Shahdad regions of Kerman province and the lowest gypsum content was observed in Mazandaran and Guilan provinces. The soil pH varied from 6.63 to 8.8 with the average of 7.8. The soil OC values were between 0.05 and 3.53% and its average was 0.89%, showing the fact that the most studied soils were poor in organic matters. The average of soil available phosphorus and potassium in the studied orchards for citrus was less than the critical level. The average, minimum and maximum of available potassium were 224, 100 and 360 mg.kg⁻¹, respectively. The mean, minimum and maximum amounts of available phosphorus were 21.6, 8 and 45.9 mg.kg⁻¹, respectively. According to the multivariate regression model, among soil properties, EC, ESP, TNV, gypsum, gravel, available phosphorus and potassium were selected by the model. The determination coefficient of the model was 0.95, indicating that these properties have the greatest effect on citrus yield. Simple regression equations demonstrated that TNV, gypsum, EC, ESP, sand, clay, gravel, available

1, 2, 4, 5, 7 and 9- Assistant Professors, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

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

3- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Mazandaran Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran

6- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorram Abad, Iran

8- Assistant Professor, Genetic and Breeding Department, Citrus and Subtropical fruit research center, Horticulture Research Institute, Agricultural Research, Education & Extension Organization (AREEO), Ramsar, Iran

10- Assistant Professor, Fars Agricultural and Natural Resources, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Zarghan, Iran

DOI: 10.22067/jsw.2021.68421.1017

potassium and phosphorous had the highest correlation ($R^2 > 0.6$); and soil OC and pH had the lowest correlation ($R^2 < 0.2$) with yield. The equations also revealed that soil EC, ESP, gypsum, TNV and gravel percentage had the greatest effect in yield loss, and soil organic carbon, absorbed phosphorus and potassium had the greatest effect on increasing citrus yield. As stated in equations, reported permissible and critical thresholds for effective soil properties on citrus yield, were 2.4 dS.m^{-1} for EC, 5 for ESP, 1.5% for gypsum, 20% for TNV, 22 mg.kg^{-1} for available phosphorus, 280 mg.kg^{-1} for available potassium, 110 cm for soil depth, and $>2 \text{ m}$ for groundwater level. Finally, evaluating the proposed crop requirements table with validation dataset fitted between citrus yield and soil index, resulted in the determination coefficient value of 0.79, denoting the acceptable accuracy of proposed table.

Conclusion: Overall results showed that the main land limiting characteristics for orange production were soil salinity and sodicity, high amount of soil calcium carbonate and gypsum. Among unsuitable physical and fertility properties of soil, salinity and sodicity are the most effective factors affecting yield reduction. Consequently, proper management practices such as introducing cultivars compatible with these soil conditions, soil remediation and leaching operations to reduce soil salinity and sodicity are necessary. Furthermore, in most areas under orange cultivation such as Fars and Kerman provinces, the soil calcium carbonate content is more than the critical level for plant growth. In addition, the averages of soil available phosphorus and potassium were less than the critical levels, which should be considered for nutrient management of orchards. The proposed table of crop requirements seems to be accurate enough to conduct land suitability studies for orange varieties, especially cultivars grown in the north and south of the country.

Keywords: Crop requirement, Cropping pattern, Citrus, Land suitability



مقاله پژوهشی

تأثیر شکست سری زمانی داده‌های بارش بر تغییرات مشخصه‌های خشکسالی (مطالعه موردی شهرهای تبریز و اراک)

منصوره غزنوی^۱ - ابوالفضل مساعدی^{۲*} - محمد قبائی سوق^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

چکیده

خشکسالی یک مخاطره اقلیمی است که در همه‌ی مناطق آب و هوایی رخ می‌دهد. متغیرهای مختلف هواشناسی از جمله بارندگی، دما و رطوبت نسبی نقش مهمی در وقوع، شدت و تداوم خشکسالی دارند. تغییر اقلیم و گرمایش جهانی می‌تواند سبب بروز ناهمگنی و ایجاد شکست در داده‌های سری زمانی متغیرهای هواشناسی شود. این ناهمگنی می‌تواند سبب تغییراتی در مشخصه‌های خشکسالی شود. هدف اصلی این پژوهش بررسی همگنی سری زمانی بارش به‌عنوان مهم‌ترین متغیر موثر بر خشکسالی هواشناسی، در تعدادی ایستگاه سینوپتیک در طول دوره آماری ۱۹۵۷ الی ۲۰۱۶ در مناطق مختلف کشور و بررسی تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در دوره‌های قبل و بعد از نقطه شکست می‌باشد. پس از بررسی سری‌های زمانی مقادیر بارش سالانه مشخص گردید که فقط ایستگاه‌های تبریز و اراک دارای نقطه شکست می‌باشند. از این رو در ادامه، وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص‌های RDI، SPEI، SPI و eRDI در ایستگاه‌های مذکور در دو دوره‌ی قبل و بعد از نقطه شکست پایش و مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای مدل زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال و همچنین ویژگی‌های دوره‌های خشکسالی بر مبنای تئوری ران تعیین گردید. نتایج حاکی از کمتر شدن اطمینان‌پذیری و بیشتر شدن آسیب‌پذیری نسبت به خشکسالی در دوره دوم در مقایسه با دوره اول است. ضمن آن که، متوسط و حداکثر تداوم دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول بیشتر شده است. به‌طور خلاصه تمامی مشخصه‌های خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول دارای شدت، مدت و فراوانی بالاتری هستند. به‌طور کلی نتایج تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در دوره بعد از شکست نسبت به دوره قبل از آن می‌تواند ناشی از گرمایش جهانی و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق و ایجاد و یا تشدید اثرات خشکسالی باشد. ضمن آن که بر اساس نتایج حاصل از شاخص eRDI در هر دو ایستگاه و در هر دو مقیاس زمانی، شرایط رطوبتی نسبت به سایر شاخص‌ها کمی خشک‌تر شده است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که تا حدودی بارش موثر در سال‌های اخیر نسبت به سال‌های اولیه دوره مورد بررسی کاهش یافته است. پیشنهاد می‌شود مشابه با این پژوهش در مورد همه ایستگاه‌های سینوپتیک کشور که دارای دوره آماری طولانی می‌باشند، انجام شده تا اثر گرمایش جهانی و در نتیجه تغییرات بارش و دما بر وقوع خشکسالی نمایان تر شود.

واژه‌های کلیدی: تئوری ران، شاخص eRDI، ماتریس احتمال انتقال، ماندگاری، نقطه شکست

مقدمه

خشکسالی یک پدیده آب و هوایی و بخش جدایی ناپذیر نوسانات

اقلیمی است که به متناوب در سراسر جهان و در همه‌ی مناطق آب و هوایی رخ می‌دهد، اما ابعاد این مخاطره طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند اکثر مناطق ایران به دلیل حساسیت و شکنندگی زیاد این مناطق، حادث‌تر بوده و اثرات آن ممکن است سال‌ها بعد از خشکسالی نیز تداوم داشته باشد. خشکسالی به عنوان دوره‌ای که در آن بارش نسبت به شرایط نرمال منطقه کاهش یافته است، تعریف می‌شود. پایش خشکسالی می‌تواند به دو صورت توصیفی و کمی صورت گیرد که امروزه عمدتاً از روش‌های کمی در بررسی خشکسالی استفاده می‌شود. تاکنون شاخص‌های متعددی برای تعیین شدت

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست،

دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد
(Email: mosaeedi@um.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

۳- دکتری علوم و مهندسی آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، تهران

DOI: 10.22067/jsw.2021.14899.0

دمای کره زمین به این نتیجه رسیدند که از ابتدای دوره آماری ۱۸۸۰ تا سالیان اخیر نقاط شکست به دفعات مشاهده شده‌اند، ولی از دهه ۱۹۸۰ به بعد نقطه شکست معنی‌داری در مقایسه با دوره قبل رخ نداده است و زمین با نوسانات جزئی در حال گرمتر شدن است.

تغییر مشخصه‌های خشکسالی در دوره‌های زمانی مختلف نیز قابل بررسی می‌باشد. به گونه‌ای که مقیمی و همکاران (۲۲) در پژوهشی با هدف پایش و پیش بینی خشکسالی در استان فارس با استفاده از شاخص RDI و مدل ریاضی زنجیره مارکف به این نتیجه رسیدند که احتمال تعادل وضعیت رطوبتی دوره نرمال چه در بخش مشاهده شده و چه در بخش پیش بینی، بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده است. هم‌چنین درصد فراوانی وقوع کلاس‌های پیش‌بینی شده خشک نسبت به کلاس‌های مرطوب بیش‌تر است. با توجه به کاربرد فراوان شاخص RDI، تیگاس و همکاران (۳۲) شاخص اصلاح شده (eRDI) را به منظور بهبود قابلیت ارزیابی این شاخص در خشکسالی‌ها به‌خصوص خشکسالی‌های کشاورزی پیشنهاد دادند. به عبارت دیگر پیشنهاد دادند که بهتر است بارش مؤثر با مجموع بارش جایگزین شده و مقیاس‌های زمانی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. بارش مؤثر با توجه به اهداف مورد نظر، متفاوت می‌باشد و در این پژوهش با توجه به تأکید بر خشکسالی کشاورزی، منظور مقدار آبی است که می‌تواند موجب افزایش رطوبت خاک شده و مورد استفاده محصولات کشاورزی قرار گیرد. مساعدی و همکاران (۲۳) به بررسی ویژگی‌های خشکسالی براساس شاخص RDI و تغییرات احتمالی آن‌ها در محدوده هشت ایستگاه سینوپتیک کشور پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده سری زمانی مقادیر شاخص خشکسالی در همه ایستگاه‌ها در سطح ۹۵٪ دارای شکست می‌باشد که نشان دهنده ناهمگنی و تغییر شرایط کلی خشکسالی می‌باشد. ایشان بیان می‌نمایند که علت اصلی این موضوع در ارتباط با مشکل گرمایش جهانی و تغییر اقلیم می‌باشد. زارعی و همکاران (۳۷) در پژوهشی از داده‌های هواشناسی ۲۲ ایستگاه سینوپتیک کشور با شرایط مختلف آب و هوایی در سال‌های ۱۳۶۷ تا ۱۳۷۷ برای محاسبه شاخص‌های RDI و eRDI استفاده نمودند. با توجه به نتایج بدست آمده، مقایسه مقادیر RDI و eRDI در ایستگاه‌هایی با شرایط مرطوب مانند رامسر و بندر انزلی، اختلاف بین شاخص‌های RDI و eRDI در سطح ۵ درصد معنی‌دار نبود، اما در ایستگاه‌هایی با شرایط خشک و فراخشک مانند چابهار، بندر لنگه، یزد و زابل، تفاوت بین RDI و eRDI در سطح ۵ درصد معنی‌دار بوده‌است.

قربانی و همکاران (۱۲) به‌منظور بررسی وضعیت روند تغییرات شدت خشکسالی هواشناسی در پهنه جغرافیایی ایران، از داده‌های شبکه جهانی SPEI طی دوره آماری ۳۰ ساله استفاده نمودند و آزمون‌های تشخیص روند و شیب خط روند بر روی سری‌های فصلی آن‌ها اجرا و نتایج آن‌ها را در محیط GIS پهنه‌بندی نمودند. نتیجه

خشکسالی ارائه شده است. این شاخص‌ها که از متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی مشتق شده‌اند، می‌توانند در شناخت پدیده‌ی خشکسالی مؤثر باشند. به‌طور کلی کارکردهای مورد انتظار از یک شاخص پایش خشکسالی شامل تعیین زمان شروع و پایان خشکسالی، تعیین شدت و نوع خشکسالی و تعیین گستره‌ی مکانی تحت تأثیر این پدیده می‌باشند.

شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI)، شاخص بارش - تبخیر - تعرق استاندارد شده^۲ (SPEI)، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)^۳ و شاخص شناسایی مؤثر خشکسالی^۴ (eRDI)، با توجه به شرایط هر منطقه شاخص‌هایی مناسب و کارا جهت پایش خشکسالی هواشناسی به شمار می‌روند (۹، ۱۶، ۳۱، ۳۷، ۱۹، ۲۶، ۱ و ۳۲). خشکسالی یک پدیده‌ی چندمتغیره می‌باشد و بازندگی، دما، تبخیر، باد و رطوبت نسبی نقش مهمی در وقوع، شدت و تداوم آن دارند. هم‌چنین نوسانات هر یک از متغیرهای جوی و اقلیمی می‌توانند سبب افزایش یا کاهش شدت یا سایر خصوصیات این پدیده گردد. بارش و تبخیر - تعرق، دو متغیر مهم و ضروری برای پایش خشکسالی‌های هواشناسی می‌باشند. مسائلی چون تغییر اقلیم، گرمایش جهانی و در برخی موارد جابجایی ایستگاه‌های هواشناسی، سبب بروز ناهمگنی در داده‌های سری زمانی متغیرهای هواشناسی شده است. بازگیر و همکاران (۵) در پژوهشی با بررسی همگنی سری‌های زمانی میانگین سالانه‌ی دمای کمینه، بیشینه و بارش ۳۶ ایستگاه همدید کشور، نشان دادند که در ایستگاه‌های غرب و شمال غرب کشور، مانند تبریز، سنندج، سقز و کرمانشاه ناهمگنی اقلیمی در داده‌های بارش اتفاق افتاده و کاهش ۸۰ تا ۱۵۰ میلی‌متری بارش رخ داده است. هم‌چنین صالح‌پورجم و همکاران (۲۹) نیز نشان دادند که در ایستگاه‌های منتخب سینوپتیک شمال غربی کشور با کاربرد آزمون روند من - کندال، بارش متوسط سالانه کلیه ایستگاه‌ها در دوره دوم (۲۰۱۴-۱۹۹۶) نسبت به دوره مبنا (۱۹۹۵-۱۹۷۷) کاهش یافته است. قربانی و همکاران (۱۳) با بررسی سری‌های شاخص خشکسالی SPEI در طول سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۴۸ و در گستره ایران نشان دادند که در فصل‌های بهار، تابستان، پاییز و زمستان به ترتیب ۱۱، ۳۱، ۸ و ۱۵ درصد از نقاط ایستگاهی مورد بررسی، دارای نقطه‌ی تغییر معنی‌دار شکست بوده‌اند، ضمن آنکه در بیشتر مواقعی که شاخص خشکسالی دارای نقطه‌ی تغییر است آزمون من کندال نیز روند در سری داده‌ها را نشان می‌دهد. دوان و همکاران (۸) در پژوهشی تحت عنوان تشخیص نقاط شکست در

- 1- Standardized Precipitation Index (SPI)
- 2- Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)
- 3- Reconnaissance Drought Index (RDI)
- 4- Reconnaissance Drought Index Effective (eRDI)

ایشان نشان داد که از سال ۲۰۰۳ تاکنون تغییرات زیادی در روند وضعیت رطوبتی در این منطقه وجود داشته است. کوارینگ و همکاران، (۱۶) با توجه به ارزیابی مؤثر و کارآمد خشکسالی به وسیله شاخص RDI در منطقه‌ای در اقلیم نیمه‌خشک در هند و حساس بودن این شاخص به تغییرات اقلیمی دهه‌های اخیر به علت در نظر گرفتن نقش دما، این شاخص را به عنوان یک شاخص کارآمد معرفی کرده‌اند. لین و همکاران (۱۸) بیان می‌نمایند که تبخیر - تعرق پتانسیل به دلیل افزایش دما در حال افزایش است و این موضوع از عوامل اصلی تأثیرگذار در خشکسالی در آینده است. از این رو، پیشنهاد می‌نمایند که تأثیر تبخیر - تعرق پتانسیل نباید در تجزیه و تحلیل خشکسالی نادیده گرفته شود.

از آن‌جا که در شاخص SPEI در مقایسه با شاخص SPI پارامترهای اقلیمی بیش‌تری علاوه بر بارندگی برای ارزیابی خشکسالی لحاظ می‌شود و با توجه به افزایش روند دما در دوره حال و آینده می‌توان گفت که نتایج شاخص SPEI، واقعی‌تر و منطقی‌تر از نتایج شاخص SPI است (۲۸). بذرافشان و همکاران (۶) با مقایسه دو شاخص SPI و SPEI در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در سواحل خلیج فارس و دریای عمان نشان دادند که روند خشکسالی در منطقه مورد مطالعه فزاینده است و با افزایش مقیاس زمانی شیب روند شاخص SPEI نسبت به SPI بیش‌تر است. بیکاتندا و همکاران (۷) به منظور ارزیابی خشکسالی و روند شدت آن از دو شاخص SPI و SPEI و آماره من-کندال و برآورد شیب سن استفاده نمودند و نشان دادند که با توجه به گرمایش جهانی، شاخص SPEI در ارزیابی خشکسالی در نواحی خشک و نیمه خشک مناسب‌تر می‌باشد. لیو و همکاران (۱۷) در پژوهشی در چین بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI، روند شدت خشکسالی را در مقیاس ۱۲ ماهه از طریق آزمون من-کندال تعیین نموده و برای کل منطقه مورد بررسی تمیم دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد افزایش روند شدت خشکسالی براساس شاخص SPEI ضعیف‌تر از شاخص SPI بود. هم‌چنین رفتار زمانی فراوانی خشکسالی از ژانویه تا دسامبر در مقیاس‌های زمانی و شدت‌های مختلف، متفاوت بود. ویسنته سرانو و همکاران (۳۵) در مطالعه‌ای اثرات فرآیند گرم‌شدن زمین بر خشکسالی‌ها و منابع آب در اسپانیا را با استفاده از دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI، بررسی نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل در دوره زمانی ۱۹۳۰ تا ۲۰۰۶ افزایش یافته و عملکرد دو شاخص مذکور در ارزیابی خشکسالی‌های منطقه مشابه بوده است. پی و همکاران (۲۷) با بررسی تحلیل تطبیقی خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های مختلف زمانی در مغولستان داخلی (چین) به این نتیجه رسیدند که بین نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف اختلاف وجود دارد، ولی هر چه مقیاس زمانی دوره پایش خشکسالی

کلی بررسی شاخص خشکسالی SPEI نشان داد که در مجموع تغییرات اقلیمی در ایران رخ داده است و ایران در سال‌های اخیر به سمت دوره‌های خشک‌تر متمایل بوده است. مجیدی و همکاران (۲۰) در پژوهشی روند خصوصیات خشکسالی‌های استان همدان را با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و شیب خط روند با روش ناپارامتری برآوردگر سن محاسبه نمودند. نتایج ایشان نشان داد که در اکثر ایستگاه‌ها مدت خشکسالی دارای روند نزولی غیر معنی‌دار بوده و شدت خشکسالی هم در بیش از نیمی از ایستگاه‌ها دارای روند غیر معنی‌دار کاهشی بود. ایشان اضافه می‌کنند که روند بارش ماهانه نیز در اکثر ایستگاه‌ها به جز یکی از ایستگاه‌ها دارای روند غیرمعنی‌دار افزایشی بوده است. نوری و همکاران (۲۵) روند تغییرات شاخص SPI به‌وسیله آزمون ناپارامتری من-کندال در مناطق مرطوب و نیمه‌خشک ایران را بررسی و نشان دادند که روند بارش سالانه در تمامی ایستگاه‌ها طی ۳۹ سال اخیر کاهشی بوده است. هم‌چنین روند بارش بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه به‌ویژه در قسمت‌های نیمه خشک شمال شرقی و جنوب غربی ایران در اثر خشکسالی‌های شدید و طولانی دهه ۲۰۱۵-۲۰۰۵ تغییر کرده است. یان-ژان و همکاران (۳۶) با استفاده از داده‌های بارندگی چند ایستگاه در حوضه Huaihe در کشور چین، از شاخص SPI جهت آنالیز خشکسالی سالانه ۵۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۶۱) استفاده نمودند. نتایج این پژوهش حاکی از کاهش فراوانی خشکسالی در حوضه رودخانه و افزایش شدت خشکسالی در دهه‌های اخیر می‌باشد. از دیگر نتایج این مطالعه، تعیین فراوانی بیش‌تری از طبقات خشکسالی نسبتاً شدید و خشکسالی شدید در سال‌های اخیر می‌باشد.

بهلکه و همکاران (۴) به‌منظور بررسی پیامدهای تغییر اقلیم در دو ایستگاه با اقلیم متفاوت واقع در استان گلستان، اقدام به تجزیه و تحلیل شدت، تداوم و فراوانی ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها در دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) و آینده نمودند. نتایج ایشان نشان داد که در هر دو ایستگاه احتمال خشکسالی‌ها در آینده افزایش می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش پنجره زمانی بارش استاندارد، تداوم تمام طبقات افزایش پیدا خواهد کرد. از طرف دیگر با افزایش پنجره زمانی شاخص استاندارد شدت ترسالی‌ها و خشکسالی‌ها کاهش می‌یابد، این در حالی است که تداوم آن‌ها افزایش می‌یابد. اقتدارنژاد و همکاران (۹) به‌منظور تحلیل خشکسالی از شاخص SPEI در ۵۴ ایستگاه سینوپتیک برای دوره آماری ۶۴ ساله (۲۰۱۴-۱۹۵۱) استفاده نمودند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که روند شاخص SPEI طی دوره آماری مورد بررسی در بخش وسیعی از کشور افزایشی است، این در حالی است که روند دما و بارش در اکثر ایستگاه‌ها به ترتیب افزایشی و کاهشی است.

گوا و همکاران (۱۴) در پژوهشی از شاخص SPEI و تئوری ران برای ارزیابی خشکسالی در آسیای مرکزی استفاده نمودند. نتایج

طولانی‌تر باشد، این اختلاف کم‌تر است.

با توجه به موارد بیان شده مشخص می‌شود که خشکسالی در همه مناطق اتفاق می‌افتد ولی نتایج شاخص‌های مختلف در پایش خشکسالی متفاوت است. زیرا در شاخص SPI، تغییرات و یا نوسانات دما دخالت داده نمی‌شود، ولی در سایر شاخص‌های ذکر شده دما به صورت غیر مستقیم در پایش خشکسالی دخالت داده می‌شود. از این رو، در پژوهش حاضر سعی شده است وضعیت‌های رطوبتی بر اساس شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و eRDI در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه (۹ ماهه) در تعدادی ایستگاه سینوپتیک کشور با شرایط آب و هوایی مختلف مورد پایش قرار گیرد. علاوه بر این، با توجه به تأثیرپذیری شرایط خشکسالی از نوسانات و یا تغییرات بارندگی و دما، تلاش شده است با بررسی وضعیت همگنی سری‌های زمانی بارش و دما به عنوان موثرترین متغیرهای هواشناسی در وقوع پدیده خشکسالی، چگونگی تغییرات احتمالی مشخصه‌های خشکسالی بر مبنای تئوری ران و زنجیره مارکوف در ایستگاه‌های منتخب که دارای نقطه شکست در داده‌های سری زمانی بارش بوده‌اند، مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

علیچانی و همکاران (۲) با استفاده از ۱۶۰ متغیر هواشناسی بر پایه‌ی تحلیل عاملی، کشور ایران را به ۶ ناحیه‌ی اقلیمی شامل: مرطوب ساحلی، کوهستانی، نیمه‌کوهستانی، نیمه‌بیابانی، بیابانی و ساحلی بیابانی طبقه‌بندی نمودند. در این پژوهش از هر ناحیه‌ی اقلیمی سه ایستگاه و در مجموع ۱۸ ایستگاه سینوپتیک شامل: بندرانزلی، رامسر و بابلسر واقع در اقلیم مرطوب ساحلی؛ همدان، تبریز و مشهد واقع در اقلیم کوهستانی؛ خرم‌آباد، اراک و شیراز واقع در اقلیم نیمه‌کوهستانی؛ تهران، سبزوار و شاهرود واقع در اقلیم نیمه‌بیابانی؛ بندرعباس، بندرلنگه و چابهار واقع در اقلیم بیابان ساحلی؛ و کرمان، زاهدان و یزد واقع در اقلیم بیابانی جهت بررسی نقطه شکست در سری زمانی داده‌های بارش در دو مقیاس سال آبی و دوره رشد گیاه (نه ماه منتهی به خرداد) مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش از آمار ماهانه‌ی متغیرهای هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد برای ایستگاه‌های مورد بررسی طی سال‌های ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۶ میلادی که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده‌است، مورد استفاده قرار گرفتند.

آزمون‌های نقطه شکست

برای بررسی همگنی و تعیین نقطه شکست داده‌های بارش و دما

از آزمون‌های نرمال استاندارد (SNH)^۱، دامنه‌ی بیشاند (BHR)^۲، U بیشاند (BUR)^۳ و پیت (Pettitt)^۴ استفاده گردید (۱۱).

محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل

در شاخص‌های RDI و eRDI روش تورنت وایت برای برآورد تبخیر-تعرق، پیشنهاد شده‌است. اما، به دلیل این‌که روش تورنت وایت، مقدار تبخیر-تعرق را در مناطق خشک و نیمه‌خشک کم‌تر از مقدار واقعی آن نشان می‌دهد (۲۴) و از طرفی برآورد تبخیر-تعرق به روش فائو پنمن مونتیث، روش استاندارد محاسبه تبخیر-تعرق است، بنابراین، در این پژوهش، تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از روش فائو پنمن مونتیث (فائو ۵۶) محاسبه شد (۳).

شاخص‌های خشکسالی مورد بررسی

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص SPI یکی از شاخص‌های پرکاربرد طی دهه‌های اخیر به منظور پایش خشکسالی در سراسر جهان می‌باشد که به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. اساس شاخص SPI بر محاسبات احتمالات وقوع بارندگی برای هر مقیاس زمانی استوار است. این شاخص فقط از داده‌های بارندگی ماهانه استفاده می‌کند و برای تشخیص کمبود میزان بارش در مقیاس‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) طراحی شده است. محاسبه شاخص SPI شامل برازش تابع چگالی توزیع گاما بر توزیع فراوانی بارندگی کل برای یک ایستگاه معین می‌باشد. سپس، پارامترهای توزیع گاما برای هر مقیاس زمانی محاسبه و تابع احتمال تجمعی آن برای هر ماه رسم می‌شود. سپس از تغییر شکل هم‌احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z برای محاسبه SPI استفاده می‌شود. براساس این شاخص، دوره‌ی خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به طور مستمر منفی و به مقدار ۱- یا کم‌تر برسد و هنگامی پایان می‌یابد که مقدار SPI مثبت گردد (۲۱). جدول ۱ طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و eRDI را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول وضعیت رطوبتی در هر دوره می‌تواند در یکی از طبقه‌های خشکسالی (مقادیر ۱- و یا کمتر از آن)، نرمال (مقادیر بین ۰/۹۹- تا ۰/۹۹) و ترسالی (مقادیر ۱ و یا بیش‌تر از آن) نیز قرار گیرد.

1- Standard Normal Homogeneity

2- Buishand's Range Test

3- Buishand's U Test

4- Pettite's Test

جدول ۱- طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و eRDI (۲۱، ۳۳، ۳۴ و ۳۲)
Table 1- Different classes of drought intensity based on SPI, SPEI, RDI and eRDI indices (21, 35, 33 & 32)

طبقه خشکسالی Drought classes	مقدار عددی شاخص Index value
ترسالی بسیار شدید Extreme wet	$Index \geq 2.0$
ترسالی شدید Severe wet	$1.5 \leq Index < 2.0$
ترسالی متوسط Moderate wet	$1.0 \leq Index < 1.5$
نرمال Normal	$-0.99 \leq Index \leq 0.99$
خشکسالی متوسط Moderate drought	$-1.5 < Index \leq -1.0$
خشکسالی شدید Severe drought	$-2.0 < Index \leq -1.5$
خشکسالی بسیار شدید Extreme drought	$Index \leq -2.0$

به‌ویژه خشکسالی کشاورزی به‌وسیله شاخص RDI توسط تیگاس و همکاران (۳۲) ارائه گردید. شاخص eRDI مشابه شاخص RDI می‌باشد و تنها به جای استفاده از مقادیر ماهانه بارش اندازه‌گیری شده از مقادیر بارش مؤثر (P_e) استفاده می‌شود. در این شاخص، بارش مؤثر بخشی از بارش است که می‌تواند در خاک ذخیره شده و سبب افزایش رطوبت خاک شود. در واقع بارش مؤثر بخشی از کل بارش می‌باشد. در این پژوهش برای برآورد بارش مؤثر از روش USDA-SCS که مناسب مناطق خشک و نیمه‌خشک است، استفاده شده است که در ادامه روابط آن آورده شده است.

$$P_e = \frac{P(125 - 0.2P)}{125} \quad (1)$$

$$P_e = (0.1 \times P) + 125 \quad (2)$$

for $P \leq 250\text{mm}$
for $P > 250$

در روابط فوق، P_e بارش مؤثر ماهانه و P بارش کل ماهانه می‌باشد.

زنجیره مارکف و ماتریس احتمال انتقال

چنانچه در سامانه، برآوردها در یک زمان، تحت تأثیر برآوردها در زمان‌های دیگر باشد، فرآیند از نوع مارکف است (۱۵). مدل زنجیره مارکف مرتبه اول اصلی‌ترین شکل مدل زنجیره مارکف به‌شمار می‌رود. زنجیره مارکف مرتبه اول عبارت است از یک سری زمانی گسسته که احتمال شرطی برای حالت j در زمان $n+1$ تنها به حالت قبل از آن یعنی i در زمان n بستگی دارد (۳۰). بیش‌تر محققین برای پیش‌بینی خشکسالی، تغییر وضعیت یک مرحله‌ای زنجیره مارکف را مورد استفاده قرار داده‌اند. طبیعی است در این حالت، احتمال وقوع پدیده به وقوع پدیده خاص در یک زمان قبل از خود بستگی دارد. احتمالات مدل زنجیره مارکف می‌توانند در قالب ماتریس نیز ارائه شوند که به ماتریس تغییر وضعیت زنجیره مارکف (ماتریس احتمال انتقال) مشهور هستند. در یک ماتریس تغییر وضعیت ردیف‌ها، معرف

شاخص بارش-تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص SPEI توسط ویسنه-سرانو و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه شد (۳۴). برای محاسبه شاخص SPEI در گام نخست باید مقدار تبخیر-تعرق در هر ماه برآورد شود. سپس از طریق یک مدل ساده‌ی بیلان آب تفاوت بین مقدار بارندگی (P) و مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) برای ماه i ($D_i = P_i - PET_i$) محاسبه و مقادیر احتمال تجمعی D_i از طریق برازش توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) (به دلیل برازش بهتر آن در مقایسه با سایر توزیع‌های آماری) و تبدیل آن به نرمال استاندارد شده، برآورد می‌گردد. شاخص SPEI یک متغیر استاندارد شده است. بنابراین می‌تواند با دیگر مقادیر SPEI در مکان و زمان‌های دیگر مقایسه شود. در توسعه شاخص SPEI، از مفاهیم شاخص SPI استفاده شده است. بنابراین، مقادیر طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی در آن‌ها مشابه با طبقه‌های ارائه شده در شاخص SPI توسط مک‌کی و همکاران (۲۱) می‌باشد (جدول ۱).

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

ساکریس و همکاران (۳۳) با بیان این که خشکسالی‌های منطقه‌ی مدیترانه با افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر-تعرق همراه هستند و شاخص‌های مبتنی بر بارش به تنهایی نمی‌تواند بیانگر خصوصیات خشکسالی در این مناطق باشند، شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) را بر پایه‌ی مفاهیم شاخص SPI و نسبت بارش به تبخیر-تعرق برای پایش خشکسالی و در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی پیشنهاد دادند. فرض اولیه در شاخص RDI آن است که مقادیر نسبت بارش به تبخیر-تعرق از تابع چگالی لوگ نرمال پیروی می‌کند. اما نتایج برخی از پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تابع توزیع گاما می‌تواند در برخی از مناطق برازش بهتری بر این نسبت داشته باشد (۱۰).

شاخص شناسایی مؤثر خشکسالی (eRDI)

این شاخص به منظور بهبود نتایج حاصل از ارزیابی خشکسالی

تئوری ران

یکی از روش‌های متداول تحلیل خشکسالی، تئوری ران می‌باشد. با استفاده از این تئوری سه مشخصه مهم خشکسالی شامل: تداوم، شدت، بزرگی و تعداد دفعات خشکسالی را می‌توان تعریف نمود. این مشخصات با در نظر گرفتن سطح آستانه X_0 برای متغیر اصلی X_t نشان داده شده‌اند. براساس این روش، طول دوره یا تداوم خشکسالی^۱ (DL) برابر فاصله زمانی است که در طی آن، مقدار متغیر اصلی از سطح بحرانی کم‌تر است. شدت خشکسالی^۲ (DS)، برابر با مجموع کمبودهای متغیر اصلی از سطح بحرانی مورد نظر در دوره وقوع خشکسالی می‌باشد. بزرگی خشکسالی^۳ (DM) که همان میانگین کمبودها است برابر با نسبت مجموع کمبودها (DS) به طول دوره خشکسالی (DL) است. تعداد دفعات خشکسالی^۴ (DN)، تعداد دفعاتی است که خشکسالی در طول یک دوره آماری اتفاق افتاده است. به بیان دیگر، عبارت از تعداد دفعاتی است که مقدار شاخص خشکسالی پایین‌تر از سطح آستانه خشکسالی (مثلاً کم‌تر از صفر) قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

نتایج بررسی نقطه شکست سری زمانی داده‌های بارش و

دما

به منظور تعیین نقطه شکست در سری زمانی داده‌های بارش و دما از آزمون‌های نرمال استاندارد، دامنه‌ی بیشاند، U بیشاند و پیت استفاده گردید. در مواردی نقطه شکست معنی‌دار تلقی می‌گردد که حداقل در سه آزمون نقطه شکست معنی‌دار باشد. بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده، داده‌های بارش در ایستگاه‌های اراک و تبریز در مقیاس‌های زمانی دوره رشد گیاه و سالانه دارای نقطه شکست می‌باشند که نتایج آن در شکل ۱ و جدول ۲ ارائه شده‌اند. بررسی نقطه شکست در سری زمانی دما در ایستگاه تبریز برای مقیاس‌های سالانه و دوره رشد گیاه به ترتیب سال‌های ۹۳-۱۹۹۲ و ۹۲-۱۹۹۱ در چهار آزمون مشخص شدند که همگی در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار بودند. این در حالی است که برای ایستگاه سینوپتیک اراک نتایج نقطه شکست سری زمانی دمای متوسط برای مقیاس‌های سالانه و دوره رشد گیاه نشان داد که نقطه شکست مشخص شده در هر ۴ آزمون سال ۸۱-۱۹۸۰ می‌باشد که در سطح ۹۵ درصد در هیچ آزمونی معنی‌دار نمی‌باشد. بنا بر این، در ادامه به بررسی تاثیر نقطه شکست

حالت ۱ و ستون‌ها، معرف حالت ۲ هستند. در مطالعه حاضر، از ماتریسی با تعداد ۳ سطر و ۳ ستون‌های ماتریس‌ها استفاده شد که متناسب با سه کلاس وضعیت رطوبتی شامل: خشکسالی (مقادیر کمتر از ۰/۹۹-)، نرمال (مقادیر بین ۰/۹۹- تا ۰/۹۹) و ترسالی (مقادیر بیش‌تر از ۰/۹۹) می‌باشد. سپس معیارهای آماری مشخصه‌های خشکسالی شامل: ماندگاری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و اطمینان‌پذیری نیز از طریق مقادیر ماتریس‌ها تعیین گردید. با توجه به اینکه این مفاهیم هنوز در منابع مرتبط با پدیده خشکسالی کمتر شناخته شده‌اند به معرفی هر یک از آن‌ها پرداخته می‌شود.

ماندگاری، احتمال ماندگاری، یعنی احتمال باقی ماندن در همان وضعیت رطوبتی دوره زمانی قبل. آسیب‌پذیری، نشان‌دهنده‌ی بزرگی شکست‌های سیستم است. برای اندازه‌گیری آسیب‌پذیری سیستم، شاخص شدت خسارت باید تعریف شود. به عنوان مثال هنگامی که شرایط مطلوب وضعیت رطوبتی استقرار وضعیت نرمال و ترسالی باشد، شاخص شدت می‌تواند به عنوان احتمال وضعیت خشکسالی هر بازه زمانی تعریف شود. به عبارت دیگر مجموع احتمال وقوع خشکسالی‌ها، براساس شاخص‌های مورد بررسی همان آسیب‌پذیری می‌شود. برگشت‌پذیری نشان‌دهنده احتمال بازگشت سیستم به حالت مطلوب پس از یک شکست است. قابلیت اطمینان (اطمینان‌پذیری) یعنی احتمال این که شکستی در بهره‌برداری از سیستم در زمانی مشخص رخ ندهد. بر مبنای این تعریف، قابلیت اطمینان نقطه مقابل مفهوم ریسک می‌باشد که احتمال شکست سیستم در یک مدت زمان مشخص است. به عبارت دیگر قابلیت اطمینان برابر با حاصل جمع احتمال وقوع حالت‌های نرمال و مرطوب براساس هر یک از شاخص‌های مورد مطالعه است. در اینجا نیز منظور از سیستم، حالت مطلوب و شکست به ترتیب وضعیت رطوبتی، وضعیت‌های نرمال و ترسالی و وضعیت خشکسالی می‌باشد.

پس از تعیین مقادیر شاخص‌های مورد بررسی (شاخص‌های SPI ، RDI ، $erDI$ و $SPEI$) در مقیاس‌های سالانه و دوره رشد گیاه در ایستگاه‌های تبریز و اراک، معیارهای آسیب‌پذیری و قابلیت اطمینان به دست آمد. سپس عناصر ماتریس احتمال تغییر وضعیت، با شمارش تعداد دفعاتی که شاخص‌های مذکور، از حالت ۱ به حالت ۲ انتقال پیدا کرده‌است، محاسبه شد. پس از تعیین مقادیر ماتریس احتمال انتقال در مقیاس‌های زمانی مورد نظر، با توجه به اینکه عناصر واقع در قطر اصلی این ماتریس، احتمال ماندگاری (در همان وضعیت قبلی) را نشان می‌دهد، احتمال ماندگاری در سه وضعیت مرطوب، نرمال و خشکسالی و برگشت‌پذیری تعیین گردید.

- 1- Duration length
- 2- Drought severity
- 3- Drought magnitude
- 4- Drought number

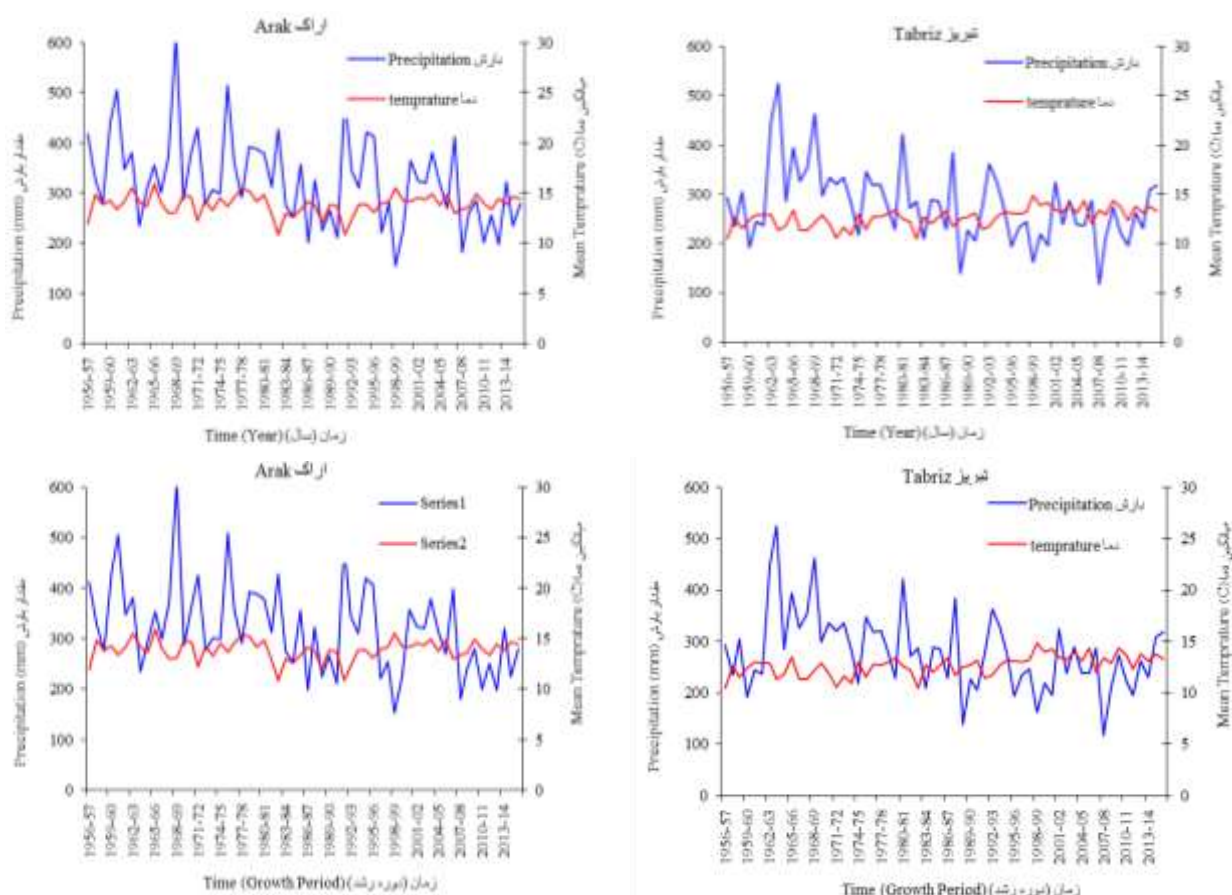
تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در مجموع بر اساس شاخص erDI در هر دو ایستگاه و در هر دو مقیاس زمانی، شرایط رطوبتی نسبت به سایر شاخص‌ها کمی خشک‌تر شده است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که تا حدودی بارش موثر در سال‌های اخیر نسبت به سال‌های اولیه دوره مورد بررسی کاهش یافته است. با توجه به شکل ۳ در رابطه با برگشت‌پذیری، در همه‌ی موارد به جزء در ایستگاه تبریز براساس شاخص SPEI در مقیاس سالانه و در ایستگاه اراک براساس شاخص SPI در مقیاس دوره رشد، برگشت‌پذیری دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است. اطمینان‌پذیری و آسیب‌پذیری نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول به‌ترتیب کمتر و بیش‌تر شده است. کمتر شدن اطمینان‌پذیری و بیش‌تر شدن آسیب‌پذیری دوره دوم نسبت به دوره اول حاکی از افزایش خشکسالی در دهه‌های اخیر است که گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر یکی از علل آن می‌باشد.

داده‌های بارش بر تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در این دو شهر پرداخته شد.

بعد از مشخص شدن نقطه شکست بارش، سری زمانی مقادیر شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه‌های ذکر شده در دو مقیاس سالانه و دوره رشد، به دو دوره شامل دوره اول (قبل از نقطه شکست) و دوره دوم (بعد از نقطه شکست) مجزا گردید. سپس ویژگی‌های آماری خشکسالی شامل بازگشت‌پذیری، اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و ماندگاری و ویژگی‌های خشکسالی بر مبنای تئوری ران شامل تعداد دوره‌ها، تداوم، شدت و بزرگی هم در مقیاس‌های رطوبتی مختلف در دو دوره تعیین و سپس تفاوت‌های آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بررسی تغییرات ویژگی‌های اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری در دو دوره قبل و بعد از نقطه شکست

منحنی نوسانات مقادیر سری زمانی شاخص‌های خشکسالی (شامل شاخص‌های SPI، SPEI، RDI و erDI) در ایستگاه‌های



شکل ۱- سری زمانی مقادیر بارش و دما در ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و اراک در مقیاس‌های سالانه و دوره رشد گیاه
Figure 1- Time series of mean annual precipitation and temperature values at Tabriz and Arak stations in two annual and plant growth period scales

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون‌های نقطه شکست در سری زمانی داده‌های بارش

Table 2- Results of breakpoint tests in precipitation data time series

نام آزمون Test	مقیاس زمانی Time scale	ایستگاه Station	SNH		BHR		BUR		Pettitt		سال نقطه شکست Breaking Year	تعداد سال‌های قبل از نقطه شکست Year Before Breaking Point	تعداد سال‌های بعد از نقطه شکست Years after breaking point
			نقطه شکست Breaking Point	p-value	نقطه شکست Breaking Point	p-value	نقطه شکست Breaking Point	p-value	نقطه شکست Breaking Point	p-value			
سالانه Annual		تبریز Tabriz	25	0.006	26	0.006	26	0.0007	26	0.004	1982-1983	26	33
		اراک Arak	26	0.02	26	0.028	26	0.0025	26	0.009	1982-1983	26	33
دوره رشد گیاه Plant Growth		تبریز Tabriz	25	0.017	25	0.002	25	0.0018	31	0.013	1981-1982	25	34
		اراک Arak	26	0.017	26	0.027	26	0.002	26	0.008	1982-1983	26	33

الف) مقیاس دوره رشد گیاه

تعداد دوره‌های خشکسالی دوره دوم نسبت به دوره اول با توجه به این که دوره اول ۲۶ ساله و دوره دوم ۳۳ ساله می‌باشد، بیش‌تر می‌باشد (جدول ۴). متوسط و حداکثر تداوم دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر شدت دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد به جزء در اراک و براساس شاخص RDI در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر بزرگی نیز در بیش‌تر موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است.

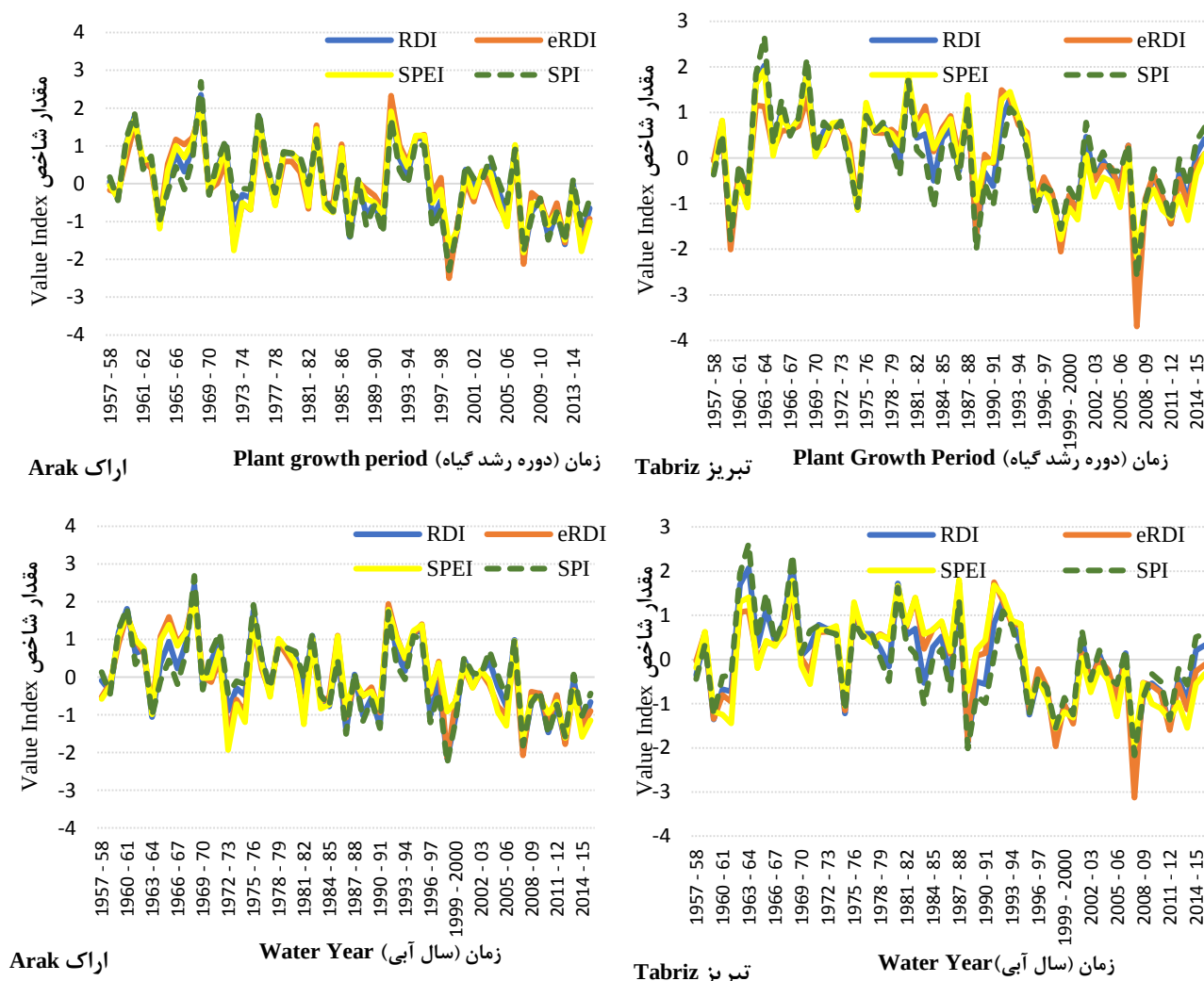
ب) مقیاس سالانه

با توجه به جدول ۴ تعداد دوره‌های خشکسالی در این مقیاس زمانی در ایستگاه تبریز در دو شاخص SPEI و eRDI در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است، ولی این تعداد در بقیه‌ی موارد بیش‌تر شده است. متوسط و حداکثر تداوم دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد در دوره‌ی دوم نسبت به دوره‌ی اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر شدت دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد به جزء در ایستگاه اراک براساس شاخص RDI، در دوره‌ی دوم نسبت به دوره‌ی اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر بزرگی خشکسالی نیز در اکثر موارد در دوره‌ی دوم نسبت به دوره‌ی اول بیش‌تر شده است.

نتایج بررسی تغییرات ماندگاری وضعیت‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی، در دو دوره قبل و بعد از نقطه شکست داده‌های بارش

با توجه به جدول ۳ احتمال ماندگاری وضعیت خشکسالی در ایستگاه تبریز براساس شاخص SPI و ایستگاه اراک براساس شاخص eRDI در مقیاس سالانه و در ایستگاه تبریز براساس دو شاخص SPI و eRDI در مقیاس دوره رشد در دو دوره صفر بوده و تغییری نکرده است و در ایستگاه تبریز براساس شاخص SPEI احتمال ماندگاری وضعیت خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است. در بقیه موارد احتمال ماندگاری وضعیت خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول نیز بیش‌تر شده است. میزان تغییرات مقدار احتمال ماندگاری وضعیت نرمال در دو دوره در همه‌ی موارد بین صفر و ۰/۲۵ متغیر بوده است. این تغییرات در دو جهت (هم افزایشی و هم کاهش) می‌باشد، اما میزان تغییرات ماندگاری وضعیت نرمال در دو دوره در ایستگاه اراک قابل ملاحظه‌تر بوده است. میزان تغییرات احتمال ماندگاری وضعیت ترسالی نیز در دو دوره و در همه‌ی موارد بین صفر و ۰/۲۰ متغیر بوده است که این تغییرات نیز در هر دو جهت (افزایشی و یا کاهش) بوده است.

نتایج بررسی تغییرات ویژگی‌های تعداد، تداوم، شدت و بزرگی دوره‌های خشکسالی در دو دوره قبل و بعد از نقطه شکست



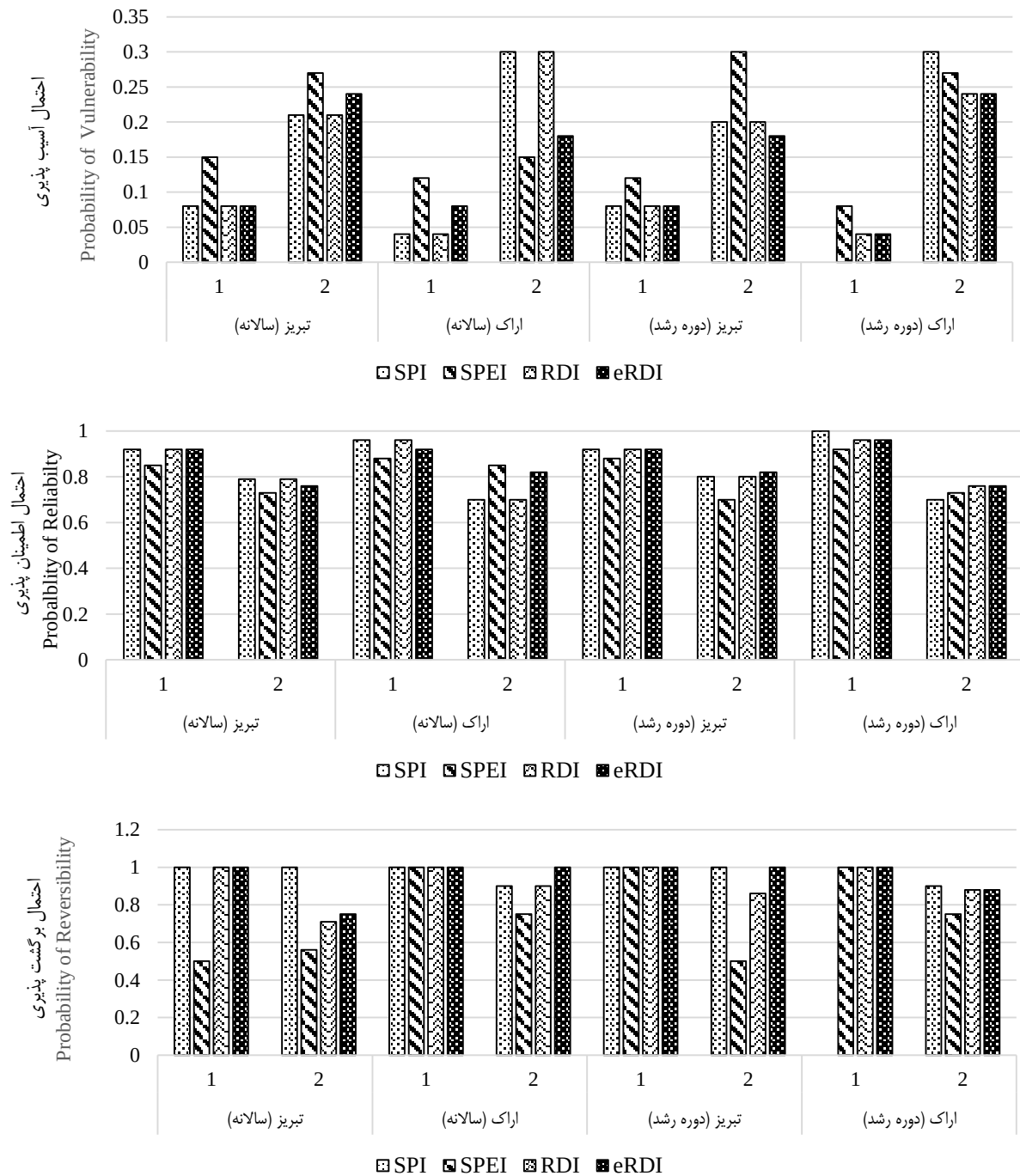
شکل ۲- سری زمانی مقادیر شاخص‌های RDI و eRDI در دو ایستگاه تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه
Figure 2- Time series of SPI, SPEI, RDI and eRDI indices values, at Tabriz and Arak stations for two annual and plant growth period scales

حداکثر تداوم در ایستگاه اراک براساس سه شاخص RDI، SPEI و eRDI در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول تغییری نکرده است و در مورد شاخص SPI نیز در این ایستگاه در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است و در مورد ایستگاه تبریز نیز در همه‌ی شاخص‌ها در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است. حداقل شدت در همه‌ی موارد به جزء در ایستگاه اراک براساس شاخص RDI بقیه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است. متوسط شدت نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است. حداکثر شدت در همه‌ی موارد به جز در ایستگاه اراک براساس دو شاخص RDI و eRDI در بقیه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر بزرگی دوره‌های فاقد خشکسالی در همه‌ی موارد به جزء در مورد حداکثر بزرگی ایستگاه تبریز در همه‌ی شاخص‌ها، در بقیه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است.

نتایج بررسی تغییرات ویژگی‌های تعداد، تداوم، شدت و بزرگی دوره‌های فاقد خشکسالی در دو دوره قبل و بعد از نقطه شکست

الف) مقیاس دوره رشد گیاه

با توجه به جدول ۵ تعداد دوره‌های فاقد خشکسالی در این مقیاس در ایستگاه اراک براساس دو شاخص RDI و SPI در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است و از نظر شاخص SPEI و eRDI در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول به‌ترتیب تغییری نکرده است و بیش‌تر شده است. در ایستگاه تبریز در همه‌ی موارد تعداد دوره‌های فاقد خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول بیش‌تر شده است. حداقل تداوم دوره‌های فاقد خشکسالی نیز در همه‌ی موارد یک سال بوده است و تغییری نکرده است. متوسط تداوم نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره‌ی اول کمتر شده است.



شکل ۳- مقادیر احتمال مشخصه‌های آسیب‌پذیری، اطمینان‌پذیری و برگشت‌پذیری در دو دوره‌ی قبل (۱) و بعد (۲) از نقطه شکست داده‌های بارش در دو ایستگاه تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه

Figure 3- The probability values of vulnerability, reliability and reversibility characteristics in two periods before (1) and after (2) from the break point of precipitation data at two stations of Tabriz and Arak for both annual and plant growth period scales

جدول ۳- مقادیر احتمال ماندگاری سه وضعیت رطوبتی، خشکسالی، نرمال و ترسالی در دو دوره‌ی قبل (۱) و بعد (۲) از نقطه شکست داده‌های بارش در دو ایستگاه تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه

Table 3- Probability values of stationary for drought, normal and wet conditions before (1) and after (2) break point of precipitation data in two stations of Tabriz and Arak for both annual and plant growth period scales

Index	مقیاس زمانی Time Scale ایستگاه Station	شماره دوره period No.	SPI			SPEI			RDI			eRDI		
			خشکسالی Drought	نرمال Normal	ترسالی WEt	خشکسالی Drought	نرمال Normal	ترسالی WEt	خشکسالی Drought	نرمال Normal	ترسالی WEt	خشکسالی Drought	نرمال Normal	ترسالی WEt
سالانه Annual	تبریز Tabriz	1	0.00	0.67	0.20	0.50	0.69	0.20	0.00	0.65	0.17	0.00	0.67	0.20
		2	0.00	0.70	0.00	0.44	0.65	0.33	0.29	0.74	0.00	0.25	0.67	0.33
	اراک Arak	1	0.00	0.68	0.20	0.00	0.50	0.37	0.00	0.75	0.25	0.00	0.63	0.43
		2	0.10	0.50	0.25	0.25	0.70	0.40	0.10	0.50	0.25	0.00	0.62	0.40
	تبریز Tabriz	1	0.00	0.65	0.20	0.00	0.69	0.20	0.00	0.63	0.17	0.00	0.71	0.20
		2	0.00	0.67	0.00	0.50	0.65	0.33	0.14	0.71	0.00	0.00	0.70	0.25
دوره رشد گیاه plant growth period	اراک Arak	1	0.00	0.75	0.20	0.00	0.59	0.33	0.00	0.68	0.20	0.00	0.72	0.50
		2	0.10	0.50	0.00	0.25	0.60	0.25	0.13	0.62	0.33	0.13	0.53	0.40

ب) مقیاس سالانه

تعداد دوره‌های فاقد خشکسالی در این مقیاس در ایستگاه اراک براساس شاخص‌های RDI، SPEI و eRDI تغییری نکرده‌است و از نظر شاخص SPI در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است و در ایستگاه تبریز براساس شاخص‌های SPEI و eRDI تعداد دوره‌های فاقد خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده و در مورد شاخص‌های SPI و RDI نیز در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است (جدول ۵). حداقل تداوم‌ها نیز در همه‌ی موارد یک سال بوده و در دوره دوم نسبت به دوره اول تغییری ایجاد نشده است. متوسط تداوم نیز به جزء در مورد ایستگاه تبریز براساس شاخص SPEI در بقیه موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است. همچنین با توجه به جدول ۵ حداکثر تداوم در مورد ایستگاه اراک براساس دو شاخص SPEI و RDI در دوره دوم نسبت به دوره اول تغییری نکرده است. حداقل، متوسط و حداکثر شدت دوره‌های فاقد خشکسالی در اکثر موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است. حداقل و متوسط و حداکثر بزرگی نیز در اکثر موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول کمتر شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج ۴ روش آماری بررسی نقطه شکست، نشان می‌دهند که داده‌های بارش ایستگاه‌های اراک و تبریز در مقیاس‌های زمانی دوره

رشد گیاه و سالانه دارای نقطه شکست می‌باشد. پس از تقسیم سری زمانی مقادیر شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه‌های ذکر شده در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه، به دو بخش شامل دوره اول (قبل از نقطه شکست) و دوره دوم (بعد از نقطه شکست)، نتایج حاکی از آن است که در دوره دوم در مقایسه با دوره اول، شاخص اطمینان‌پذیری خشکسالی کاهش یافته است در حالی‌که آسیب‌پذیری نسبت به خشکسالی بیش‌تر شده است. این موضوع نشان دهنده افزایش تعداد و شدت خشکسالی در دهه‌های اخیر (دوره بعد از شکست داده‌های بارش) در مقایسه با دهه‌های قبل می‌باشد.

افزایش وقوع خشکسالی در دهه‌های اخیر می‌تواند ناشی از گرمایش جهانی باشد. همچنین در اکثر شاخص‌های پایش خشکسالی، احتمال ماندگاری وضعیت خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. متوسط و حداکثر تداوم دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر شدت دوره‌های خشکسالی نیز در همه‌ی موارد به جز در اراک و براساس شاخص RDI در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر بزرگی خشکسالی نیز در بیش‌تر موارد در دوره دوم نسبت به دوره اول بیش‌تر شده است. در اکثر موارد مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر شدت و بزرگی دوره‌های فاقد خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول کم‌تر شده است. به‌طور کلی نتایج تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در دوره بعد از شکست نسبت به دوره قبل از آن می‌تواند

پیشنهاد می‌شود مشابه با این پژوهش در مورد همه ایستگاه‌های سینوپتیک کشور که دارای دوره آماری طولانی می‌باشند، انجام شده تا اثر تغییر اقلیم و گرمایش جهانی و در نتیجه تغییرات بارش و دما بر وقوع خشکسالی نمایان‌تر شود.

ناشی از گرمایش جهانی و در نتیجه افزایش تبخیر-تعرق و ایجاد و یا تشدید اثرات خشکسالی باشد. ضمن آنکه بر اساس نتایج حاصل از شاخص eRDI در هر دو ایستگاه و در هر دو مقیاس زمانی، شرایط رطوبتی نسبت به سایر شاخص‌ها تا حدودی خشک‌تر شده است. به عبارت دیگر می‌توان بیان نمود که تا حدودی بارش موثر در سال‌های اخیر نسبت به سال‌های اولیه دوره مورد بررسی کاهش یافته است.

جدول ۴- مقادیر مشخصه‌های دوره‌های خشکسالی بر مبنای تئوری ران در دو دوره قبل (۱) و بعد (۲) از نقطه شکست داده‌های بارش در دو ایستگاه تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه

Table 4- Properties of drought periods based on Run theory in two periods before (1) and after (2) from the break point of precipitation data at two stations in Tabriz and Arak at two annual scales and plant growth period

مشخصه Property	Station	Index	شماره دوره Period No	تعداد وقایع Events count	تداوم Duration length			شدت Severity			بزرگی Magnitude		
					حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max	حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max	حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max
دوره رشد گیاه Plant Growth Period	اراک Arak	SPI	1	7	1.00	1.43	3.00	-0.5	-0.43	-1.18	-0.5	-0.28	-0.59
			2	8	1.00	2.50	6.00	-0.2	-2.48	-6.83	-0.2	-0.85	-1.51
		SPEI	1	6	1.00	1.50	3.00	-0.25	-0.99	-2.94	-0.22	-0.63	-1.19
			2	7	1.00	3.14	9.00	-0.34	-2.68	-9.12	-0.34	-0.77	-1.6
		RDI	1	6	1.00	1.33	3.00	-0.26	-0.67	-1.6	-0.26	-0.49	-1.9
			2	7	1.00	3.14	9.00	-0.8	-2.86	-8.95	-0.8	-0.81	-1.41
		eRDI	1	6	1.00	1.50	3.00	-0.17	-0.94	-2.85	-0.17	-0.59	-0.98
			2	8	1.00	2.75	9.00	-0.28	-2.25	-8.73	-0.28	-0.75	-1.78
	تبریز Tabriz	SPI	1	4	1.00	1.75	3.00	-0.36	-1.17	-2.7	-0.36	-0.57	-0.9
			2	7	1.00	3.14	7.00	-0.27	-2.61	-6.54	-0.27	-0.66	-1.2
		SPEI	1	3	1.00	1.67	3.00	-0.32	-1.54	-3.16	-0.32	-0.84	-1.14
			2	5	1.00	4.40	8.00	-0.2	-3.99	-8.89	-0.2	-0.71	-1.15
		RDI	1	4	1.00	1.50	3.00	-0.4	-1.12	-3.3	-0.4	-0.62	-1.14
			2	6	1.00	3.67	7.00	-0.29	-3.2	-7.88	-0.29	-0.71	-1.13
		eRDI	1	3	1.00	1.67	3.00	-0.6	-1.41	-3.1	-0.6	-0.72	-1.8
			2	5	1.00	4.00	8.00	-0.12	-3.72	-8.93	-0.12	-0.87	-1.69
سالانه Annual	اراک Arak	SPI	1	7	1.00	1.43	3.00	-0.3	-0.45	-1.11	-0.3	-0.3	-0.55
			2	8	1.00	2.50	6.00	-0.6	-2.46	-6.67	-0.6	-0.86	-1.5
		SPEI	1	6	1.00	1.67	3.00	-0.4	-1.24	-3.84	-0.2	-0.74	-1.28
			2	7	1.00	3.29	9.00	-0.28	-2.53	-9.2	-0.28	-0.65	-1
		RDI	1	6	1.00	1.50	3.00	-0.23	-0.7	-1.67	-0.23	-0.47	-1.6
			2	7	1.00	3.14	9.00	-0.1	-2.85	-8.91	-0.1	-0.81	-1.42
		eRDI	1	6	1.00	1.50	3.00	-0.13	-1.2	-3.4	-0.13	-0.63	-1.1
			2	7	1.00	3.29	9.00	-0.28	-2.63	-8.87	-0.28	-0.7	-1.38
	تبریز Tabriz	SPI	1	4	1.00	1.50	3.00	-0.44	-1.2	-2.1	-0.44	-0.69	-1.15
			2	7	1.00	3.00	7.00	-0.47	-2.7	-6	-0.47	-0.83	-1.27
		SPEI	1	5	1.00	1.60	3.00	-0.19	-1.2	-3.87	-0.19	-0.61	-1.29
			2	3	1.00	7.00	14.00	-0.72	-6.41	-12.16	-0.72	-0.88	-1.6
		RDI	1	4	1.00	1.50	3.00	-0.16	-1.12	-2.75	-0.16	-0.66	-1.22
			2	7	1.00	3.00	7.00	-0.42	-2.82	-7.45	-0.42	-0.75	-1.1
		eRDI	1	5	1.00	1.40	3.00	-0.2	-0.92	-3.1	-0.2	-0.5	-1.15
			2	4	1.00	5.00	9.00	-1.61	-4.65	-8.68	-0.4	-1.7	-1.86

جدول ۵- مقادیر مشخصه‌های دوره‌های فاقد خشکسالی بر مبنای تئوری ران در دو دوره‌ی قبل (۱) و بعد (۲) از نقطه شکست داده‌های بارش در دو ایستگاه تبریز و اراک در دو مقیاس سالانه و دوره رشد گیاه

Table 5- Properties of non-drought periods based on Run theory in two periods before (1) and after (2) from the break point of precipitation data at two stations in Tabriz and Arak for two annual and plant growth period scales

Precipitation data at two stations in Tabriz and Arak for two annual and plant growth period scales													
مشخص Property			تداوم Duration length				شدت severity			بزرگی Magnitude			
Scale	Station	Index	شماره دوره Period No.	تعداد وقایع Events Count	حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max	حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max	حداقل Min	متوسط Ave.	حداکثر Max
دوره رشد گیاه Plant Growth Period	اراک Arak	SPI	1	8	1.00	2.00	4.00	0.17	1.97	4.19	0.17	0.92	1.67
			2	7	1.00	1.86	5.00	0.10	1.30	2.10	0.10	0.57	1.5
		SPEI	1	6	1.00	2.83	5.00	1.24	2.73	5.25	0.62	1.00	1.45
			2	6	1.00	1.83	5.00	0.10	1.46	5.79	0.10	0.64	1.16
		RDI	1	7	1.00	2.57	5.00	0.70	2.26	4.47	0.70	0.85	1.4
			2	6	1.00	1.83	5.00	0.10	1.37	5.32	0.10	0.60	1.6
		eRDI	1	6	1.00	2.83	5.00	0.59	2.44	5.89	0.30	0.88	1.54
			2	7	1.00	1.57	5.00	0.40	1.28	6.43	0.40	0.54	1.29
	تبریز Tabriz	SPI	1	4	1.00	4.50	11.00	0.52	4.20	11.89	0.52	0.79	1.8
			2	7	1.00	1.71	4.00	0.13	0.89	2.28	0.13	0.53	1.14
		SPEI	1	3	1.00	6.67	12.00	0.83	5.45	9.82	0.81	0.82	0.83
			2	6	1.00	2.00	4.00	0.70	1.38	4.40	0.70	0.56	1.38
		RDI	1	4	1.00	4.75	12.00	0.71	4.60	10.49	0.71	0.85	1.1
			2	7	1.00	1.71	4.00	0.28	1.70	3.35	0.25	0.59	1.27
		eRDI	1	3	1.00	6.67	12.00	0.81	4.73	7.87	0.66	0.75	0.81
			2	6	1.00	2.33	6.00	0.50	1.44	4.80	0.50	0.37	1.2
سالانه Annual	اراک Arak	SPI	1	8	1.00	2.00	4.00	0.13	1.96	4.14	0.13	0.91	1.65
			2	7	1.00	1.86	5.00	0.70	1.40	2.11	0.70	0.57	1.6
		SPEI	1	6	1.00	2.67	5.00	0.72	2.78	6.43	0.71	0.97	1.29
			2	6	1.00	1.67	5.00	0.18	1.48	5.96	0.18	0.69	1.19
		RDI	1	6	1.00	2.83	5.00	1.10	2.70	4.87	0.70	0.95	1.1
			2	6	1.00	1.83	5.00	0.70	1.32	5.12	0.70	0.60	1.2
		eRDI	1	6	1.00	2.83	6.00	0.47	2.63	6.95	0.47	0.82	1.16
			2	6	1.00	1.67	5.00	0.14	1.46	6.80	0.14	0.65	1.22
	تبریز Tabriz	SPI	1	4	1.00	5.00	12.00	0.35	4.35	12.98	0.35	0.66	1.8
			2	7	1.00	1.71	4.00	0.21	0.82	1.98	0.12	0.51	1.33
		SPEI	1	5	1.00	3.60	8.00	0.63	3.14	7.11	0.63	0.87	1.35
			2	3	1.00	4.00	6.00	0.40	3.20	5.47	0.40	0.59	0.91
		RDI	1	4	1.00	5.00	12.00	0.50	4.28	11.15	0.50	0.76	0.99
			2	7	1.00	1.71	4.00	0.12	1.10	3.36	0.12	0.56	1.64
		eRDI	1	5	1.00	3.80	8.00	0.61	2.89	6.84	0.58	0.76	1.9
			2	4	1.00	3.25	6.00	0.40	2.18	4.91	0.40	0.43	0.82

- 1- Adnan S., Ullah K., Shuanglin L., Gao S., Hayat Khan A., and Mahmood R. 2018. Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Journal of Climate Dynamics* 51(5-6): 1885-1899.
- 2- Alijani B., Ghohroudi M., and Arabi N. 2008. Developing a climate model for Iran using GIS. *Theoretical and Applied Climatology* 92(1-2): 103-112.
- 3- Allen R.G., Pereira L.S., Rees D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.
- 4- Bahlake M., Fathabadi A., Rouhani H., and Seyedian S.M. 2018. The effect of climate change on wet and dry period's characteristics (Case study: Arazkuse and Tamar stations in Golestan Province). *Scientific Journal of Agricultural Meteorology* 5(2):11-23. (In Persian with English abstract)
- 5- Bazgeer S., Abbasi F., Asadi Oskoue E., Haghighat M., and Rezazadeh P. 2019. Assessing the Homogeneity of Temperature and Precipitation Data in Iran with Climatic Approach. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 6(1): 51-70. (In Persian with English abstract)
- 6- Bazrafshan O., Mahmudzadeh F., and Bazrafshan J. 2016. Evaluation of temporal trends of the drought indices SPI and SPEI in the Southern Coast of Iran. *Journal of Desert Management* 4(7-8): 54-69. (In Persian with English abstract)
- 7- Byakatonda J., Parida B.P., Moalafhi D.B., and Kenabatho P. 2018. Analysis of long term drought severity characteristics and trends across semiarid Botswana using two drought indices. *Atmospheric Research* 213(2018): 492-508
- 8- Duan J., Zhao L., Wang Q., and Li P. 2019. Detecting breakpoints in global temperature, *Earth System Dynamics* 10: 1-12
- 9- Eghtedar Nezhad M., Bazrafshan O., and Bazrafshan J. 2017. Spatio-temporal variations of meteorological drought using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Iran. *Scientific Journal of Agricultural Meteorology* 5(2): 35-46. (In Persian with English abstract)
- 10- Ghabaei Sough M., Zare Abyaneh H., Mosaedi A., and Samadi, S.Z. 2016. Assessment of humidity conditions and trends based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SEPI) over different climatic regions of Iran. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)* 30(5): 1700-1717. (In Persian with English abstract)
- 11- Ghabaei Sough M., and Mosaedi A. 2018. Analysis of trends and breakpoints in precipitation values in some Watersheds of Iran. 7th National Conference of Water Resources Management of Iran, 24-25 October, 2018. Yazd University. (In Persian)
- 12- Ghorbani Kh., Valizadeh E., and Bararkhanpoor S. 2018. Investigation of spatiotemporal trend of the bivariate meteorological drought index, SPEI, in Iran. *Journal of Desert Management* 6(11): 25-38. (In Persian with English abstract)
- 13- Ghorbani Kh., Bararkhan Poor S., Valizadeh E., and Molaarazi A.J. 2020. Regional analysis of trend and change point in seasonal series of SPEI drought index in Iran. *Journal of Water and Soil Conservation* 27(4): 185-200. (In Persian with English abstract)
- 14- Guo H., Bao A., Liu T., Jiapaer G., Ndayisaba F., Jiang L., Kurban A., and De Maeyer P. 2018. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966-2015. *Journal of Science of the Total Environment* 624: 1523-1538.
- 15- Isaacson DL., and Madsen R. 1976. *Markov Chains: Theory and Applications*. John Wiley, New York.
- 16- Kwarteng F., Shwetha G., and Patil R. 2016. Reconnaissance Drought Index as potential drought monitoring tool in A Deccan Plateau, hot semi-arid climatic zone. *International Journal of Agriculture Sciences* 51(8): 2183-2186.
- 17- Liu Z., Wang Y., Shao M., Jia X., and Li X. 2016. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology* 534: 281-299.
- 18- Lin H., Wang J., Li F., Xie Y., Jiang C., and Sun L. 2020. Drought trends and the extreme drought frequency and characteristics under climate change based on SPI and HI in the upper and middle reaches of the Huai river basin, China. *Water* 12(4): 1100.
- 19- Mahmoudi P., Rigi A., and Miri Kamak M. 2019. A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Journal of Theoretical and Applied Climatology* 137(3-4): 3123-3138.
- 20- Majidi A., Radfar M., Mirabbasi Najafabadi R., and Marofi S. 2018. Analysis of trend Properties of meteorological droughts in Hamedan province. *Journal of Watershed Management Research* 9(17): 295-305. (In Persian with English abstract)
- 21- McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceeding, 8th Conference on Applied Climatology*. January 17-22. January Anaheim, California.
- 22- Moghimi M.M., Kouhi E., and Zarei A.R. 2018. Drought Monitoring and Forecasting, using RDI Index and

- Markov Chain Mathematical Model. *Journal of Irrigation and Water Engineering* 8(3): 153-165. (In Persian with English abstract)
- 23- Mosaedi M., Mohammadi Moghaddam S., and Kavakebi Gh. 2017. Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation* 23(6): 27-52. (In Persian with English abstract)
- 24- Mousavi Baigi M., and Ashraf B. 2018. *Weather and Climate in Agriculture*. Ferdowsi University of Mashhad Press. (In Persian)
- 25- Nouri M., Homaei M., and Bannayan M. 2018. Analyzing the trends of precipitation and drought in some semi-arid to humid regions of Iran. *Journal of Water and Soil Science* 22(1): 45-60. (In Persian with English abstract)
- 26- Parsamehr A.H., Mobin M.H., and Khosravani Z. 2018. Using Run theory to analysis of drought severity – duration – return period (case study: Fars province). *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(2): 471-481. (In Persian with English abstract)
- 27- Pei Z., Fang S., Wang L., and Yang W. 2020. Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in Inner Mongolia, China. *Water* 12(7): 1925.
- 28- Pirnia A., Golshan M., Bigonah S., and Solaimani K. 2018. Investigating the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *Iranian Journal of Ecohydrology* 5(1): 215-228. (In Persian with English abstract)
- 29- Salehpour Jam A., Tabatabaei M., Sarreshtehdari A., and Mosaffaie J. 2018. Investigation of drought characteristics in northwest of Iran using deciles index. *Journal of Watershed Engineering and Management* 10(4): 552-563. (In Persian with English abstract)
- 30- Steinman A. 2003. Drought Indicators and Triggers: A stochastic approach to evaluation. *Journal of the American Water Resources Association* 39(5): 1217-1233.
- 31- Thomas T., Jaiswal R.K., Galkate R.V., and Nayak T.R. 2016. Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand. *Journal of Procedia Technology* 24: 23-30.
- 32- Tigkas D., Vangelis H., and Tsakiris G. 2017. An enhanced effective Reconnaissance Drought Index for the characterisation of agricultural drought. *Environmental Process* 4(1): 137–148.
- 33- Tsakiris G., and Vangelis H. 2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management* 18:1-12.
- 34- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., and López-Moreno J.I. 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7): 1696-1718.
- 35- Vicente-Serrano S.M., López-Moreno J.I., Gimeno L., Nieto R., Morán –Tejeda E., Lorenzo-Lacruz J., Beguería S., and Azorin-Molina C. 2011. A multiscalar global evaluation of the impact of ENSO on droughts. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116: 1-9.
- 36- Yan-Jun I., Xiao-dong Z., Fan L., and Jing MA. 2012. Analysis of drought evolvement characteristics based on standardized precipitation index in the Huaihe river basin. *Journal of Procedia Engineering* 28: 434-437.
- 37- Zarei A.R., Moghimi M.M., and Bahrami M. 2019. Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management* 5(3): 1345-1356.



The Impact of Breakpoints in Rainfall Time Series on Drought Characteristics Changes (Case Study: Tabriz and Arak Stations, Iran)

M. Gaznavi¹- A. Mosaedi^{2*} - M. Ghabaei Sough³

Received: 30-09-2019

Accepted: 19-04-2021

Introduction: Drought is a climatic phenomenon and an integral part of climate fluctuations that occurs periodically and intermittently throughout the world and across all climates. However, the magnitude of this natural hazard in arid and semi-arid regions, such as most parts of Iran, is more acute due to the high sensitivity and weakness of these areas, and its effects may persist for years after the occurrence of drought. Drought is a multifaceted phenomenon as precipitation, temperature, evaporation, wind and relative humidity play important roles in the drought characteristics such as occurrence, severity, and magnitude. Climate change and global warming, and in some cases displacement of meteorological stations cause heterogeneity in time series of meteorological data. Therefore, the purpose of this study was to investigate the homogeneity and break point in precipitation time series data and the effects of a break point in drought characteristics in some synoptic stations in Iran.

Materials and Methods: In this study, homogeneity of rainfall time series data at two time scales of annual (water year) and plant growth periods in some selected synoptic stations of Iran with different climatic conditions was investigated. For this purpose, four tests including Standardized Normal Homogeneity test (SNH), Buishand's Range test (BHR), Buishand's U test (BUR) and Petite's test were applied and the break points were determined. Then, at the stations with break points in the precipitation data series, the drought severity values were determined using four indices of SPI, SPEI, RDI and eRDI, for two periods, (before and after of the break points). Then drought characteristics based on Markov Chain Model and Transition probability matrix including vulnerability, reliability, reversibility and stationary of three condition of droughts (dry, normal and/or wet condition) were determined for the two time scales periods (annual and plant growth periods). Then, the differences between the characteristics for the two periods were investigated. Also, the characteristics of drought-free time intervals for the two periods based on Run's theory were determined and compared.

Results and Discussion: Based on the homogeneity tests, precipitation data of Arak and Tabriz stations for two scales of annual and plant growth periods have break points. According to the results, in the most cases, the second period's reversibility was lower than the first period. Reliability and vulnerability also decreased and increased in all cases in the second period, respectively, compared with the first period. In most cases, there was an increase in stationary of drought in the second period relative to the first period. The rate of change in the probability of survival of the normal and wet condition in both periods was increasing and in some cases decreasing. Regarding the results of Run's theory at the growth periods scale, the average and maximum duration of drought periods increased in all cases in the second period. The minimum, average and maximum severity of drought periods also increased in most cases in the second period. The minimum, average, and maximum values increased in most cases in the second period. On an annual basis, the number of drought periods in most cases has increased in the second period. The average and maximum duration of drought periods increased in all cases in the second period. The minimum, average, and maximum severity of drought periods also increased almost in all cases in the second period. Minimum, average, and maximum of drought magnitude values increased in most cases in the second period with respect to the first one. The minimum, average and maximum values of the drought-free durations (interval time without drought conditions) in most cases were lower in the second period. At the annual scale, the minimum duration of drought was one year in all cases and no change was found between the time slices. The average duration in most cases was lower in the second period.

Conclusion: The results show that the rainfall data of Arak and Tabriz stations have break points in the time

1- Former M.Sc. Student of Watershed Managements, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor in Water Resources Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- Ph.D. in Water Science and Engineering, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran

DOI: 10.22067/jsw.2021.14899.0

scales of plant growth period and annual periods. The reliability was decreasing while the vulnerability of drought was increasing in the second period, indicating an increase in drought occurrence in recent decades. Moreover, the probability of drought stability (stationary) in the second period increased in most cases. The average and maximum duration of drought periods also increased in the second period. The minimum, average, and maximum drought severity, and the minimum, average, and maximum of magnitude of drought periods were higher during the second period. In most cases, the minimum, average, and maximum of severity and magnitude of drought-free time intervals were lower in the second period. In general, difference in the characteristics of drought before and after of precipitation break point can be due to increased evapotranspiration, as a result of global warming, intensifying the effects of drought. Moreover, based on the results of the eRDI index, the climatic conditions became drier in both stations and time periods. In other words, it can be stated that the effective rainfall has decreased to some extent in recent years compared to the early years of the study period. Further studies are needed to assess the changes in drought characteristics in all synoptic stations in the country having long-term data.

Keywords: Breakpoint, eRDI index, RUN theory, Stationary, Transition probability matrix



مقاله پژوهشی

مدل سازی میانگین رطوبت نسبی هوای طلوع تا غروب با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در ساعات مختلف در ایران

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

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۹

چکیده

این پژوهش به مدل سازی الگوهای جدید برای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه در سه ناحیه مختلف اقلیمی ایران و ایستگاه های نمونه پرداخته است. به این منظور از خوشه بندی اقلیمی افزای میانه محور که طبق آن کشور ایران به سه خوشه ساحلی، کوهستانی و بیابانی و نیمه بیابانی تقسیم شده، استفاده و برای تعیین ایستگاه های نمونه، نمونه گیری سیستماتیک انجام شد. داده های مورد نیاز از هر ایستگاه دریافت و الگوهای رگرسیونی خطی پس از غربال و آماده سازی آن ها برازش داده شد. پس از بررسی آماره های لازم و برقراری فرض های زیربنایی برترین الگوها ارائه گردید. تمامی الگوهای ارائه شده جدید در این پژوهش وجود عرض از مبدأ را تأیید می کنند. دامنه عرض از مبدأ الگوهای سه خوشه و ایستگاه های نمونه در بازه ۰/۷۷ تا ۱۴/۴۶ قرار دارد. توانایی بالای الگوهای برآورد میانگین رطوبت نسبی ارائه شده با ضرایب همبستگی (R)، ضرایب تعیین (R^2) و آماره های F به دست آمده، تأیید شد. در اکثر الگوها رطوبت نسبی ساعت ۱۵ در برآورد میانگین رطوبت نسبی موثرتر است. بیشترین تأثیر رطوبت نسبی ساعت ۱۵ با مقدار ۴۵/۳٪ در خوشه بیابانی و نیمه بیابانی برای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه دیده شد. سنجش برتری الگوهای مرسوم نسبت به الگوهای پیشنهادی این پژوهش با معیار میانگین مربع خطا (MSE) انجام شد. نتیجه توانایی بالای الگوهای پیشنهادی در برآورد این میانگین است. برای مثال مقدار میانگین مربعات خطا برای الگوی رطوبت نسبی پیشنهادی اقلیم ساحلی و الگوی مرسوم به ترتیب (۵/۳۴ و ۱۰/۶۱) می باشد که معدل کمترین خطا مربوط به الگوی رطوبت نسبی پیشنهادی برای این خوشه است. لذا استفاده از این الگوها در برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای هر اقلیم و ایستگاه های نمونه آن پیشنهاد می شود.

واژه های کلیدی: الگوی رگرسیونی، رطوبت نسبی، نواحی اقلیمی ایران، نمونه گیری سیستماتیک

مقدمه

راست دارد. دستگاه رطوبت نگار در همه ایستگاه های هواشناسی سطح کشور موجود نیست و میانگین رطوبت نسبی روزانه در ایستگاه ها و مراکز فاقد دستگاه رطوبت نگار با محاسبه میانگین حسابی از سه ساعت استاندارد (۳، ۹ و ۱۵) به وقت گرینویچ برآورد می شود (رابطه ۱). این میانگین گیری به دلیل چولگی منحنی رطوبت نسبی تقریبی بوده و دقت کافی را ندارد. مقادیر واقعی رطوبت نسبی از انتگرال گیری از سطح زیر نموداری که رطوبت نگار رسم می کند محاسبه می شود. اگر میانگین رطوبت نسبی روزانه را هم با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار ترسیم شده توسط رطوبت نگار برای یک روز عادی که هیچ سامانه ای روی منطقه وجود نداشته باشد و هم با الگوهای مرسوم

رطوبت نسبی از مهم ترین و کاربردی ترین متغیرها در علم هواشناسی است. نوسانات مختلف رطوبت نسبی که در طبیعت ایجاد می شود به لحاظ تصمیم گیری ها و برنامه ریزی های منطقی نیازمند بررسی های دقیق تری است. بنابراین شناخت کافی از میزان این متغیر، تغییرات و پیش بینی آن کمک شایانی در زمینه برنامه ریزی دقیق تر در حوضه های مختلف دارد. منحنی رطوبت نسبی با دستگاه های رطوبت نگار که در برخی ایستگاه های هواشناسی وجود دارد رسم می شود. این منحنی شکلی شبیه به یک منحنی تک نمایی ۵ چوله به

^۳ - عضو هیأت علمی گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

DOI: 10.22067/jsw.2021.15050.0

5- skewed curve

۱ و ۲ - به ترتیب کارشناسی ارشد هواشناسی، دانشیار و دکتری هواشناسی، گروه

مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

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

$$S(t) = \sin\left(\pi \frac{t - LSH + \frac{DL}{2}}{DL + 2P}\right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، $S(t)$ تابع بدون بعد زمان، DL طول روز، LSH زمانی که خورشید به حداکثر ارتفاع خود نسبت به مکان مورد نظر روی سطح زمین می‌رسد (این زمان در اسرائیل ۱۱:۰۳، در کالیفرنیا ۱۲:۰۱ و ساعت ۱۳:۰۵ در هلند می‌باشد)، P تأخیر در حداکثر دمای هوا را با توجه به زمان حداکثر ارتفاع خورشید نشان می‌دهد. این تأخیر ناشی از ذخیره سازی گرما در جو و در سطح خاک می‌باشد. الگوی کلی محاسبه رطوبت نسبی روزانه از نسبت بخار آب واقعی هوا (VPA) به فشار بخار آب اشباع (e_s) مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$RH(\%) = 100 * \frac{VPA}{e_s} \quad (5)$$

اکسل^۴ (۳) الگوریتم‌هایی برای شبیه‌سازی رطوبت نسبی از حداقل دمای روزانه در ۲۳ ایستگاه هواشناسی منطقه آلپ ایتالیا توسعه داد. در این پژوهش الگوهای مرسوم برآورد رطوبت نسبی با استفاده از اندازه‌گیری حداقل دمای روزانه و بارش واسنجی شدند.

رضایی‌پژند و همکاران (۸) الگوی جدیدی را برای برآورد میانگین دمای روزانه در مناطق خشک و نیمه خشک ایران ارائه دادند. الگوی ارائه شده پس از استخراج به کمک رابطه همبستگی چند متغیره و به صورت ترکیب خطی از دماهای بیشینه و کمینه روزانه معرفی شده است. برای این کار کلیه ایستگاه‌های دمانگار استان خراسان (شمالی، رضوی و جنوبی) بررسی، تعداد ۱۶ ایستگاه مناسب انتخاب و دوره آماری ۵۷ ساله از سال ۱۳۳۰ تا ۱۳۸۷ به عنوان سال‌های جامعه آماری انتخاب گردید. الگوی جدید دارای عرض از مبدأ و ضرائب جدید برای برآورد میانگین دمای روزانه است.

$$\bar{T} = -1.132 + 0.417T_{\min} + 0.591T_{\max} \quad (6)$$

فرزند و همکاران (۴) الگوهای برآورد میانگین رطوبت نسبی ماهانه و سالانه را با انتخاب ۱۴۹ ایستگاه و خوشه‌بندی ایران برای تعیین ناحیه‌های همگن و هم‌نوا^۵ با استفاده از ۹ عامل هوا و اقلیم‌شناسی در دسترس (دما، بارش، تبخیر، رطوبت نسبی، دامنه تغییرات دمایی سالانه، ارتفاع ایستگاه و سه نمایه اقلیم‌بندی دومارتن، ایوانف و تورنت وایت) برای ناحیه‌ی کوهستانی ایران ارائه دادند.

فرزند و همکاران (۵) الگوهای خطی و غیرخطی (خطی‌پذیر) را برای برآورد رطوبت نسبی ماهانه و سالانه به تفکیک برای ماه‌های مختلف (۱۲ الگو) و برای سالانه (یک الگو) در مناطق ساحلی (خزر،

محاسبه کنیم، اختلاف دقت برآورد دو روش مشخص می‌شود. لذا ارائه الگوهایی که این میانگین را با دقت بیشتری برآورد کنند ضروری است. این پژوهش در نظر دارد با لحاظ کردن مسئله اقلیم الگوهای مناسب برای محاسبه دقیق‌تر این متغیر در سه ناحیه اقلیمی ایران و ایستگاه‌های نمونه ارائه دهد.

$$\overline{RH} = 0.33RH_3 + 0.33RH_9 + 0.33RH_{15} \quad (1)$$

تحقیقات مختلفی در راستای استفاده از این روش و ارزیابی دقت آن انجام شده است. نمونه‌ای از این تحقیقات به شرح زیر است. سازمان تحلیل اقلیم‌های فضایی دانشگاه ایالتی اورگان^۱ (۱۹۹۰) برای محاسبه متوسط رطوبت نسبی روزانه رابطه (۲) را ارائه کرده است که برای ماه‌های مختلف با مقدار واقعی که با انتگرال‌گیری از زیر منحنی رطوبت‌نگار محاسبه می‌شود اختلاف دارد.

$$\overline{RH} = 0.65RH_{\text{morning}} + 0.35RH_{\text{afternoon}} \quad (2)$$

ولوا^۲ و همکاران (۱۵) به تجزیه و تحلیل آماری دما - رطوبت و زمان - رطوبت هوای استوایی در شبه جزیره یوکاتان در مکزیک پرداختند. آنها نشان دادند که تجزیه و تحلیل آماری دما - رطوبت در اقلیم‌های مرطوب حاره‌ای نمی‌تواند به طور دقیق با برآورد مقدار میانگین دما و رطوبت سالانه انجام شود واز مطالعه سیستماتیک تغییرات دما - رطوبت روزانه که به شکل الگوهای با توابع خطی و سهموی هستند اطلاعات بهتری حاصل می‌شود. همچنین اظهار داشتند مقادیر میانگین دما و رطوبت نسبی سالانه را نمی‌توان از تجزیه و تحلیل آماری دما - رطوبت در اقلیم مرطوب گرمسیری مشخص کرد. تغییرات روزانه دما و رطوبت نسبی اطلاعاتی ارائه می‌دهند که می‌توان برای بررسی فرآیندهایی چون تخریب مواد مورد استفاده قرار گرفت. از دیگر نتایج این پژوهش ارائه‌ی الگوهای دما و رطوبت نسبی روزانه به شکل یک تابع خطی برای زمان غروب تا طلوع آفتاب روز بعد و یک تابع سهموی برای زمان طلوع تا غروب آفتاب همان روز است.

اهرات^۳ و همکاران (۲) الگوهای روزانه دمای هوا، تابش، سرعت باد و رطوبت نسبی را از داده‌های روزانه موجود الگوسازی کردند. ایشان رابطه‌ای مشابه رابطه زیر را برای تخمین میانگین دمای روزانه هوا ارائه کردند.

$$T_a = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})S(t) \quad (3)$$

4- Eccel
5- cordancy

1- Oregon State University
2- Veleva
3- Ephrath

قرار دارد. این کشور با وسعت حدود ۱/۶۵ میلیون کیلومتر مربع در جنوب غربی آسیا و در منطقه خاورمیانه واقع گردیده است. ایران کشوری پهناور است که از نظر جغرافیایی ویژگی های خاصی دارد و از لحاظ اقلیمی بسیار متنوع است. حدود ۹۰ درصد خاک ایران در محدوده فلات ایران واقع شده است و کشوری کوهستانی محسوب می شود. آب و هوای ایران بیشترین تأثیر را از رشته کوه های زاگرس که از غرب تا جنوب غربی ایران کشیده شده اند و رشته کوه های البرز که در بخش شمالی ایران واقع شده اند می گیرد.

ایستگاه های سینوپتیک، تخیرسنجی و اقلیم شناسی بسیاری وابسته به سازمان هواشناسی و ایستگاه های باران سنجی معمولی، باران سنجی ذخیره ای و تخیرسنجی وابسته به وزارت نیرو در سطح کشور وجود دارد. دقت نسبی بالاتر و آمار قابل اعتمادتر ایستگاه های سینوپتیک در میان سایر ایستگاه ها، موجب شد از آمار این ایستگاه ها در پژوهش حاضر استفاده شود. فرزندی و همکاران (۱۳۹۰) بنابراین با انتخاب خوشه بندی اقلیمی برای کشور ایران پژوهش حاضر در راستای ارائه الگوهای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای سه ناحیه اقلیمی (خوشه) ایران انجام شده است. روش های مختلفی برای اقلیم بندی وجود دارد. فرزندی و همکاران (۱۳۹۰) کشور ایران را با روش افزایش میانهمحور براساس متغیرهای رطوبت نسبی، دما، بارش و سایر عوامل موثر و مرتبط با رطوبت با استفاده از آمار کامل و دقیق ۱۴۹ ایستگاه همدید در مقیاس زمانی ۲۵ ساله به سه خوشه ساحلی، کوهستانی و بیابانی و نیمه بیابانی تقسیم کردند. این خوشه بندی در مقاله حاضر استفاده شده است. جداول ۱، ۲ و ۳ نتایج ایشان را نشان می دهند. نقشه پهنه بندی ایران برای نمایش بهتر اقلیم هر منطقه در شکل ۱ ارائه شده است. خوشه ساحلی با اعداد ۱، خوشه کوهستانی با اعداد ۲ و خوشه بیابانی و نیمه بیابانی با اعداد ۳ مشخص شده است.

محاسبه میانگین رطوبت نسبی روزانه

برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه با الگوی مرسوم از رابطه (۱) انجام می شود. درحالی که رفتار منحنی رطوبت نسبی در طول شبانه روز یک تابع غیرخطی و نامتقارن است (۴). محاسبه دقیق میانگین رطوبت نسبی در طول شبانه روز با تقسیم سطح زیر منحنی این متغیر بر عدد ۲۴ (ساعات شبانه روز) محاسبه می شود. محاسبه سطح زیر منحنی رطوبت نسبی با انتگرال گیری مطابق رابطه (۶) به دست می آید. $f(t)$ تابع انتگرال پذیر رطوبت نسبی است.

$$\overline{RH} = 0.33RH_3 + 0.33RH_9 + 0.33RH_{15} \quad (6)$$

$$RH_{avg} = \frac{1}{24} \int_0^{24} f(t) dt \quad (7)$$

خلیج فارس و دریای عمان) از روی رطوبت ساعت های استاندارد محلی ایران و متغیرهای بارش روزانه، دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در مناطق ساحلی ارائه کردند.

علاوه بر این، ایشان به برآورد الگوی رطوبت نسبی ماهانه و سالانه به کمک داده های رطوبت ساعت های استاندارد و پارامترهای بارش روزانه، دمای حداقل، حداکثر و میانگین روزانه در مناطق بیابانی و نیمه بیابانی پرداختند. به این منظور تعداد ۱۴۹ ایستگاه همدید ایران با شش عامل هوا و اقلیم شناسی در دسترس (دما، بارش، تبخیر، رطوبت نسبی، دامنه تغییرات دمای سالانه، ارتفاع ایستگاه) به روش افزایش میانهمحور^۱ خوشه بندی و سپس با سه نمایه اقلیم بندی دومارتن، ایوانف و تورنتوایت اقلیم بندی انجام شد.

میرکماندار و همکاران (۸) الگوهای کاربردی جدیدی برای برآورد میانگین دمای روزانه در نواحی مختلف اقلیمی ایران ارائه دادند. ایشان پس از انتخاب ایستگاه های نمونه با روش نمونه گیری سیستماتیک و بررسی صحت و دقت داده های مربوطه، با برازش الگوهای رگرسیونی خطی به داده های دمای روزانه هر ایستگاه منتخب الگوهای برآورد میانگین دمای روزانه را برای هر سه ناحیه اقلیمی ایران و هر یک از ایستگاه های نمونه زیرمجموعه آن ارائه دادند.

تحقیقات فوق بیانگر دقت پایین الگوی برآورد میانگین رطوبت نسبی مرسوم (رابطه ۱) می باشد، بنابراین ارائه الگویی جدید که بتواند میانگین رطوبت نسبی روزانه را با دقت بیشتری برآورد کند ضروری است. پژوهش حاضر با در نظر داشتن این نکات که منحنی رطوبت نسبی شکلی شبیه به یک منحنی تک نمایی چوله به راست دارد و متقارن نیست، دستگاه رطوبت نگار در همه ایستگاه های هواشناسی سطح کشور موجود نیست، مسئله اقلیم منطقه که در برآورد دقیق تر این متغیر نقش بسزایی دارد، برخلاف الگوی برآورد میانگین رطوبت نسبی مرسوم (رابطه ۱) که این نکات را در نظر نگرفته است، همچنین فقط رطوبت نسبی نیمی از ساعات شبانه روز در روش مرسوم در نظر گرفته شده، نه تمامی ساعات (سالنامه های هواشناسی)، بنابراین این پژوهش اقدام مدلسازی میانگین رطوبت نسبی روزانه با استفاده از مقادیر اندازه گیری شده در ساعات مختلف شبانه روز متناسب با اقلیم هر منطقه کرده است. علاوه بر این مدل ها به طور مجزا برای ایستگاه های نمونه زیرمجموعه هر اقلیم نیز ارائه شده اند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه و داده ها

کشور ایران در نیمکره شمالی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی از خط استوا و بین ۴۴ و ۶۳/۵ درجه طول شرقی از نیمروز گرینویچ

منحنی ۲۴ ساعته رطوبت نسبی (نمودار ۱) توسط رطوبت نگار ترسیم می‌شود ولی چون رطوبت نگار در همه ایستگاه‌ها وجود ندارد به همین دلیل منحنی ۲۴ ساعته رطوبت نسبی آن ایستگاه‌ها موجود نیست. ۸ داده رطوبت نسبی سه ساعته در طی شبانه‌روز در دسترس است و به شکل نقاط آبی رنگ روی منحنی ترسیم شده توسط رطوبت نگار (نمودار ۱) نشان داده شده‌اند. با استفاده از روش سیمسون ۸ نقطه‌ای (رابطه ۸) میانگین رطوبت نسبی روزانه هر ایستگاه به طور تقریبی محاسبه می‌شود. بنابراین از این تقریب به عنوان بهترین برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه در پژوهش حاضر استفاده شده است.

داده‌های در دسترس سه ساعته و به وقت گرینویچ می‌باشند. چون داده‌ها در ساعات خاصی (ساعات ۰، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸، ۲۱ و ۲۴) برداشت شده و داده‌های کل ساعات شبانه‌روز موجود نمی‌باشد، بنابراین نزدیک‌ترین تقریب به میانگین واقعی رطوبت نسبی روزانه با انتگرال عددی فوق به روش سیمسون مطابق رابطه (۸) محاسبه می‌شود. این روش در کتب ریاضی یکی از روش‌های دقیق و مشهور محاسبه سطح زیر منحنی با داشتن نقاط آن با معادله حاکم است (۱۴).

$$RH_{avg} \cong \frac{1}{24} \{ RH_0 + 4(RH_3 + RH_9 + RH_{15} + RH_{21}) + 2(RH_6 + RH_{12} + RH_{18}) + RH_{24} \} \quad (8)$$

جدول ۱- نام و شماره ایستگاه‌های خوشه ساحلی ۱۹۸۷-۲۰۱۶ (فرزندی، ۱۳۹۰)

Table 1- Name and number of Coastal cluster stations 1987-2016 (Farzandi, 2011)

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

جدول ۲- نام و شماره ایستگاه های خوشه کوهستانی ۱۹۸۷-۲۰۱۶ (فرزندی، ۱۳۹۰)

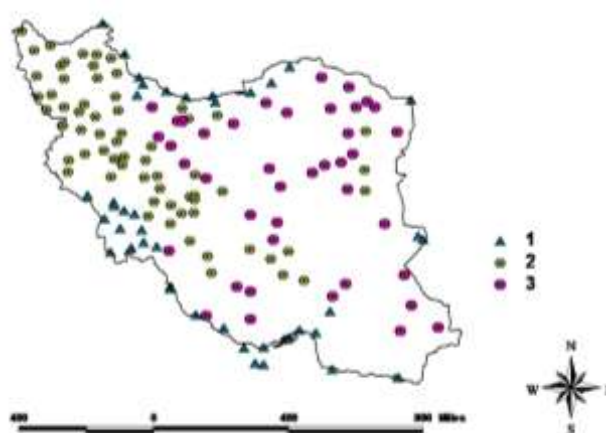
Table 2- Name and number of Mountainous cluster stations 1987-2016 (Farzandi, 2011)

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

جدول ۳- نام و شماره ایستگاه‌های خوشه بیابانی و نیمه‌بیابانی ۱۹۸۷-۲۰۱۶ (فرزندی، ۱۳۹۰)

Table 3- Name and number of Desert and semi-desert cluster stations 1987-2016 (Farzandi, 2011)

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

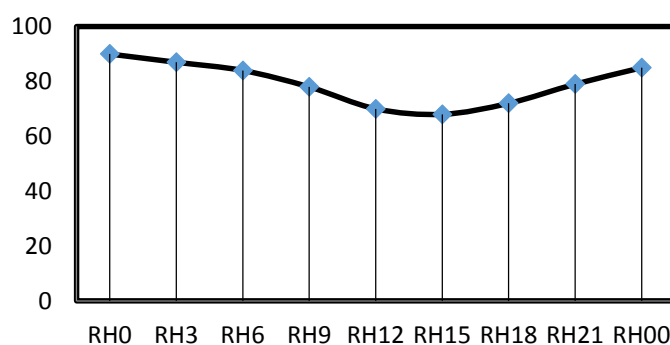


شکل ۱- پهنه‌بندی ایران براساس خوشه‌بندی افزایی میانه محور (فرزندی، ۱۳۹۰)

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

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

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



—◆— میزان رطوبت

Amount of humidity

نمودار ۱- رطوبت نسبی یک روز (۲۴ ساعته) ایستگاه رامسر خوشه اول

Chart 1- Relative humidity of one day (24 hour) of Ramsar station in First cluster

- **الگوهای رگرسیونی:** رگرسیون مطابق رابطه‌ای که میان تعداد متغیرها بررسی می‌شود به دو دسته رگرسیون ساده و رگرسیون چندگانه تقسیم می‌شود. اگر همبستگی فقط دو متغیر X و Y را بررسی کنیم، آن را رگرسیون ساده یا دومتغیره می‌گویند (رابطه ۹). اگر همبستگی یک متغیر Y را با چند متغیر دیگر مانند: $X_1, X_2, \dots, X_n$ و ... بررسی کنیم، به آن رگرسیون چندگانه می‌گویند (رابطه ۱۰).

$$Y = f(X) + E_r \quad (9)$$

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) + E_r \quad (10)$$

تحلیل آماره‌ها در الگوهای رگرسیونی

- **آماره t:** آماره t معنی‌داری ضرائب رگرسیون و مقدار ثابت یا همان عرض از مبدا الگو را آزمون می‌کند. اگر مقدار t محاسبه‌ای از t جدول بیشتر باشد، فرضیه صفر که بیان می‌کند الگو فاقد عرض از مبدا با شیب صفر می‌باشد، رد شده و به این ترتیب عرض از مبدا الگوی رگرسیونی و ضرایب آن صفر نیست. معادله خط رگرسیون:

$$y = B_0 + B_1 x \quad (11)$$

معنی‌داری شیب (B_1) و عرض از مبدا (B_0) معادله فوق به صورت زیر آزمون می‌شود:

$$1) \begin{cases} H_0: B_0 = 0 \\ H_1: B_0 \neq 0 \end{cases} T = \frac{\hat{B}_0}{S(\hat{B}_0)} \gg t_{0.05}^{(n-2)} \quad (12)$$

$$2) \begin{cases} H_0: B_1 = 0 \\ H_1: B_1 \neq 0 \end{cases}$$

$$T = \frac{\hat{B}_1}{S(\hat{B}_1)} \gg t_{0.05}^{(n-2)}$$

- **رگرسیون:** پژوهش حاضر به بررسی و الگوبندی رابطه بین میانگین رطوبت نسبی روزانه با رطوبت سه ساعت استاندارد ۳، ۹ و ۱۵ به وقت گرینویچ می‌پردازد. بنابراین الگوهای رگرسیونی خطی برای انجام این مهم انتخاب و با برازش آن‌ها به داده‌های رطوبت نسبی روزانه، روابط بین این متغیرها به شکل معادلات مبین الگو نمایش داده شدند.

رگرسیون روشی ریاضی و کاربردی است که چگونگی رابطه بین یک متغیر با عنوان متغیر پاسخ یا تابع را با یک یا چند متغیر دیگر با عنوان متغیر مستقل یا پیشگو بررسی و الگوبندی می‌کند. متغیرها در رگرسیون به انواع مختلف قطعی (تعیینی)، غیرقطعی (تصادفی و امکانی)، ابهامی (فازی) و موارد دیگر تقسیم می‌شوند. برای مثال رابطه ارتفاع-مساحت در یک جسم معین از نوع رگرسیون قطعی، رابطه دما-ارتفاع (معادله افت‌آهنگ دما)، باران-ارتفاع (معادله گرا دیان بارش)، تبخیر-دما در یک منطقه، بارش-رواناب، دبی-رسوب، دبی-شوری در یک حوضه آبریز از نوع رگرسیون غیر قطعی و رابطه بین معدل کتبی دیپلم روی نمرات ریاضی، فیزیک و جنسیت داوطلبان آزمون سراسری سال ۱۳۸۷ در قالب رگرسیون ابهامی یا فازی بررسی می‌شود.

رگرسیون وابستگی نمونه‌ای را الگوبندی و نتیجه را به جامعه مربوط به متغیرها تعمیم می‌دهد، تابع ریاضی الگوبندی رابطه یک پدیده قطعی یا غیرقطعی (تصادفی) با یک یا چند پدیده دیگر، مطابق رابطه (۹) یا (۱۰) تعریف شد. معمولاً نمی‌توانیم تمام متغیرهای مؤثر را در الگو دخالت دهیم، زیرا برخی از آنها شناخته شده نیستند یا اطلاعاتی از آنها در اختیار نمی‌باشد. مؤلفه E_r جانشین تمام مواردی است که در نظر نگرفته و از آنها چشم‌پوشی شده است. این مؤلفه را جمله یا مؤلفه تصادفی (اخلال، خطا، مانده یا باقی‌مانده) و تابع $f(x)$ جمله یا مؤلفه قطعی نامیده می‌شود (۹).

این شرایط بیان می‌کند معادله رگرسیونی دارای شیب و عرض از مبدا است. T برابر مقدار محاسبه شده است و $t_{0.05}$ مربوط به جدول است.

- **خطای استاندارد شده ضرایب:** خطای استاندارد شده ضرایب الگو از تقسیم انحراف معیار خطاها به میانگین خطاها مطابق رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود.

$$std. Error = \frac{\delta}{\bar{x}} \quad (13)$$

- **آماره دوربین-واتسون:** رابطه (۱۴) درخصوص بررسی برقراری فرض ناهمبسته بودن باقی‌مانده‌ها استفاده می‌شود. مقادیر این رابطه du از جدول دوربین - واتسون و آماره دوربین - واتسون ارائه شده توسط نرم افزار در جدول خلاصه‌ی الگو است.

$$du < D - W < 4 - du \quad (14)$$

- فرض‌های زیربنایی:

الگوی رگرسیونی خطی پس از بررسی و تأیید در دو مرحله پذیرش می‌شود. مرحله اول برآورد پارامترهای مدل، آزمون‌های لازم شامل تحلیل واریانس و ضریب تعیین است. اگر الگو در مرحله اول رد نشد، مرحله دوم بررسی برقراری فرض‌های زیربنایی است که برقراری این فرض‌ها را بررسی می‌کنیم.

باقی‌مانده‌ها توزیع نرمال دارند.

میانگین باقی‌مانده‌ها صفر است.

باقی‌مانده‌ها واریانس ثابت دارند.

باقی‌مانده‌ها همبستگی پیایی ندارند.

داده پرت کنترل و بررسی شود.

بررسی برقراری این فرضیات در خصوص باقی‌مانده‌ها با آزمون و رسم نمودارهای مناسب صورت می‌گیرد. الگو پس از تأیید این موارد قبول (رد نمی‌شود) و از آن استفاده می‌شود (۹).

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

نتایج و بحث

- **نمونه‌گیری سیستماتیک:** حجم نمونه برآورد شده برای خوشه ساحلی هفت ایستگاه و خوشه‌های کوهستانی و بیابانی و نیمه

بیابانی هریک پنج ایستگاه است. تعداد ایستگاه‌های موجود در هر خوشه زیاد می‌باشد و استفاده از داده‌های همه ایستگاه‌ها در برآورد میانگین دمای روزانه دشوار است. بنابراین مطابق حجم نمونه هر خوشه ایستگاه‌های نمونه با نمونه‌گیری سیستماتیک تعیین شدند. به عنوان مثال حجم خوشه اول ۳۹ ایستگاه و حجم نمونه آن ۷ ایستگاه است. با تقسیم حجم خوشه اول به حجم نمونه آن، فاصله نمونه‌گیری (k) حاصل می‌شود. فاصله نمونه‌گیری برای خوشه اول برابر ۵ است. اولین نمونه به صورت تصادفی (r) از میان فاصله نمونه‌گیری که اینجا از یک تا پنج است، انتخاب می‌شود. عدد دو به شکل تصادفی انتخاب شد. شماره ایستگاه‌های نمونه برگزیده از جدول ۱ به ترتیب ۲، ۷، ۱۲، ۱۷، ۲۲، ۲۷ و ۳۲ می‌باشد. ایستگاه‌های منتخب خوشه ساحلی (اول) به ترتیب: آستارا، بندرعباس، رامسر، بندرانزلی، بابلسر، گرگان و رشت هستند. نمونه‌گیری سیستماتیک به همین روش برای خوشه‌های دوم و سوم انجام و ایستگاه‌های نمونه در هر خوشه مطابق حجم نمونه مشخص شد. ایستگاه‌های منتخب خوشه کوهستانی (دوم) به ترتیب: کرمانشاه، ارومیه، سیرجان، شهرکرد و زنجان می‌باشد و ایستگاه‌های منتخب خوشه بیابانی و نیمه بیابانی (سوم) به ترتیب: فسا، فرودگاه مهرآباد، قم، یزد و زاهدان هستند. ایستگاه‌های منتخب براساس ۹ ویژگی مهم و قابل دسترس در هر خوشه قرار گرفتند. این عوامل شش متغیر دما، بارش، تبخیر، رطوبت نسبی و دامنه تغییرات دمای سالانه، ارتفاع ایستگاه و سه نمایه اقلیم بندی دومارتن، ایوانف و تورنت وایت هستند. این ۹ ویژگی شباهت بین ایستگاه‌های درون هر خوشه را به خوبی نشان می‌دهد. مشخصات ایستگاه‌های نمونه هر یک از سه خوشه در جدول ۴ آورده شده است.

-تحلیل و بررسی صحت داده‌ها: داده‌های سه ساعته

رطوبت نسبی ایستگاه‌های منتخب هر خوشه به وقت گرینویچ برای ۳۰ سال اخیر (۲۰۱۶-۱۹۸۷) (جدول ۴) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. بررسی دقت و صحت داده‌ها اولین گام در راستای انجام هر تحلیلی است. به این منظور دقت و صحت ۸۷ هزار داده رطوبت نسبی برای هر ایستگاه بررسی شد. به این منظور مقادیر کمینه و بیشینه‌ی رطوبت نسبی ماهانه هر ایستگاه از سایت سازمان هواشناسی مربوطه برای تعیین حدود اطمینان داده‌ها در هر ماه دریافت شدند و با روش فیلتر کردن در نرم‌افزار اکسل غربال داده‌های هر ایستگاه انجام شد. با روش فیلتر کردن مقادیر رطوبت نسبی هر ساعت با همان ساعت در روز قبل و بعد مقایسه شده، داده‌هایی که در حدود اطمینان هر ماه برای هر ایستگاه قرار نداشتند داده پرت خوانده شده و حذف شدند. نظر به اینکه شرایط نرمال است و هیچ سامانه‌ای روی منطقه وجود ندارد، داده‌های گمشده‌ای که برای هر روز شناسایی و داده‌های پرتی که حذف شدند با الگوگیری از منحنی‌های ترسیم شده‌ی روز قبل و بعد و با درون‌یابی خطی یا لگاریتمی برآورد شدند. جدول ۵

نمونه‌ای از داده‌های پرت رطوبت نسبی ایستگاه رامسر را نشان می‌دهد که برای برآورد این داده‌ها بهترین تقریب را به دست آمد. نتیجه برآورد داده‌های پرت این جدول پس از غربال در جدول ۶

نمایش داده شده است. RH0 بیانگر رطوبت نسبی ساعت ۱۲ امشب و RH00 بیانگر رطوبت نسبی ساعت ۱۲ شب، روز بعد است.

جدول ۴- مشخصات ایستگاه‌های نمونه خوشه اول، دوم و سوم
Table 4- Specifications of the First, Second and Third cluster sample stations

ردیف Row	نام ایستگاه Station name	اقلیم ایستگاه Station climate	استان State	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (m) Elevation
1	آستارا Astara	اقلیم ساحلی Coastal climate	گیلان Gilan	38.36	48.85	-21.1
2	بندرعباس Bandar Abbas	اقلیم ساحلی Coastal Climate	هرمزگان Hormozgan	27.21	56.37	9.8
3	رامسر Ramsar	اقلیم ساحلی Coastal Climate	مازندران Mazandaran	36.90	50.68	-20
4	بندرانزلی Bandar Anzali	اقلیم ساحلی Coastal Climate	گیلان Gilan	37.47	49.46	-23.6
5	بابلسر Babolsar	اقلیم ساحلی Coastal Climate	مازندران Mazandaran	36.72	52.65	-21
6	گرگان Gorgan	اقلیم ساحلی Coastal Climate	گلستان Golestan	36.90	54.41	0
7	رشت Rasht	اقلیم ساحلی Coastal Climate	گیلان Gilan	37.32	49.62	-8.6
8	کرمانشاه Kermanshah	اقلیم کوهستانی Mountnal Climate	کرمانشاه Kermanshah	34.35	47.15	1318
9	ارومیه Urmia	اقلیم کوهستانی Mountnal Climate	آذربایجان غربی West Azarbaijan	37.65	45.05	1328
10	سیرجان Sirjan	اقلیم کوهستانی Mountnal Climate	کرمان Kerman	29.46	55.68	1739
11	شهرکرد Shahrekord	اقلیم کوهستانی Mountnal Climate	چهارمحال و بختیاری Chaharmahal va Bakhtiari	32.29	50.84	2048
12	زنجان Zanjan	اقلیم کوهستانی Mountnal Climate	زنجان Zanjan	36.66	48.52	1659
13	فسا Fasa	اقلیم خشک و نیمه خشک Arid and Semi Arid Climate	فارس Fars	28.89	53.72	1268
14	فرودگاه مهرآباد Mehrabad Airport	اقلیم خشک و نیمه خشک Arid and Semi Arid Climate	تهران Tehran	35.69	51.31	1191
15	قم Qom	اقلیم خشک و نیمه خشک Arid and Semi Arid Climate	قم Qom	34.77	50.85	879
16	یزد Yazd	اقلیم خشک و نیمه خشک Arid and Semi Arid Climate	یزد Yazd	31.90	54.28	1230
17	زاهدان Zahedan	اقلیم خشک و نیمه خشک Arid and Semi Arid Climate	سیستان و بلوچستان Systan va Baluchestan	29.47	60.90	1370

جدول ۵- نمونه‌ای از داده‌های پرت رطوبت نسبی ایستگاه رامسر از خوشه اول

Table 5- An example of relative humidity irrelevant data in Ramsar station of the first cluster

نام ایستگاه Station name	سال Year	ماه Month	روز Day	RH0	RH3	RH6	RH9	RH12	RH15	RH18	RH21	RH00
رامسر Ramsar	1988	3	19	94	17	82	80	77	84	91	94	93
رامسر Ramsar	1992	2	5	92	89	87	75	72	88	42	88	4
رامسر Ramsar	1993	10	13	89	86	40	1	31	68	78	76	71
رامسر Ramsar	2000	1	25	96	100	96	16	16	18	19	24	25
رامسر Ramsar	2006	3	8	100	100	92	87	89	87	87	11	16

جدول ۶- داده‌های پرت رطوبت نسبی ایستگاه رامسر از خوشه اول پس از غربال

Table 6- An example of relative humidity irrelevant data in Ramsar station of the first cluster after screening the data

نام ایستگاه Station name	سال Year	ماه Month	روز Day	RH0	RH3	RH6	RH9	RH12	RH15	RH18	RH21	RH00
رامسر Ramsar	1988	3	19	94	89	82	80	77	84	91	94	93
رامسر Ramsar	1992	2	5	92	89	87	75	72	88	88	88	90
رامسر Ramsar	1993	10	13	89	86	71	70	68	68	78	76	71
رامسر Ramsar	2000	1	25	96	100	96						
رامسر Ramsar	2006	3	8	100	100	92	87	89	87	87	91	94

استاندارد برآورد الگوها، تأییدی بر این موضوع است.

همچنین در تحلیل واریانس متغیر RH9 با بیشترین همبستگی با متغیر پاسخ اولین ورودی به الگو است. مقدار آماره فیشر از F جدول بیشتر شده و مقدار احتمال p-value در سطح خطای ۵٪ کمتر از ۰/۰۵ است، به این معنی که سومین الگوی رگرسیونی خطی برازش داده شده معنی‌دار است. جدول ضرایب الگوها (جدول ۷) شامل ضرایب استاندارد نشده (B)، خطای استاندارد شده ضرائب الگو، ضرایب استاندارد شده (Beta)، آماره t و مقادیر احتمال مربوطه می‌باشد. در ضرایب استاندارد نشده مقیاس متغیرها با یکدیگر یکسان نیست در صورتی که در ضرایب استاندارد شده مقیاس‌ها یکسان شده و امکان مقایسه متغیرها وجود دارد. مطابق ضرایب ارائه شده در جدول الگوی میانگین رطوبت نسبی روزانه (رابطه ۱۵) و رابطه‌ی تحلیل حساسیت الگو در برآورد رطوبت نسبی برای خوشه اول (رابطه ۱۶) به این صورت است.

$$RH_{avg} = 10.372 + 0.309 RH3 + 0.255RH9 + 0.324RH15 \quad (15)$$

$$RH_{avg} = 0.269 RH3 + 0.328RH9 + 0.403RH15 \quad (16)$$

- تحلیل الگوهای رگرسیونی رطوبت نسبی خوشه اول:

الگوی رگرسیونی خطی چندگانه به روش گام به گام در نرم افزار spss به منظور بدست آوردن رابطه رگرسیونی بین میانگین رطوبت نسبی روزانه (RH_{avg}) با عنوان متغیر پاسخ و متغیرهای رطوبت نسبی سه ساعت استاندارد ۳، ۹ و ۱۵ گرینویچ (۳:۳۰، ۱۲:۳۰ و ۱۸:۳۰ به وقت محلی) به ترتیب با نماد RH3، RH9 و RH15 با عنوان متغیرهای پیشگو استفاده شدند.

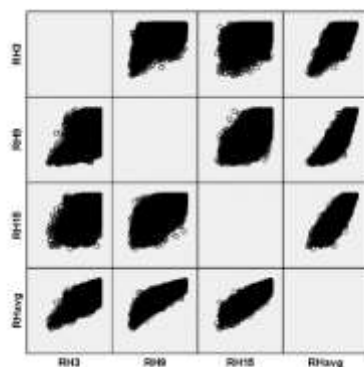
گام اول تحلیل و بررسی رابطه بین متغیرهای پیشگو و پاسخ است. به این منظور با رسم شکل پراکنش ماتریسی، که رفتار هریک از متغیرها در مقابل دیگری را نمایش می‌دهد به روش هندسی-ریاضی به اثبات رابطه بین متغیرها پرداخته شد. مطابق شکل ۲ رابطه تقریباً خطی و مستقیم بین همه متغیرها ملاحظه می‌شود.

مقدار ضریب تعیین برای الگوی پذیرفته شده ۰/۹۷۵ است به این معنی که فقط ۲/۵ درصد تغییرات متغیر پاسخ توسط متغیرهای پیشگو بیان نمی‌شود. این مقادیر توانایی مناسب الگو در برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه این اقلیم را نشان می‌دهد. مقدار کم خطای

فرض های زیربنایی برقرار باشند موجب پذیرش نهایی الگوهای رگرسیونی میانگین رطوبت نسبی روزانه اقلیم ساحلی می گردد. فرض استقلال باقی مانده ها با قرار داشتن مقدار آماره دوربین-واتسون در بازه ۱/۷۴ تا ۲/۳۶ تأیید می شود (۱). جدول ۸ میانگین باقی مانده ها را صفر نشان می دهد. نوار مستطیلی افقی حاصل از پراکندگی نقاط، مطابق نمودار ۲ ثابت بودن واریانس باقی مانده ها را تأیید می کند. برقراری فرض های زیربنایی پذیرش نهایی الگوی رگرسیونی برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه را برای اقلیم ساحلی (خوشه اول) به همراه داشت. الگوهای برآورد رطوبت نسبی روزانه برای ایستگاه های نمونه این اقلیم پس از آزمون های لازم در مورد رگرسیون، بررسی فرض های زیربنایی و پذیرش برقراری آن ها ارائه گردید. مقادیر بالای ضریب تعیین توان بالای الگوها در برآورد میانگین رطوبت نسبی مربوطه را نشان می دهند. نتایج نهایی الگوهای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای اقلیم ساحلی و هر یک از ایستگاه های نمونه در جدول ۹ ارائه شده است.

ضریب استاندارد شده (Beta)، بیانگر میزان تأثیر هر یک از متغیرهای پیشگو بر متغیر پاسخ است. رابطه ی تحلیل حساسیت (رابطه ۱۶) با حذف عرض از مبدأ به طور مستقیم میزان تأثیر هر یک از متغیرهای پیشگو را بر متغیر پاسخ بیان می کند. مطابق این رابطه ضریب متغیرهای رطوبت نسبی در ساعات ۳، ۹ و ۱۵ گرینویچ به ترتیب ۲۶/۹٪، ۳۲/۸٪ و ۴۰/۳٪ است. از تقسیم این درصدها به یکدیگر میزان اهمیت و تأثیر هر متغیر نسبت به دیگری مشخص می شود. به این صورت که رطوبت نسبی ساعت ۱۵ نسبت به رطوبت نسبی ساعت ۹، ۱/۲۳ و نسبت به ساعت ۳، ۱/۴۹ برابر اهمیت دارد. به همین ترتیب رطوبت نسبی ساعت ۹ نسبت به رطوبت نسبی ساعت ۳، ۱/۲۲ برابر از اهمیت بیشتری برخوردار است. بنابراین می توان نتیجه گرفت RH15 حساس ترین و RH3 کم ترین حساسیت را دارد. الگوهای راجع حساسیت این سه متغیر را در برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه یکسان فرض کرده اند.

- بررسی برقراری فرض های زیربنایی: در صورتی که



شکل ۲- پراکنش ماتریسی رفتار متغیرهای رطوبت نسبی ورودی الگوی خوشه اول در برابر یکدیگر

Figure 2- Matrix dispersion characteristics of the behavior of input variables in the first cluster pattern against each other

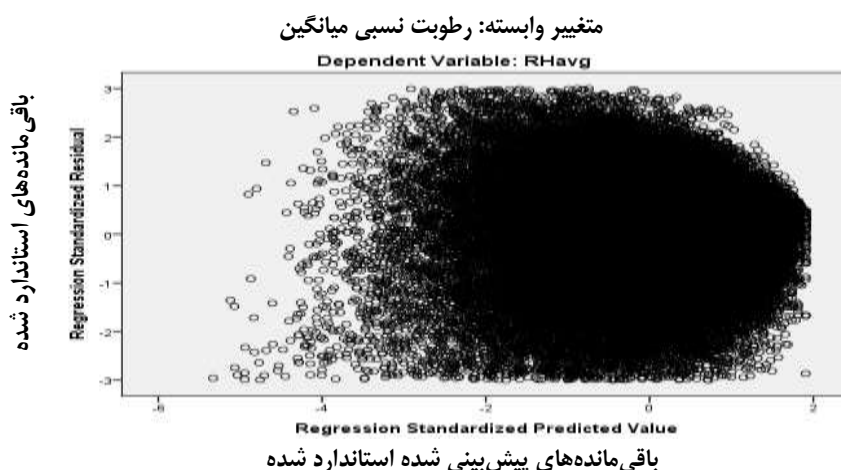
جدول ۷- جدول ضرایب الگوهای رطوبت نسبی خوشه اول، آماره t و اندازه احتمال

Table 7- The coefficients relative humidity patterns of the first cluster, t values and probability values

الگو Model	ضرایب استاندارد نشده Unstandardized coefficients		ضرایب استاندارد شده Standard coefficient	t	p-value
	B	Std.Error	Beta		
1(Constant)	40.118	0.072		558.351	0.000
RH9	0.577	0.001	0.901	564.684	0.000
2(Constant)	26.972	0.065		417.360	0.000
RH9	0.340	0.001	0.531	327.111	0.000
RH15	0.380	0.001	0.492	303.060	0.000
3(Constant)	10.372	0.054		192.667	0.000
RH9	0.255	0.001	0.398	419.325	0.000
RH15	0.324	0.001	0.419	459.802	0.000
RH3	0.309	0.001	0.309	411.000	0.000

جدول ۸- مشخصات باقی مانده های الگوی سوم رطوبت نسبی خوشه اول
Table 8- The residual of the third relative humidity pattern in the first cluster

	مینیمم Minimum	ماکزیمم Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation
Residual	-4.9682	4.9638	0.000	1.6561
Std. Residual	-3.000	2.997	0.000	1.000



نمودار ۲- پراکنش باقی مانده های استاندارد شده الگوی سوم رطوبت نسبی خوشه اول
Chart 2- Standardized residuals distribution of the third relative humidity pattern in the first cluster

جدول ۹- جدول الگوی نهایی برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای خوشه اول و هر یک از ایستگاه های نمونه
Table 9- Final estimating daily average of relative humidity patterns for the first cluster and each sample station

	الگوی نهایی میانگین رطوبت نسبی روزانه Final daily average of relative humidity pattern	R ²	Std. Err	Durbin- Watson	F	P- valu
خوشه اول First cluster	$RH_{avg} = 10.372 + 0.309RH_3 + 0.255RH_9 + 0.324RH_{15}$	0.975	1.825	1.825	945891.4	.000
آستارا Astara	$RH_{avg} = 14.463 + 0.265RH_3 + 0.265RH_9 + 0.314RH_{15}$	0.964	1.765	1.853	95585.0	.000
بندرعباس Bandar Abbas	$RH_{avg} = 7.451 + 0.298RH_3 + 0.290RH_9 + 0.332RH_{15}$	0.960	1.894	1.782	84921.3	.000
رامسر Ramsar	$RH_{avg} = 9.238 + 0.269RH_3 + 0.299RH_9 + 0.334RH_{15}$	0.962	1.938	1.921	90412.3	.000
بندرانزلی Bandar Anzali	$RH_{avg} = 10.519 + 0.271RH_3 + 0.271RH_9 + 0.346RH_{15}$	0.971	1.954	1.845	118917.8	.000
بابلسر Babolsar	$RH_{avg} = 13.271 + 0.278RH_3 + 0.251RH_9 + 0.328RH_{15}$	0.955	1.887	1.769	77064.2	.000
گرگان Gorgan	$RH_{avg} = 11.904 + 0.341RH_3 + 0.246RH_9 + 0.285RH_{15}$	0.976	1.986	1.826	144830.4	.000
رشت Rasht	$RH_{avg} = 17.095 + 0.283RH_3 + 0.247RH_9 + 0.290RH_{15}$	0.978	2.132	1.952	157483.9	.000

جدول ۱۰- جدول الگوی نهایی برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای خوشه دوم و هر یک از ایستگاه های نمونه

Table 10- Final estimating daily average of relative humidity patterns for the second cluster and each sample station

الگوی نهایی میانگین رطوبت نسبی روزانه		R2	Std .Err	Durbin-Watson	F	P-value
Final daily average of relative humidity pattern						
خوشه دوم						
Second cluster	$RH_{avg} = 2.085 + 0.416RH_3 + 0.219RH_9 + 0.361RH_{15}$	0.985	2.5	1.815	1121839.8	.000
کرمانشاه						
Kermanshah	$RH_{avg} = 0.964 + 0.431RH_3 + 0.193RH_9 + 0.385RH_{15}$	0.992	2.0	2.125	410948.4	.000
ارومیه						
Urmia	$RH_{avg} = 6.806 + 0.356RH_3 + 0.232RH_9 + 0.347RH_{15}$	0.972	2.6	1.845	123989.3	.000
شهرکرد						
Shahrekord	$RH_{avg} = 4.488 + 0.383RH_3 + 0.234RH_9 + 0.346RH_{15}$	0.976	2.7	1.876	144342.4	.000
سیرجان						
Sirjan	$RH_{avg} = 1.221 + 0.386RH_3 + 0.220RH_9 + 0.407RH_{15}$	0.987	1.8	2.011	276019.8	.000
زنجان						
Zanjan	$RH_{avg} = 4.646 + 0.381RH_3 + 0.229RH_9 + 0.349RH_{15}$	0.975	2.6	1.978	139019.7	.000

جدول ۱۱- جدول الگوی نهایی برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه برای خوشه سوم و هر یک از ایستگاه های نمونه

Table 11- Final estimating daily average of relative humidity patterns for the third cluster and each sample station

الگوی نهایی میانگین رطوبت نسبی روزانه		R2	Std .Err	Durbin-Watson	F	P- valu
Final daily average of relative humidity pattern						
خوشه سوم Third cluster	$RH_{avg} = 1.336 + 0.404RH_3 + 0.158RH_9 + 0.438RH_{15}$	0.992	1.7	1.868	2193991.6	.000
فسا Fasa	$RH_{avg} = 1.821 + 0.426RH_3 + 0.156RH_9 + 0.412RH_{15}$	0.992	1.8	1.927	418147.3	.000
مهرآباد Mehrabad Airport	$RH_{avg} = 2.416 + 0.334RH_3 + 0.223RH_9 + 0.425RH_{15}$	0.991	1.7	1.943	369299.1	.000
قم Qom	$RH_{avg} = 1.848 + 0.411RH_3 + 0.176RH_9 + 0.408RH_{15}$	0.991	1.9	2.100	410373.7	.000
یزد Yazd	$RH_{avg} = 0.777 + 0.369RH_3 + 0.184RH_9 + 0.461RH_{15}$	0.994	1.3	2.058	615705.2	.000
زاهدان Zahedan	$RH_{avg} = 1.283 + 0.372RH_3 + 0.181RH_9 + 0.461RH_{15}$	0.992	1.5	1.824	407626.9	.000

- تحلیل الگوهای رگرسیونی رطوبت نسبی خوشه های دوم

و سوم: الگوهای رگرسیونی میانگین رطوبت نسبی روزانه خوشه های دوم و سوم مطابق خوشه اول برآورد شدند. شرح کامل نتایج و نحوه ارائه الگوها در بخش تحلیل الگوهای رگرسیونی رطوبت نسبی خوشه اول ارائه شده است. بنابراین از شرح مجدد در خصوص خوشه های دوم و سوم خودداری شده است. نتایج در جداول ۱۰ و ۱۱ ارائه شدند.

- صحت سنجی الگوها: دقت و توان بالای الگوهای میانگین

رطوبت نسبی روزانه پیشنهادی برای سه اقلیم مورد نظر پس از مقایسه این الگوها با الگوهای مرسوم مطابق معیار میانگین مربعات خطاها (MSE) تأیید شد. مقایسه ی عملی الگوهای ارائه شده برای

هر خوشه و هر یک از شهرهای نمونه زیر مجموعه با الگوی مرسوم در جداول ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. معیار کاربردی بودن الگوها میانگین مربع خطاها (MSE) می باشد. MSE_1 و MSE_2 به ترتیب میانگین مربع خطا برای الگوی قدیمی رایج و الگوهای پیشنهادی پژوهش حاضر است. نتایج ارائه شده در جداول برتری الگوهای پیشنهادی رطوبت نسبی و خطای کمتر آن ها نسبت به الگوی (۱) را بیان می کنند. برای مثال مقدار میانگین مربعات خطا برای الگوی رطوبت نسبی پیشنهادی اقلیم ساحلی و الگوی مرسوم به ترتیب (۵/۳۴ و ۱۰/۶۱) می باشد که کمترین خطا مربوط به الگوی رطوبت نسبی پیشنهادی برای این خوشه است.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین رطوبت نسبی خوشه اول به روش معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با معیار MSE

Table 12- Comparison of average relative humidity in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by criterioning MSE

رطوبت نسبی Relative humidity	خوشه اول First cluster	آستارا Astara	بندرعباس Bandar Abbas	رامسر Ramsar	بندر انزلی Bandar Anzali	بابلسر Babolsar	گرگان Gorgan	رشت Rasht
MSE ₁	10.61	9.5	13.49	4.51	4.1	8.1	21.20	13.25
MSE ₂	5.34	3.83	6.6	2.66	2.38	2.30	3.76	2.52

جدول ۱۳- مقایسه میانگین رطوبت نسبی خوشه دوم به روش معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با معیار MSE

Table 13- Comparison of average relative humidity in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by criterioning MSE

رطوبت نسبی Relative humidity	خوشه دوم Second cluster	کرمانشاه Kermanshah	ارومیه Urmia	شهرکرد Shahrekord	سیرجان Sirjan	زنجان Zanjan
MSE ₁	22.37	17.62	27.59	5.28	8.2	15.13
MSE ₂	6.78	5.92	6.65	0.00	0.00	0.00

جدول ۱۴- مقایسه میانگین رطوبت نسبی خوشه سوم به روش معمول و روش پیشنهادی در این مقاله با معیار MSE

Table 14- Comparison of average relative humidity in the first cluster using the conventional method and the proposed method in this paper by criterioning MSE

رطوبت نسبی Relative humidity	خوشه سوم Third cluster	فسا Fasa	مهرآباد Mehrabad	قم Qom	یزد Yazd	زاهدان Zahedan
MSE ₁	15.51	9.23	8.36	16.44	8.57	12.48
MSE ₂	4.77	0.00	0.00	3.95	4.00	3.71

نتیجه گیری

آماره فیشر محاسبه شده در تمامی جداول تحلیل واریانس از آماره فیشر جدول بیشتر بوده، پس معنی دار بودن الگوی رگرسیونی برای تمام معادلات مبین الگو مورد تأیید است.

الگوهای ارائه شده در برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه با رعایت اصول ریاضی حاکم بر رگرسیون به دست آمده اند، درحالی که الگوهای مرسوم چنین اصولی را رعایت نکرده اند، بنابراین می توان نتیجه گرفت که الگوهای پیشنهادی این تحقیق نسبت به آنها توانا تر هستند. الگوهای جدید این پژوهش برخلاف سایر الگوهای مرسوم که در ابتدا ذکر شد وجود عرض از مبدأ را تأیید کرده و هر الگو متناسب با اقلیم مربوطه ارائه شده است. درحالی که الگوهای مرسوم و قدیمی برای اقلیم های مختلف یکسان بوده است. براساس اکثر الگوها رطوبت نسبی ساعت ۱۵ در برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه موثرتر است، پس در صورتی که بخواهیم یک لحظه خاص از شبانه روز را تقریباً برابر میانگین رطوبت نسبی روزانه در نظر بگیریم رطوبت نسبی ساعت ۱۵ می تواند به مقدار میانگین روزانه نزدیک باشد و تقریباً برابر آن در نظر گرفته شود. برخلاف الگوی مرسوم (رابطه ۱) که در آن رطوبت نسبی ساعت ۱۵ نسبت به دو ساعت ۳ و ۹ تأثیر یکسانی دارد. بنابراین استفاده از الگوهای اصلاح شده پیشنهادی این پژوهش متناسب با

تغییرات روزانه رطوبت نسبی در یک روز عادی بدون وجود هیچ سامانه ای شکلی شبیه به یک منحنی چوله به راست دارد (سالنامه های هواشناسی). بنابراین استفاده از ضرایب مساوی برای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه خطا دارد. همچنین مسئله تأثیر اقلیم بر الگوهای رفتاری تغییرات رطوبت نسبی روزانه در روش های موجود مورد توجه قرار نگرفته است. لذا هدف این پژوهش ارائه الگوهای جدید برای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه در سه ناحیه اقلیمی ایران و ایستگاه های نمونه مربوطه است. مشاهدات حاصل از منابع، جداول و نمودارها حاکی از آن است، در منابع مختلف وجود عرض از مبدأ در الگوهای رایج برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه را صفر و وزن متغیرهای پیشگو برابر فرض شده اند. درحالی که نتایج ارائه شده در این پژوهش وجود عرض از مبدأ را در تمام الگوها تأیید می کند. ضرایب استاندارد شده (Beta) متغیرهای پیشگو بیانگر نابرابری وزن این متغیرها در تمامی الگوها است. ضرایب همبستگی محاسبه شده در جداول خلاصه ای الگو بیانگر رابطه خطی و مستقیم بین متغیرها است. همچنین ضرایب تعیین و خطای استاندارد برآورد الگو در این جداول توان بالای الگو در برآورد میانگین های مربوطه را نشان می دهند.

مختلف استفاده می شود. واسنجی و مقایسه الگوهای رطوبت نسبی پیشنهادی برای این سه اقلیم با الگوهای رطوبت نسبی مرسوم توان بالای الگوهای پیشنهادی این تحقیق را نشان می دهد.

پیشنهاد می شود روش پژوهش حاضر برای برآورد میانگین رطوبت نسبی ماهانه و سالانه همچنین دمای روزانه، ماهانه و سالانه برای هر اقلیم و ایستگاه های نمونه استفاده شود. همچنین خوشه بندی اقلیمی در مقیاس استانی انجام شود.

اقلیم و ایستگاه مربوطه موجب کاهش خطای برآورد میانگین رطوبت نسبی روزانه می گردد. زیرا رطوبت نسبی یکی از متغیرهای مهم جوی است که در مطالعات و پژوهش های کشاورزی، سدسازی، الگوهای ریاضی برآورد رواناب رودخانه ها، شهرسازی، خوردگی فلزات در صنایع، تعیین منطقه آسایش در معماری و طراحی منازل مسکونی، اداری، کارخانجات و غیره استفاده می شود. افزون بر این رطوبت نسبی یکی از عوامل اصلی در تعیین تبخیر از سطح آزاد آب و تبخیر و تعرق است. معمولاً از کمیت های میانگین روزانه، ماهانه و سالانه برای کاربردهای

منابع

- 1- Akhavan M. 2014. Hypothesis testing with software SPSS. First Edition.
- 2- Eccel E. 2012. Estimate air humidity from temperature and precipitation measures for modelling applications. *Meteorological Applications* 19: 118-128.
- 3- Ephrath J.E., Goudrian J., and Marani A. 1996. Modelling diurnal patterns of air temperature, radiation, wind speed and relative humidity by equations from daily characteristics. *Agricultural Systems* 377-393.
- 4- Farzandi M., Sanaeinejad H., Rezaee-Pazhand H., and Ghahraman B. 2012. Patterns to estimate the average daily relative humidity in Iranian coastal regions. 10th International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures, held on November 20, 2012.
- 5- Farzandi M., Sanaeinejad H., Rezaee-Pazhand H., and Ghahraman B. 2013. Patterns to estimate the average daily relative humidity in arid and semiarid regions of Iran, 56-66.
- 6- Kukal M., and Irmak S. 2016. Long-term patterns of air temperatures, daily temperature range, precipitation, grass-reference evapotranspiration and aridity index in the USA great plain. *Journal of Hydrology* 542: 978-1001.
- 7- Mehdizadeh S., Behmanesh J., and Khalili K. 2016. Application of gene expression programming to predict daily dew point temperature. *Applied Thermal Engineering* 9383: 1-26.
- 8- Mirkamandar B., Sanaeinejad H., Rezaee-Pazhand H., and Farzandi M. 2020. Regression Patterns of Diurnal Temperature in Different Climatic Regions of Iran. *Journal of Water and Soil* 34: 1141-1156. (in Persian with English abstract)
- 9- Rezaee-Pazhand H. 2001. Application of statistics and probabilities in water resources, Azad University of Mashhad.
- 10- Rezaee-Pazhand H., Habibi M., and Farzandi M. 2008. Mean Daily Temperature Pattern for Arid and Semi-arid Zones in Iran. *Iran Water Resources Research* 1: 70-74. (in Persian with English abstract)
- 11- Rezaee-Pazhand H. 2012. New Patterns to estimate the average daily relative humidity in mountainous regions of Iran. *Journal of Climate Research* 11: 100-112.
- 12- Statistical yearbooks, 1350, Meteorological Organization of Iran.
- 13- Stull R. 2011. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 2267-2269.
- 14- Totonian F. 1992. Numerical methods for mathematic science and engineering. Khorasan publisher.
- 15- Unal Y., Kindop T., and Karaca M. 2003. Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. *International Journal of Climatology* 23: 1045-1055.
- 16- Veleza L. Perez G., and Acosta M. 1997. "Statistical analysis of the temperature-humidity complex and tima of wetness of a tropical climate in the Yucatan Peninsula in Mexico" 97310 Mtrida, Yucatan, Mexico, *Journal of Atmospheric Enviroment* 5: 773-776.
- 17- Yao A.Y.M. 1974. A Statistical model for relative humidity. Environmental Data Service, NOAA, Washington, D.C. 20235, 14-23.



Modeling Average Relative Humidity of Sunrise to Sunset Using Values Measured at Different Hours in Iran

B. Mirkamandar^{1*} - H. Sanaeinejad² - H. Rezaee-Pazhand³ - M. Farzandi⁴

Received: 04-11-2020

Accepted: 19-05-2021

Introduction: The behavior of daily changes of relative humidity is quite variable. We first draw the curve of this variable on a normal day. And it can be seen that the distribution of this variable is not normal. The curve of this variable is a skewed curve to the right. Therefore, the equal coefficients could be used only as an approximation for estimating the daily average of relative humidity. Climatic conditions of the meteorological stations are also another parameter to be considered. This research presents a new method for estimating the daily average of relative humidity in three climatic regions of Iran. The patterns for the sample stations in each climatic region were presented separately.

Materials and Methods: E. Eccel (2012) developed an algorithm to simulate the relative humidity of the minimum daily temperature in 23 weather stations in the ALP region of Italy. In this research, the base pattern was calibrated by temperature and precipitation measurement. Ephrath, et al. (1996) developed a method for the calculation of diurnal patterns of air temperature, wind speed, global radiation, and relative humidity from available daily data. During the day, the air temperature was calculated by:

$$T_a = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min})S(t) \quad (1)$$

$$S(t) = \sin\left(\pi \frac{t - LSH + \frac{DL}{2}}{DL + 2P}\right) \quad (2)$$

Where $S(t)$: Dimensionless function of time, DL : Day Length h , LSH : the time of maximum solar high h , t_a : current air temperature, P : the delay in air $T_{\max}$ with respect to LSH h . Farzandi, et al. (2012) presented more accurate patterns for estimating daily relative humidity from the humidity of Iranian local standard hours and daily precipitation variables, the minimum, maximum, and average daily temperature in coastal regions. The purpose was to present linear and nonlinear patterns of daily relative humidity separately for different months (12 patterns) and annually in coastal regions (the Caspian Sea, the Persian Gulf, and the Oman Sea). Mirkamandar, et al. (2020) modified new patterns of diurnal temperature based on climatically clustering in Iran. The final pattern has an interception and new coefficients to estimate the daily average of temperature. Rezaee-Pazhand, et al. (2008) introduced new patterns for estimating the daily average temperature in arid and semiarid regions of Iran. The final pattern has an interception and new coefficients to estimate the daily average of temperature.

$$\bar{T} = -1.132 + 0.417T_{\min} + 0.591T_{\max} \quad (3)$$

Veleva, et al. (1996) showed that the atmospheric temperature-humidity complex (T-HC) of sites located in a tropical humid climate cannot be well characterized by annual average values. Better information is given by the systematic study of daily changes of temperature (T) and relative humidity (RH), which can be modeled by linear and parabolic functions. Farzandi et al. (2011) divided Iran into three climatic clusters. Which were used in the present work. First, a classification that provides climatological clustering. This clustering was used the data of annual relative humidity, temperature, precipitation, altitude, range of temperature, evaporation, and three indices of Demartonne, Ivanov, and Thornthwaite. Iran was partitioned into three clusters i.e. coastal areas, mountainous range, arid and semi-arid zone. Several clustering methods were used and the around method was found to be the best. Cophenetic correlation coefficient and Silhouette width were validation indices. Homogeneity and

1, 2 and 4- M.Sc. Meteorology, Associate Professor and Philosophy Doctor Meteorology, Ferdowsi University of Mashhad, respectively.

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

3- M.Sc. Hydrology Department of Civil Engineering, Azad University of Mashhad

DOI: 10.22067/jsw.2021.15050.0

Heterogeneity tests for each cluster were done by L-moments. The “R”, software packages were used for clustering and validation tests. Finally, a clustering map of Iran was prepared using “GIS”. The data of 149 synoptic stations were used for this analysis. Systematic sampling was done to select sample stations. The linear regression model was fitted after screening and data preparation. A model was presented for estimating the daily average temperature in each climatic region and sampling stations in each cluster. The best models were presented by reviewing the required statistics and analyzing the residuals. The calibration and comparison of the presented patterns in this paper with commonly applied models were undertaken to calculate the mean squared error. “SPSS.22” software was used for analysis.

Results and Discussion: The coefficient of determination (R^2) and the Fisher statistics showed that the patterns had a good ability to estimate the daily average of relative humidity. The daily average of relative humidity patterns confirmed an interception in the equations. Standardized coefficients showed that predictor variables were not weighted in all of the patterns. The mean squares errors were a measure of the applicability of patterns. The accuracy of the estimating daily average of relative humidity recommended models in three climates was confirmed by calculating the mean squared errors. The proposed patterns of this study had less error than the common patterns.

Conclusion: The relative humidity at 3 pm was more effective in estimating the daily average. The independent assumption of the residual was confirmed with the acceptable value of Durbin-Watson statistics. The averages of the residuals in each pattern was zero. According to the graphs, stabilization of variance can be seen based on the residual on each pattern in each cluster. Proposed patterns were calculated according to mathematical principles. But the common patterns did not observe these mathematical principles. The mean squares errors (MSE) of proposed patterns were less than common patterns. Therefore, the patterns presented in this study are more powerful than common patterns.

Keywords: Climatic regions, Regression patterns, Relative humidity, Systematic sampling



مقاله پژوهشی

شناسایی رژیم بارش ناحیه خزری

حسین عساکره^{۱*} - نسرين ورناصری قندعلی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

چکیده

در پژوهش حاضر با استفاده از داده‌های روزانه ۳۸۵ ایستگاه همدید، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو طی بازه زمانی ۲۰۱۶-۱۹۶۶ جنبه‌های پنهان بارش و رژیم بارشی ناحیه خزری مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا نقشه‌های بارش روزانه با تفکیک مکانی 3×3 کیلومتر ایجاد شد و برای هر پیکسل ایجاد شده در نقشه، افت‌وخیز سینوسی بارش ۱۲ ماه سال براساس روش همسازها بررسی گردید. به‌منظور شناسایی الگوهای مکانی بارش براساس سهم تناوب‌های مختلف و نیز پهنه‌بندی آن از شگرد تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. سپس نمایه یکنواختی و فصلی بارش برآورد شد. نتایج نشان می‌دهد، بیش‌ترین ضریب‌تغییرپذیری ماه‌به‌ماه بارش در خط ساحلی دریای خزر می‌باشد. این وضعیت گویای تغییرات فراوان ماه‌به‌ماه و عدم ثبات فصل بارشی در این مناطق است، با دور شدن از خط ساحلی ضریب تغییرات نیز به‌تدریج کاسته می‌شود به‌طوری‌که، کمینه آن در بخش‌هایی از ارتفاعات البرز می‌باشد. این امر گویای فعالیت سامانه‌های متنوع باران‌زایی و با حداقل تداوم سامانه‌های باران‌زا در این نقاط و ثبات فصل بارشی است. نمایه یکنواختی نشانگر این است، در بخش‌های ساحلی دریای خزر توزیع بارش متمرکزتر است و با پیشروی به‌سمت مناطق جنوبی ناحیه توزیع زمانی بارش یکنواخت‌تر می‌گردد. نمایه فصلی بارش بیانگر وجود سه نوع رژیم بارش است. کم‌ترین وسعت مکانی مربوط به رژیم بارش یکنواخت می‌باشد، که در بخش‌های کوچکی از ارتفاعات البرز دیده می‌شود. گسترده‌ترین رژیم بارشی مربوط به رژیم یکنواخت با یک فصل مرطوب‌تر است. این رژیم بارشی در شرق و غرب ناحیه و جنوب دریای خزر مشاهده می‌شود. رژیم سوم که به رژیم عمدتاً فصلی با یک فصل خشک کوتاه مربوط می‌باشد، خط ساحلی دریای خزر، بخش‌هایی از ارتفاعات تالش و بخش کوچکی از شرق ناحیه را پوشش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: رژیم بارش، ناحیه خزری، نمایه ضریب تغییرات، نمایه فصلی، نمایه یکنواختی، همساز

مقدمه

خواهد بود (۷). مفهوم رژیم بارندگی و کمی‌سازی آن امکان مقایسه میزان بارندگی فصول - ماه‌ها را مهیا می‌سازد. بدیهی است واریاسیون رژیم بارش در طی زمان، شناخت تغییرات رژیم بارندگی را آشکار خواهد کرد (۶).

بارش پدیده‌ای است اقلیمی که مقدار آن در مکان پیوسته تغییر می‌کند و به همین دلیل نقشه‌های هم‌بارش از گروه نقشه‌های هم‌چند هستند که مقدار متغیر بر روی آن‌ها با خطوط هم‌بارش نمایش داده می‌شود. درحالی‌که رژیم بارش نمایش پهنه‌هایی از مکان با اندازه‌های متفاوت را می‌پوشاند و از همین رو قلمرو رژیم‌های بارش با نقشه‌های پهنه‌بندی نمایش داده می‌شوند. همین تفاوت در سرشت این دو خصوصیت اقلیمی گویای آن است که رژیم بارش نسبت به مقدار

رژیم بارش تمامی ویژگی‌ها و آماره‌های بارش در ارتباط با توزیع آن در طول سال را شامل می‌شود و به‌ویژه پراکندگی زمانی بارش بر حسب ماه‌ها یا فصول سال را «رژیم بارش» گویند (۴۸). رژیم بارندگی نشان‌دهنده شمار چرخه‌های بارندگی در طی سال است. از این نظر رژیم بارندگی می‌تواند حاوی یک چرخه در سال باشد. در این صورت یک افت و یک خیز در بارش قابل مشاهده است. در این صورت بارش در یک ماه یا فصل رخ می‌دهد. اگر این اتفاق رخ دهد، رژیم بارش را رژیم متمرکز گویند. اگر به جای یک افت و خیز در سری زمانی ماهانه بارش دو یا چند افت و خیز در بارش دیده شود، بارش با انقطاع در چند ماه یا چند فصل روی می‌دهد. در این صورت بارش غیرمتمرکز

(Email: asakereh@znu.ac.ir)

(*) - نویسنده مسئول:

۱ و ۲ - به‌ترتیب استاد اقلیم‌شناسی و دانشجوی دکتری تغییرات آب و هوایی،

دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

بارش از پایداری مکانی بالاتری برخوردار است (۳۹).

شناسایی و واکاوی رژیم بارش به وسیله شگردهای پرشماری قابل انجام است. یکی از شگردهای مطالعه رژیم بارش بررسی تحلیلی همسازهای بارش می باشد (۳۲، ۱۲، ۲۶، ۵۱ و ۳۵). تکنیک آمار چند متغیره نیز روش دیگری برای تعیین رژیم بارش می باشد (۱۳، ۲، ۲۷، ۳۷، ۱۱، ۳۴، ۴۱ و ۴۶). نمایه فصلی شگردی دیگر برای شناسایی رژیم بارش می باشد. این شگرد در پژوهش والش و لاولر (۵۳)، لیوودا و آسیماکپولوس (۳۴)، ابژه و همکاران (۱)، غیور و مسعودیان (۱۷)، عساکره (۶) و عساکره و رزمی (۸) استفاده گردید. نمایه یکنواختی تکنیک دیگری برای بررسی و تعیین رژیم بارش می باشد (۱۷ و ۸).

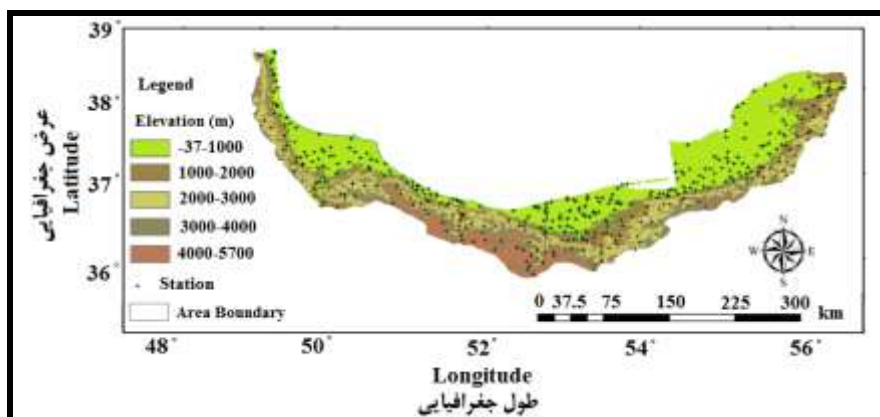
بارش در سواحل جنوبی دریای خزر به عنوان مهم ترین عنصر اقلیمی و پدیده جوی از توزیع زمانی و مکانی پیچیده ای برخوردار است. موقعیت جغرافیایی منحصر به فرد این منطقه به ویژه قرارگیری آن بر جانب جنوبی دریای خزر، استقرار رشته کوه های مرتفع و توپوگرافی پیچیده همراه با جابه جایی مداوم پشته ها و ناهای امواج غربی بر روی منطقه، بروز چنین پیچیدگی را در ساختار بارش منطقه ای در پی داشته است (۲۴). مطالعات پرشماری برای شناخت سازوکار جوی بارش ناحیه خزر انجام شده است. در این پژوهش ها عمدتاً نقش واداشت جو در تکوین بارش این ناحیه در معرض توجه بوده است. برای مثال جهان بخش و کرمی (۲۳) شرایط همید و تأثیرگذار پرفشار سبیری توأم با بارش سواحل جنوبی دریای خزر را در معرض بررسی قرار دادند. نتایج بررسی های ایشان نشان داد که در زمان استقرار زبانه سیستم های پرفشار هرچه هوای انتقال یافته از عرض های بالاتر سردتر بوده و اختلاف دمای سطح آب از شمال به جنوب زیادت و همچنین شیو دمای ایجاد شده بین دریا و خشکی بیش تر باشد، جبهه نسیم دریا قوی تر شده و در نتیجه باران های شدیدتری فرو خواهد ریخت. علیجانی و همکاران (۵) نقش الگوهای فشار در بارش های سواحل جنوبی دریای خزر را در دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۰۳ مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه ایشان نشان داد که بیش تر بارش ها در توالی های دو و سه روزه رخ می دهند. استنباط ایشان براین بود که تداوم مزبور گواهی بر پویشی بودن عوامل توأم با این بارش است. سامانه های همید توأم با این بارش ها عمدتاً پرفشارهای پویشی غربی هستند که غالباً در ماه اکتبر وارد منطقه می شوند. خورشید دوست و شیرزاد (۳۰) با استفاده از تحلیل خوشه ای و تابع تشخیص (تحلیل ممیزی) به بررسی و تحلیل بارش های ناحیه شمال ایران در طی دوره آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۷ پرداختند. نتایج حاصل از تحلیل خوشه ای نشان داد که برحسب مقدار و زمان بارش در منطقه مورد مطالعه می توان ۴ خوشه عمده بارشی ترسیم کرد. هم چنین نتایج تابع تشخیص نشان داد که، حدود ۸۲/۳ درصد از خوشه بندی های

انجام شده در تحلیل خوشه ای به درستی صورت گرفته و حدود ۱۷/۷ درصد آن به اشتباه خوشه بندی شده است. سلیقه و همکاران (۴۹) رابطه شاخص های NCPI^۱ و CACO^۲ با بارش های فراگیر پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن بود که در همه الگوها یک پرفشار بر بالای خزر یا زبانه ی پرفشار بر روی خزر کشیده شده است. این مرکز (یا زبانه) موجب تکوین جریانات شمالی سرد می شود که در برخورد با دریای نسبتاً گرم به سمت جنوب رطوبت جذب کرده و ناپایدار می شود. عوامل دینامیکی در ترازهای بالایی جو موجبات تشدید این ناپایداری را مهیا می سازد و در نتیجه بارش فراگیر را ایجاد می کند.

شناخت توزیع زمانی بارش نه تنها به لحاظ اقلیم شناسی اهمیت دارد بلکه به لحاظ برنامه ریزی اقتصادی - زراعی از ارزش شایان توجهی برخوردار است (۶). بنابراین، از یکسو مطالعه و شناخت رژیم بارش و تناوب درون سالانه بارش ناحیه خزر، در زمینه های پیش بینی و تخمین منابع آب، مدیریت و برنامه ریزی منابع آب حائز اهمیت است و از سوی دیگر تغییرات زمانی بارش پیامدهای بسیاری در مدیریت کشاورزی و صنعت این بخش از کشور دارد. همچنین، تحقیقات کاربردی اندکی در زمینه رژیم بارش این بخش از کشور انجام گردیده است؛ در این زمینه برای مثال تنها غیور و همکاران (۱۸) بر اساس تکنیک تحلیل مؤلفه های اصلی و تحلیل خوشه ای و خورشید دوست و شیرزاد (۳۰) با استفاده از شگرد تحلیل خوشه ای و تجزیه تابع تشخیص به تحلیل زمانی و مکانی بارش و شناخت نواحی همگن بارشی ناحیه خزر پرداخته اند. بنابراین، انجام چنین مطالعه ای در این ناحیه، به عنوان یکی از قطب های کشاورزی کشور، ضرورتی بدیهی به نظر می رسد. بدین جهت، در این پژوهش رفتارهای چرخه ای میانگین بارش ماهانه و توزیع فصلی بارش ناحیه خزر طی دوره آماری ۱۹۶۶ تا ۲۰۱۶ مورد واکاوی قرار گرفت.

داده و روش ها

به منظور انجام این پژوهش، از داده های روزانه بارش ۳۸۵ ایستگاه (ایستگاه های همید، اقلیم شناسی و باران سنجی سازمان هواشناسی کشور و باران سنجی وزارت نیرو) در استان های گلستان، مازندران و گیلان برای بازه زمانی ۱۹۶۶-۲۰۱۶ (۵۱ سال) استفاده شده است (شکل ۱).



شکل ۱- مشخصات ارتفاعی و موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر
Figure 1- Elevation features of the study area and the stations used in the current investigation

متعدد و پر شماری است. این فراسنچ‌ها را می‌توان در گروه‌های متعددی نظیر فراوانی فعالیت‌های جبهه‌های هوا، فراوانی توزیع و نوع سامانه‌های فشار، تأثیر پهنه‌های آبی و ارتفاعات و ناپایداری حرارتی محلی و ... رده‌بندی نمود. سازوکار این پدیده‌ها تابع الگوهای زمانی- مکانی خاصی است. از این رو نمود و بروز آنها به صورت تناوب زمانی و مکانی بارش ظاهر می‌شود. الگوی تناوبی موجب تقسیم سال به بخش‌های پرباران و کم‌باران می‌گردد (۴۷). بدین دلیل در نواحی اقلیمی مختلف، واکنش‌های بارشی متنوعی قابل ردیابی است. در نواحی اقلیمی مشابه با اقلیم ایران رفتار بارش به صورت یک موج سینوسی (مؤلفه کاهشی و افزایشی) است. تناوب مؤلفه کاهشی بارندگی در یک فصل و افزایش آن در فصل دیگر حاصل تناوب در فعالیت سامانه‌های بزرگ مقیاس (همدید) می‌باشد. بنابراین چرخه سالانه بارش را می‌توان حاصل پیش‌روی-پس‌روی سامانه‌های همدید دانست. شایان توجه است که درون این موج سینوسی، موج‌های دیگری نیز وجود دارد که تناوب کاملاً هندسی بارش سالانه را مختل می‌سازد، به طوری که گاه در فصل خشک تناوب خشکی-بارش و در فصل مرطوب نیز تناوبی مشابه رخ می‌دهد. بدین معنی که در هریک از فصول افت و خیز بارش محتمل است. بنابراین درون موج بزرگ موج(های) کوچکی قابل تشخیص است که می‌توان آن را به شرایط متداخل با الگوهای بزرگ مقیاس نسبت داد. این الگو می‌تواند حاصل شرایط منطقه‌ای و محلی باشد. از آن‌جا که هر موج حداقل به یک اوج (فرز) و یک حضیض (فرو) نیاز دارد، برای طول هر سری زمانی حداکثر معادل نصف آن سری زمانی افت و خیز محتمل است. به بیان دیگر برای یک سری زمانی ۱۲ ماهه حداکثر ۶ تناوب درون سالانه قابل انتظار است.

به منظور ردیابی پایداری بارش، نقشه‌های میانگین ماهانه بارش

برای دستیابی به اهداف این پژوهش در ابتدا به بررسی و واریسی داده‌ها پرداخته شد. با استفاده از آزمون الکساندرسون (۳) همگنی مشاهدات در طول دوره آماری ایستگاه‌های مورد بررسی، ارزیابی گردید. به منظور تبدیل داده‌های نقطه‌ای به مقادیر پهنه‌ای، با استفاده از نرم‌افزار سورفر میان‌یابی مشاهدات بارش به روش کریجینگ^۱، با تفکیک مکانی 3×3 کیلومتر از بازه زمانی ۱۹۶۶/۱/۱ تا ۲۰۱۶/۱۲/۳۱ صورت گرفت. در ابتدا تعداد دوازده روش میان‌یابی (شامل روش‌های Spline, Minimum Curvature, Natural Neighbor, IDW, Neighbor, Nearest Neighbor, ...) آزمون شد. انتخاب روش میان‌یابی کریجینگ به دلیل کمینه شدن خطای میان‌یابی در قیاس با روش‌های دیگر است. حاصل فرایند میان‌یابی داده‌های بارش روزانه، ماتریسی با ابعاد 6479×18628 (سطرها روزهای بارشی و ستون‌ها یاخته‌هایی شامل مکان در محدوده مورد بررسی) می‌باشد. به منظور ارایه و تعیین ویژگی‌های توصیفی بارش و تغییرات زمانی- مکانی آن در پهنه مورد بررسی، میانگین و ضریب تغییرات بارش ناحیه خزری در هریک از یاخته‌های نقشه و برای هریک از ماه‌ها برآورد شد. این ویژگی‌ها میزان بارش و پایداری آن در هر ماه را در جای، جای ناحیه مورد بررسی نشان می‌دهد. ضریب تغییرات از نسبت انحراف معیار به میانگین و طبق فرمول (۱) به درصد بیان می‌شود:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله S انحراف معیار و $\bar{X}$ میانگین بارش می‌باشد (۹). ضریب تغییرات ماهانه کم معرف پایداری بوده در حالی که ضریب تغییرات بالا بیانگر تمرکز بارش در یک محدوده زمانی کوتاه است. می‌دانیم که بارش حاصل برهم‌کنش و غلبه هریک از فراسنچ‌های

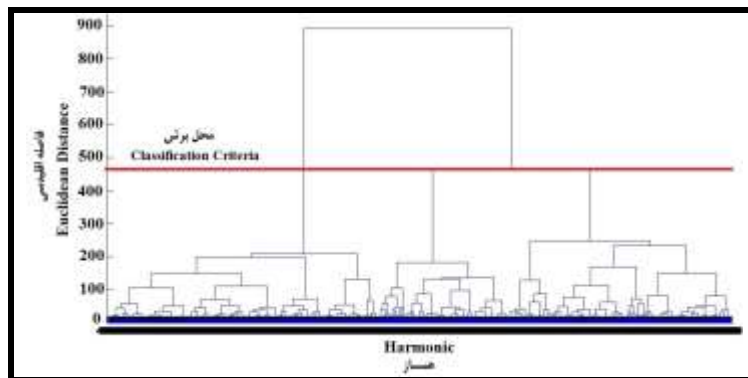
به تعداد ۱۲ نقشه تولید و ضریب تغییر پذیری ماه به ماه در این دوازده ماه و برای هر یاخته نقشه محاسبه شد. بدین ترتیب ضریب تغییرات ماه به ماه پایین، معرف میزان ثبات فصل بارش است، اما ضریب تغییرات بالا گواهی بر تغییرات فراوان ماه به ماه بارندگی می باشد. براین اساس اقلیم بارشی نواحی توأم با تغییرات پایسته و نیز توأم با وردایی ماه به ماه بر روی نقشه‌ای با عنوان ضریب تغییرپذیری تهیه شد. این نقشه گام نخست برای شناخت رژیم بارش ناحیه خزری است.

انواع تناوب‌های بارشی ناحیه خزری که به اشکال امواج بلند (سالانه) تا بسیار کوتاه (دو ماهه) رخ می‌دهند، براساس شگرد «تحلیل همسازها» استخراج گردید. موجی که دارای یک افت و خیز می‌باشد، به‌علاوه این که متأثر از سامانه‌های بزرگ مقیاس است به‌عنوان بارش‌های یک تناوبی در نظر گرفته شد. این نوع بارش‌ها دارای دوره تناوب دوازده ماه است. موجی که دارای دو افت و خیز است، به‌عنوان بارش توأم با تناوب شش ماه، موجی که دارای سه افت و خیز می‌باشد، به‌عنوان بارش با دوره تناوب چهار ماهه در نظر گرفته شد. به‌طور مشابه بارش‌های با تناوب ۳ و ۴/۲ ماه، به ترتیب با چهار و پنج چرخه در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت بارش‌های توأم با چرخه‌های ۲ ماهه دارای شش افت و خیز هستند. تحلیل همسازها، روشی معقول برای بیان آهنگ فصلی عناصر اقلیمی نظیر بارش ماهانه و روشی عام برای استخراج چرخه‌های یک سری زمانی است که بر پایه بنیادهای ریاضی بنا نهاده شده است. در این رویه، رفتار تناوبی یک سری زمانی به‌وسیله توابع مثلثاتی و با مؤلفه‌های سینوسی توصیف می‌شود. این روش برای بررسی رفتار تناوبی بارش در یونان (۳۵ و ۴۳)؛ تحلیل رژیم بارش شمال شرق ایالات متحده آمریکا (۵۰) و اروپا (۲۸)؛ تغییرات دما در قطب جنوب (۲۵) تغییرات بارش در پامیر (۴۵) و حوضه دریاچه تانا در اتیوپی (۱۵)؛ اقلیم‌شناسی بارش عربستان سعودی (۵۱) تغییرات زمانی - مکانی بارش ناحیه خزری (۴۲) مورد استفاده قرار گرفت. برای به‌کارگیری روش تحلیل همسازها در ابتدا داده‌های بارش روزانه برای هر یک از پیکسل‌های نقشه‌های تهیه شده، به بارش ماهانه تبدیل شد. سپس محاسبات ارایه شده به‌وسیله تارونه و کادی‌اغلو (۵۲) برای هر پیکسل انجام شد. بدین ترتیب برای هر یک از چرخه‌ها یک نقشه و مجموعاً شش نقشه تهیه شد. در نهایت، جهت طبقه‌بندی چرخه‌های بارش سهم پراش هر یک از همسازهای ناحیه خزری براساس فاصله اقلیدسی و شگرد وارد^۱ در معرض تحلیل خوشه‌ای قرار گرفت. طبقات مختلف بارش (۳ الی ۸ طبقه) مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با مقایسه طبقات بارشی با نقشه‌های همسازها و نیز با روش آزمون و خطا خوشه‌بندی سه طبقه‌ای توأم با کمینه تفاوت درون‌گروهی و بیشینه تفاوت

برون‌گروهی برای ناحیه خزری انتخاب گردید. در روش تحلیل خوشه‌ای جایگاه ویژه‌ای به هر مشاهده در یک فضای چند بعدی اختصاص داده می‌شود که ابعاد را تعداد صفات اندازه‌گیری شده تعیین می‌کنند. به‌منظور سنجش فاصله بین مشاهدات از روش‌های ریاضی استفاده می‌شود به این ترتیب تحلیل خوشه‌ای را مناسب‌ترین روش جهت تشخیص شباهت‌های بین افراد یک مجموعه می‌دانند. در این پژوهش جهت تشخیص فاصله‌ی بین افراد از روش اقلیدسی^۲ بهره‌گرفته شد (۱۴). فاصله اقلیدسی و روش وارد از مقبولیت بالایی در نزد اقلیم‌شناسان برخوردارند. اقلیم‌شناسان برای شناسایی مناطق همگن اقلیمی در مقیاس‌های مکانی متفاوت، از تحلیل خوشه‌ای بهره بسیار برده‌اند. در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های جکسون و ویناند (۲۱) اشاره کرد. ایشان با مقایسه نتایج روش‌های مختلف تحلیل خوشه‌ای، ایستگاه‌های باران‌سنجی منطقه حاره را طبقه‌بندی کردند. لنا و همکاران (۳۳) با روش تحلیل خوشه‌ای بر روی مؤلفه‌های اصلی، هشت الگوی گردشی اصلی به‌وجود آورنده بارش‌های سنگین جزایر بالریک را به‌دست آوردند. لیارا و همکاران (۳۶) به‌منظور بررسی تغییرات زمانی - مکانی بارش ماهانه در ایالت آگواس، شمال شرقی برزیل؛ اولیویرا جونیور و همکاران (۴۴) برای شناسایی مناطق همگن بارش در ایالت تکانتینس برزیل؛ مسعودیان (۳۹) برای شناسایی رژیم‌های بارش ایران؛ جهانبخش اصل و همکاران (۲۲) جهت بررسی توزیع زمانی و مکانی بارش شهرستان تبریز از روش تحلیل خوشه‌ای استفاده کردند.

دارنمای حاصل از محاسبات انجام شده در پژوهش حاضر در شکل ۲ آمده است. محل برش دارنما، شمار طبقات را نشان می‌دهد. این محل براساس روش آزمون و خطا به‌دست آمده است. بدین ترتیب سه ناحیه به لحاظ تناوب بارشی تشخیص داده شد. این سه ناحیه به لحاظ سهم پراش تناوب‌های بارشی قابل تمایز هستند.

در گام بعد با استفاده از نمایه یکنواختی بارش توزیع زمانی و رژیم بارش ناحیه خزری طی دوره آماری مورد مطالعه بررسی شد. نمایه یکنواختی بارش برای بررسی توزیع زمانی بارش طی ماه‌های دوازده‌گانه سال و شناخت سهم هر ماه، از میانگین مجموع بارش سالانه است. اگر دوره زمانی برگزیده ماه‌های دوازده‌گانه سال باشد آن‌گاه می‌توان گفت یکنواختی عبارت از برابری سهم هر یک از ماه‌های سال از میانگین مجموع بارش سالانه است. بدین ترتیب اگر میانگین مجموع بارش ماهانه هر محل را بر پایه فرمول زیر به درصد برگردانیم، بارش ماهانه استاندارد خواهد شد.



شکل ۲- دارنمای سهم پراش بارش توأم با تناوب‌های مختلف در ناحیه خزری

Figure 2- The dendrogram of different harmonics of precipitation in the Iranian coast of Caspian Sea

در حالت نایکخواختی کامل) و صد (در حالت یکنواختی کامل) نوسان می‌کند. هر چه مقدار نمایه یکنواختی به صفر نزدیک‌تر باشد توزیع بارش محل متمرکزتر و هر چه به صد نزدیک‌تر باشد یکنواخت‌تر است (۱۷).

چهارمین ابزار برای شناسایی رژیم بارش، «نمایه فصلی بارش» است. نمایه فصلی (SI) تفاوت‌های فصلی را در مقادیر بارش بیان می‌کند. این نمایه می‌تواند تفاوت‌های موجود در رژیم بارش را برای مناطق با ۲ یا ۳ اوج بارش در سال نشان دهد. این ویژگی به‌صورت مجموع قدر مطلق انحرافات میانگین بارش ماهانه از میانگین بارش سالانه تقسیم بر میانگین بارش سالانه است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۳۴):

$$SI = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^{n=12} \left| \bar{x}_n - \frac{R}{12} \right| \quad (۴)$$

مقادیر این نمایه بین صفر (توزیع یکنواخت بارش) و $1/12$ (تنها یک ماه بارانی) تغییر می‌کند. طبقات رژیم بارش براساس ارزش SI در جدول ۱ آمده است (۳۴):

$$P_s[i] = \left(\frac{P[i]}{P_y} \right) \times 100 \quad (۲)$$

در این فرمول $P_s[i]$ بارش استاندارد شده ماه i ام، $P[i]$ میانگین مجموع بارش ماه i ام، P_y میانگین مجموع بارش سالانه است. با بهره‌گیری از بارش ماهانه استاندارد شده می‌توان درباره یکنواختی بارش چنین استدلال کرد که اگر هر ماه $\frac{100}{12}$ از کل بارش سالانه را داشته باشد $\left(P_s[i] = \frac{100}{12}, i = 1, \dots, 12 \right)$ آن‌گاه می‌توان گفت که توزیع زمانی بارش کاملاً یکنواخت است. از سوی دیگر در حادترین حالت می‌توان فرض کرد که تمام بارش یاخته در یک ماه روی دهد که در این صورت بارش از دیدگاه زمانی کاملاً متمرکز خواهد بود. به این ترتیب نمایه یکنواختی توزیع ماهانه بارش را می‌توان چنین تعریف نمود:

$$H = 100 - K \sum_{i=1}^{12} |P_s[i] - c| \quad (۳)$$

در این فرمول H نمایه یکنواختی توزیع ماهانه بارش، K ضریب تناسب و C مقداری ثابت و برابر $\frac{100}{12}$ است. مقدار H در دامنه صفر

جدول ۱- مفاهیم مقادیر نمایه فصلی

Table 1- Concepts of seasonal index values

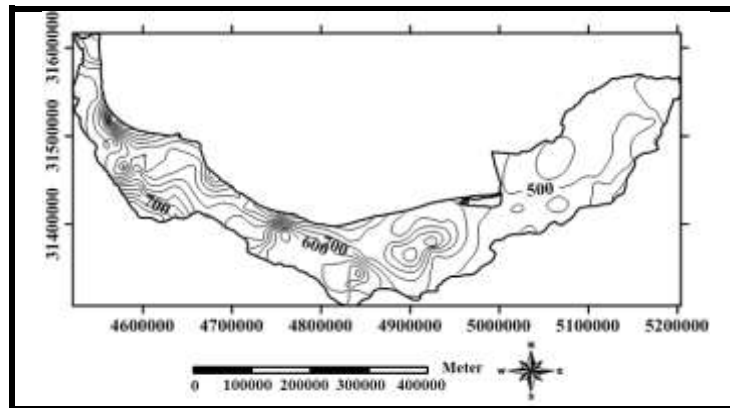
≥ 1.2	1-1.19	0.8-0.99	0.6-0.79	0.4-0.59	0.2-0.39	$0.19 \leq$	SI
تقریباً تمامی بارش در ۱ تا ۲ ماه Extreme, almost all rain in 1 to 2 month	بیش‌تر بارش در ۳ ماه یا کمتر Most rain in 3 month or less	فصلی با فصل خشک طولانی‌تر Markedly seasonal with a long drier season	فصلی (یک فصل خشک و یک فصل مرطوب) Seasonal	عمدتاً فصلی با یک فصل خشک کوتاه Rather seasonal with a short drier season	یکنواخت با یک فصل مرطوب‌تر Equable with a definite wetter season	یکنواخت Very equable	رژیم بارش Rainfall regime

نتایج

مشخصات عمومی میانگین بارش

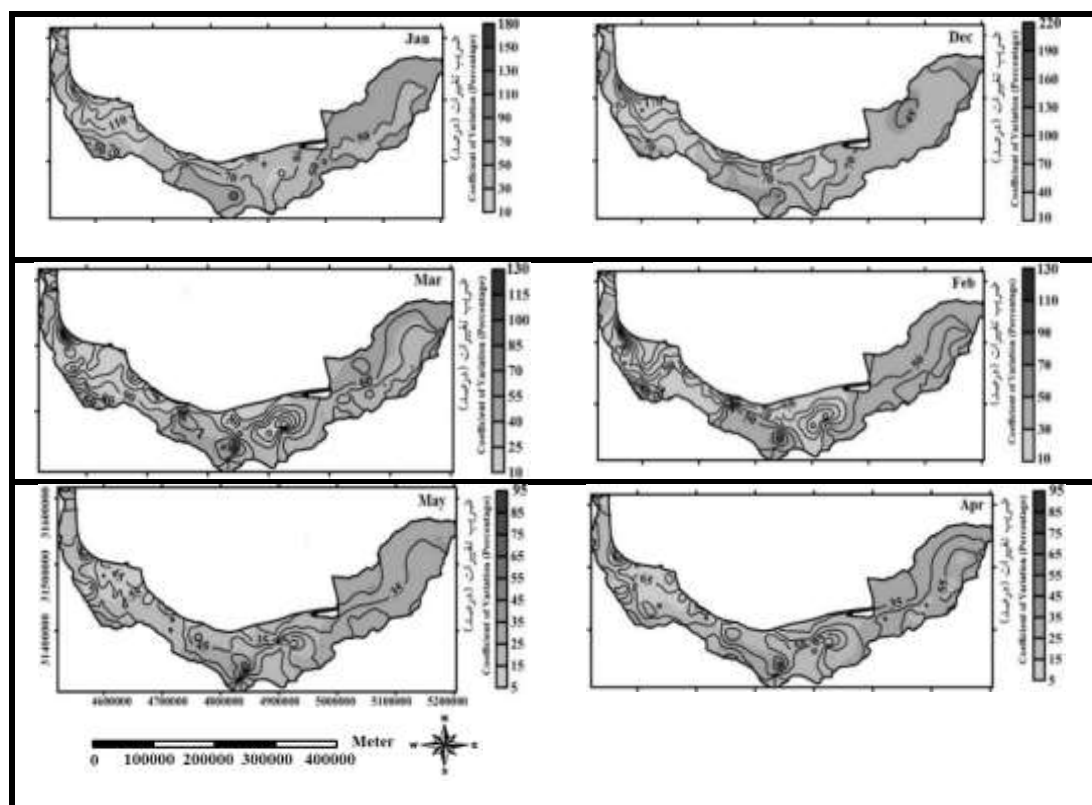
توزیع مکانی میانگین بارش سالانه در شکل ۳ ارائه شده است: مشاهده می‌شود که، میانگین بارش سالانه در ناحیه خزری طی دوره

آماري مورد بررسی بین ۲۰۰ تا ۲۵۰۰ میلی‌متر در نوسان است. میانگین بارش سالانه در خط ساحل به‌ویژه در جنوب‌غربی دریای خزر بیش‌تر است و با دور شدن از ساحل کاهش می‌یابد.



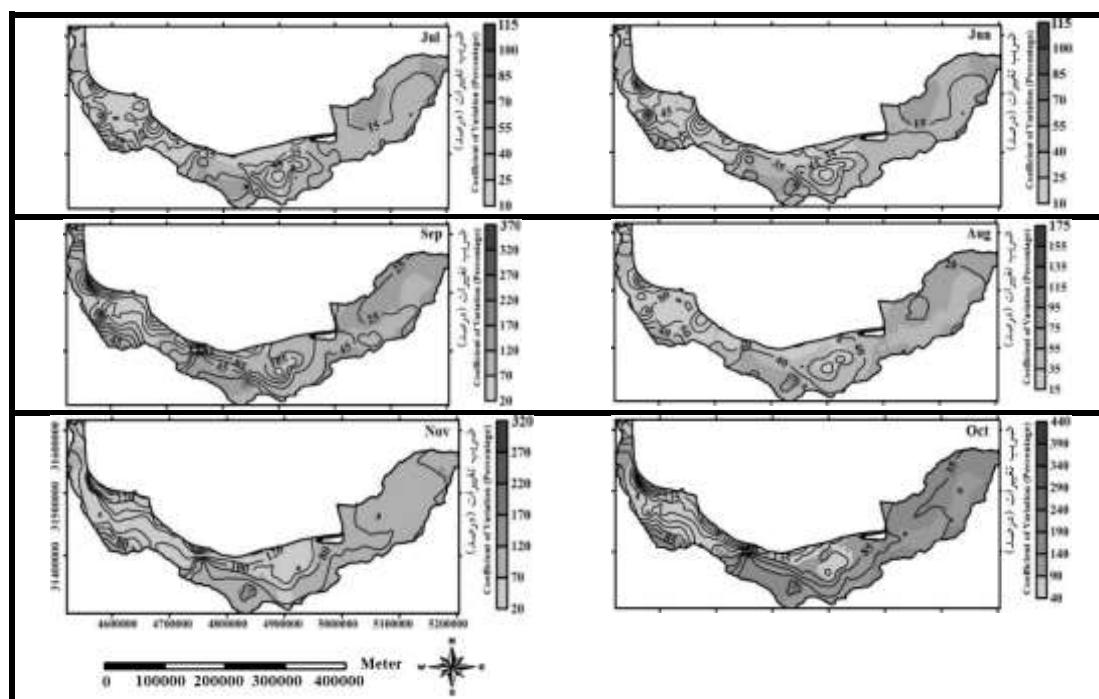
شکل ۳- توزیع مکانی میانگین بارش سالانه ناحیه خزری طی دوره آماری ۱۹۶۶-۲۰۱۶

Figure 3- Spatial distribution of the average annual precipitation in the Caspian region during the statistical period of 1966-2016



شکل ۴- توزیع مکانی میانگین بارش ماهانه و ضریب تغییرات آن طی فصل‌های زمستان و بهار

Figure 4- Spatial distribution of average monthly precipitation and its coefficient of variation during winter and spring seasons



شکل ۵- توزیع مکانی میانگین بارش ماهانه و ضریب تغییرات آن طی فصل‌های تابستان و پاییز
Figure 5- Spatial distribution of average monthly precipitation and its coefficient of variation during Summer and autumn seasons

بررسی رژیم بارش

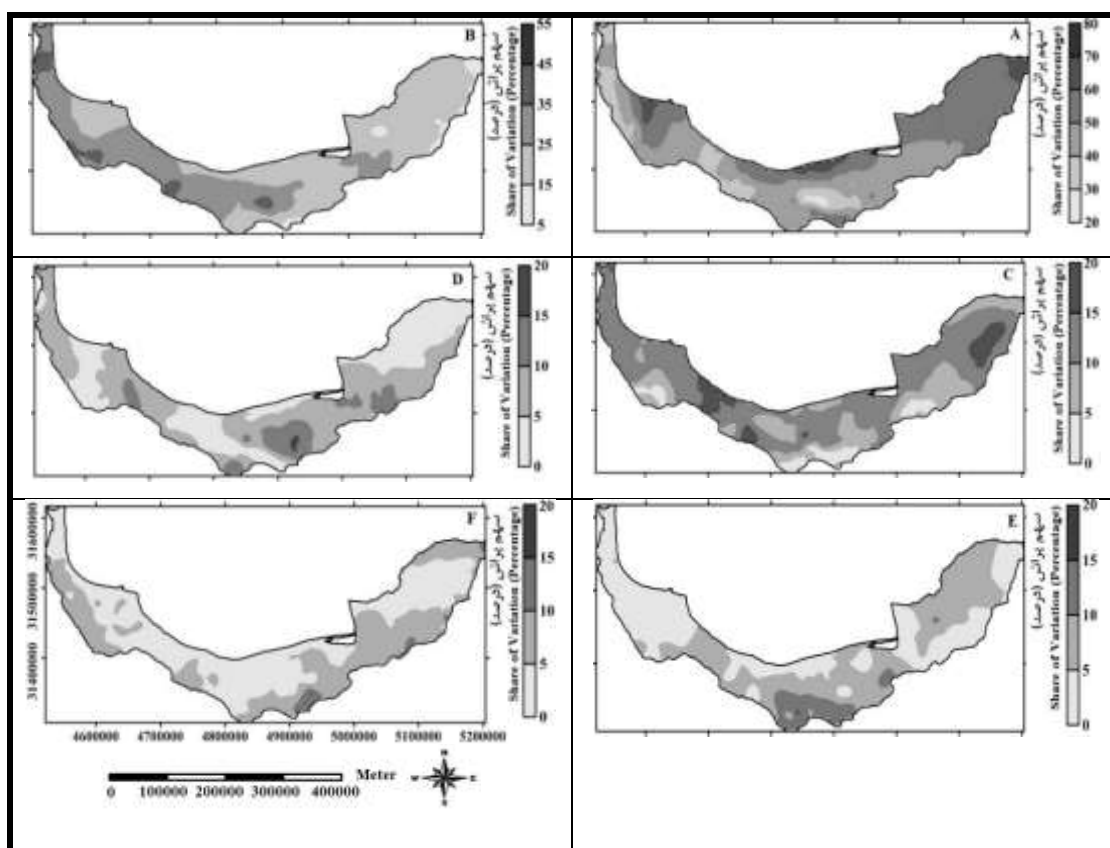
شکل ۷- A حاصل محاسبه تغییرات ماه به ماه بارش از ۱۲ نقشه است. این ۱۲ نقشه هریک توزیع مکانی میانگین بارش یک ماه را به دست می‌دهند. ضریب تغییرات ماه به ماه بارندگی گویای شدت تغییرات ماه به ماه بارش است. توزیع مکانی این نمایه برای هر یاخته براساس رابطه (۱) محاسبه و در شکل ۷- A ارائه گردید. تغییرپذیری ماه به ماه بارش در ناحیه خزری بین ۱۰ تا ۸۰ درصد در نوسان می‌باشد. این نشانگر این امر است که اختلاف نقاط از نظر تغییرپذیری ماه به ماه بارش تقریباً زیاد است. بیش‌ترین ضریب تغییرپذیری ماه به ماه بارش (۶۰ تا ۷۰ درصد) در خط ساحلی دریای خزر می‌باشد. این وضعیت گویای تغییرات فراوان ماه به ماه و تمرکز سازوکارهای باران‌زایی در ماه‌های محدود و عدم ثبات فصل بارشی در این نواحی است. از سوی دیگر، با توجه به شکل ۶ می‌توان استنباط کرد که در این بخش از ناحیه خزری بارش‌های یک تناوبی نسبت به سایر بارش‌ها نقش بارزتری دارد. با دور شدن از خط ساحلی ضریب تغییرات نیز به تدریج کاسته می‌شود به‌طوری‌که در بخش‌هایی از جنوب دریای خزر (ارتفاعات البرز) بین ۱۵ تا ۳۰ درصد می‌باشد. این امر گویای تفاوت کم بارش دریافتی طی ماه‌های مختلف سال است. به عبارتی نشانگر فعالیت سامانه‌های متنوع باران‌زایی و یا حداقل تداوم سامانه‌های باران‌زا در این قبیل نقاط و ثبات فصل بارشی است. بنابراین، بر اساس نقشه‌های حاصل از تحلیل همسازها مشاهده می‌شود که در این نواحی، بارش‌های دو تناوبی - شش تناوبی متداول‌تر بوده است.

علی‌جانی (۴) بر این باور است که در بخش‌های جنوب‌غربی علاوه بر ورود بادهای غربی و چرخندهای مدیترانه، بادهای شرقی و شمال‌شرقی نیز پس از عبور مسیری طولانی از روی دریای خزر، در این ناحیه (و به‌ویژه انزلی) سازوکارهای بارش را مهیا می‌سازند، اما این شرایط به‌طرف شرق دریای خزر کم‌تر می‌شود. در واقع میانگین بارش از مرکز بیشینه آن به‌طرف شرق ناحیه و ارتفاعات البرز کاسته می‌شود. در این بخش از کشور، با افزایش ارتفاع تا حد معین مقدار بارش می‌کاهد (۴۰). به‌طوری‌که در بخش‌های شرقی ناحیه میانگین بارش سالانه بین ۲۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر و در ارتفاعات البرز (جنوب دریای خزر) بین ۵۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر در تغییر است.

به‌منظور ارایه توزیع مکانی - زمانی مشخصات عمومی بارش ماهانه ناحیه خزری، توزیع مکانی میانگین و ضریب تغییرات بارش ماهانه برای هر یاخته محاسبه و در شکل ۴ و ۵ ارائه گردید. خطوط هم‌ارزش نشانگر میانگین بارش و پس‌زمینه بیانگر ضریب تغییرات بارش ماهانه می‌باشد.

بررسی چرخه‌های بارش

سه‌م چرخه‌های بارش در تولید بارش سالانه و نیز درصد مساحت تحت پوشش هر یک از چرخه‌های مذکور محاسبه و برآورد شد. چرخه‌های بارشی در شکل ۶ ارایه شده‌است:



شکل ۶- توزیع مکانی درصد پراش بارش‌های یک تناوبی (A)، بارش‌های دو تناوبی (B)، بارش‌های سه تناوبی (C)، بارش‌های چهار تناوبی (D)، بارش‌های پنج تناوبی (E)، بارش‌های شش تناوبی (F) طی دوره آماری مورد مطالعه در ناحیه خزری

Figure 6- Spatial Distribution of Percentage of Precipitations First Harmonic (A), Precipitations Second Harmonic (B), Precipitations Third Harmonic (C), Precipitations Fourth Harmonic (D), Precipitations Fifth Harmonic (E), Precipitations Sixth Harmonic (F) during the statistical period studied in the Caspian region

ناحیه خزری سه رژیم بارش قابل شناسایی است. رژیم بارش پاییزی که در خط ساحلی و بخش‌هایی از شرق ناحیه مشاهده می‌شود، این رژیم بارشی ۴۳/۲۳ درصد از ناحیه مورد مطالعه را در بر می‌گیرد. میانگین ماهانه بارش در سه ماه فصل پاییز به ترتیب برابر ۷۵/۹، ۹۶/۵ و ۸۸/۱ میلی‌متر می‌باشد. نکته شایان ذکر این است که در این ناحیه ضریب تغییرات بیش‌تر از ۴۰ درصد بوده و حاکی از تفاوت ماه‌های کم‌باران و پر باران می‌باشد. رژیم بارش زمستانه- پاییزه که عموماً در بخش‌های کوهستانی نیمه غربی ناحیه خزری (بخش‌هایی از ارتفاعات البرز و تالش) و نیز در پهنه‌ای محدود از کوهستان شرقی (۳۵/۹۴ درصد از ناحیه خزری) حاکم می‌باشد. رژیم بارش زمستانه - پاییزه با ناپیوستگی مکانی (۳۵/۹۴ درصد از ناحیه خزری) مشخص می‌شود. قسمت غربی آن در بخش‌های کوهستانی نیمه غربی ناحیه خزری (بخش‌هایی از ارتفاعات البرز و تالش) و قسمت شرقی آن در پهنه‌ای محدود از ارتفاعات جنوبی مشرف بر خلیج گرگان - میانکاله است. اگرچه بخش جنوبی خلیج گرگان - میانکاله در این رژیم منطقی

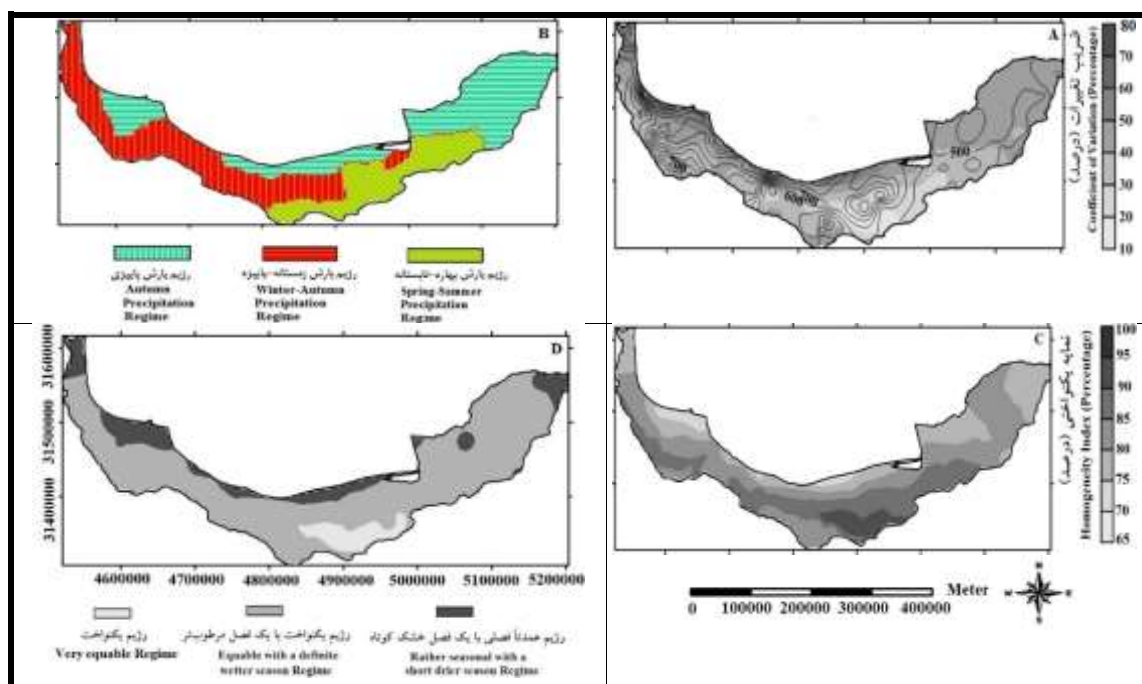
در واقع می‌توان گفت که در ارتفاعات البرز علاوه بر سامانه‌های بزرگ مقیاس، عوامل محلی نیز در تکوین بارش مؤثرند. به گونه‌ای که، برخی پژوهشگران وقوع بارش در این بخش از منطقه خزری را ناشی از صعود کوهساری هوای مرطوب دریای خزر از دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز بیان کرده است. این یافته مجدداً در تحقیقات متعددی مورد تأیید قرار گرفته است (۲۹ و ۳۱). شکل‌گیری جبهه‌ای موسوم به جبهه نسیم دریا در حد فاصل دریا و خشکی (۳۱) سازوکار دیگری است که برای وقوع بارش‌های این بخش از ناحیه خزری بیان شده است.

نقشه تهیه شده از طبقه‌بندی حاصل از دارنمای ارایه شده در شکل ۲ در شکل B-۷ ارایه شده است. شکل B-۷ توزیع مکانی رژیم‌های مختلف بارش ناحیه خزری براساس طبقه‌بندی سهم پراش تناوب‌های مختلف بارشی را نشان می‌دهد. پراکندگی جغرافیایی طبقات بارشی نشان می‌دهد که تفاوت این طبقات متأثر از عرض جغرافیایی و فاصله از دریای خزر است. نتایج نشان می‌دهد که در

نقشه‌های حاصل از تحلیل همسازها می‌توان گفت که، در مناطق ساحلی که توزیع زمانی بارش یکنواخت می‌باشد بارش‌های یک تناوبی غلبه بیش‌تری دارند در حالی که در مناطقی (ارتفاعات البرز) که بارش در طول سال رخ داده است، سهم حاصل از بارش‌های محلی (دوتناوبی تا شش تناوبی) بیش‌تر می‌باشد. براساس رابطه ۴ (نمایه فصلی بارش) می‌توان سه رژیم بارش برای ناحیه خزری تشخیص داد. شکل D-۷ نشان می‌دهد که، کم‌ترین وسعت مکانی (۶/۲۸ درصد) مربوط به رژیم بارش یکنواخت می‌باشد، که در بخش‌های کوچکی از ارتفاعات البرز دیده می‌شود. ویژگی این رژیم بارشی، توزیع زمانی بارش در طول فصل‌های مختلف سال می‌باشد. می‌توان گفت که این بخش با توجه به موقعیت آن، علاوه بر برخورداری از بارش‌های ناشی از عوامل کلان، از بارش‌های همرفتی و محلی نیز متأثر می‌شوند. از این‌رو تفاوت ماه به ماه بارش بسیار کم است. شکل A-۷ نیز نشان می‌دهد که کم‌ترین ضریب تغییرات ماه به ماه بارش در همین بخش می‌باشد. از سوی دیگر در شکل B-۷ نیز به‌وضوح می‌توان مشاهده کرد که در این مناطق توزیع زمانی بارش در طول سال می‌باشد. این ویژگی بیان‌گر این امر است که تمامی نقاط در طول سال بارش مشابهی را دریافت می‌کنند. گسترده‌ترین رژیم بارشی مربوط به رژیم یکنواخت با یک فصل مرطوب‌تر است. این رژیم بارشی که ۷۶/۱۳ درصد از ناحیه خزری را در برمی‌گیرد، در شرق و غرب ناحیه و جنوب دریای خزر مشاهده می‌شود. مشخصه این ناحیه توزیع بارش در طول فصل‌های مختلف سال همراه با یک فصل پربارش می‌باشد. براساس شکل ۴ می‌توان گفت که، این ناحیه بیش‌ترین بارش خود را در فصل زمستان دریافت می‌کند. بر اساس شکل A-۷ و C-۷ می‌توان گفت که، در این مناطق نمایه یکنواختی بین ۸۰ تا ۹۰ درصد و نمایه ضریب تغییرات بین ۳۰ تا ۵۰ درصد در نوسان است. این خود حاکی از پراکندگی بارش در طول سال می‌باشد. بنابراین، تفاوت ماه به ماه بارش در این نقاط کم‌تر است. رژیم سوم (۱۳/۲۵ درصد مساحت پهنه مورد بررسی) که به رژیم عمدتاً فصلی با یک فصل خشک کوتاه مربوط می‌باشد، خط ساحلی دریای خزر، بخش‌هایی از ارتفاعات تالش و بخش کوچکی از شرق ناحیه را پوشش می‌دهد. با توجه به شکل ۳ و C-۷ می‌توان گفت که این بخش از ناحیه خزری علی‌رغم دریافت بارش سالانه بیش‌تر نسبت به سایر بخش‌ها، از توزیع زمانی بارش متمرکزتر برخوردار می‌باشد. این خود بیانگر تمرکز بارش در یک فصل خاصی از سال می‌باشد. با توجه به شکل ۴ و ۵، فصل پاییز و زمستان به ترتیب اولین و دومین فصل‌های پربارش این بخش از ناحیه خزری، به حساب می‌آید. بنابراین، اختلاف زیادی بین ماه‌های کم‌باران و پرباران وجود دارد؛ به‌گونه‌ای که شکل A-۷ نشان می‌دهد که بیش‌ترین ضریب تغییرات در این بخش بیش از ۵۰ درصد می‌باشد.

به‌نظر نمی‌رسد، اما شواهد موجود حاکی از صحت این طبقه‌بازی در ارتفاعات مشرف بر میانکاله است. اول این که توزیع ماهانه بارش ارایه شده در شکل‌های ۴ و ۵ بر وجود بارش قابل توجه در طی ماه‌های فصل پاییز و زمستان در ناحیه مورد بحث دارد. دوم این که، این ویژگی به‌وسیله عساکره و ورناصری قندعلی (۱۰) نیز ارایه و تأیید شده‌است. این شرایط به‌وسیله مطالعه حسینی و همکاران (۲۰) توجیه شده‌است. ایشان بر این باورند که فرایند فرارفت (همرفت وزشی) تنها از پرفشار سیبری حاصل نمی‌شود، بلکه پرفشار دریای سیاه به‌ویژه در فصل پاییز نیز نقش عمده‌ای در همرفت وزشی دارد. موقعیت پرفشار دریای سیاه و گردش ساعتگرد هوا در این سامانه موجب می‌شود که بخش‌هایی از نواحی شرقی دریای خزر نیز متأثر شوند. اما این تأثیر به‌طور بارز در تمامی نواحی مشهود نیست. در ناحیه خلیج گرگان - میانکاله وجود و برهم‌کنش خلیج گرگان (به‌عنوان پهنه آبی محلی) و ارتفاعات مشرف بر آن، نوعی لانه‌گزینی اقلیم‌بارشی (تباین رژیم بارش با اطراف) را مهیا کرده‌است. علاوه بر این مطالعات نگارندگان در خصوص شرایط جوی مذکور، ویژگی‌های یاد شده را تأیید می‌کند (به دلیل محدودیت در ارایه حجم مقاله و به منظور رعایت ایجاز این بخش در مطالعه حاضر ارایه نشده‌است). در این رژیم بارشی کمینه میانگین ماهانه بارش در دو فصل زمستان و پاییز ۶۶/۵ میلی‌متر (ماه ژانویه و فوریه) و بیشینه آن ۹۶/۵ میلی‌متر (ماه اکتبر) می‌باشد. با توجه به نقشه A-۷ تفاوت ماه به ماه بارش در این نواحی کم و این خود حاکی از ثبات فصل بارشی می‌باشد. رژیم بارش بهاره - تابستانه گستره کم‌تری (۲۰/۸۲ درصد) از ناحیه خزری را پوشش می‌دهد. این رژیم بارشی در بخش‌های جنوبی دریای خزر (ارتفاعات البرز) دیده می‌شود. کمینه میانگین ماهانه بارش در دو فصل بهار و تابستان ۳۳/۷ میلی‌متر (ماه جولای) و بیشینه آن در ماه مارس (۷۷/۲ میلی‌متر) می‌باشد. شکل A-۷ نیز بیانگر ثبات فصل بارشی این رژیم در مقایسه با سایر رژیم‌ها است.

با استفاده از روش‌های معرفی شده، شاخص یکنواختی و نمایه فصلی تهیه شد. این نقشه‌ها به ترتیب در شکل C-۷ و D-۷ ارایه شده‌اند. شکل C-۷ توزیع مکانی نمایه یکنواختی بارش را برای ناحیه خزری نشان می‌دهد. می‌توان گفت که، در بخش‌های ساحلی دریای خزر توزیع بارش متمرکزتر است و با پیشروی به سمت مناطق جنوبی ناحیه (بخشی از ارتفاعات البرز) توزیع زمانی بارش یکنواخت‌تر می‌گردد. این خود نشانگر این واقعیت است که در بخش‌های ساحلی دریای خزر بارش در فصل خاصی از سال متمرکز می‌باشد؛ در حالی که در ارتفاعات البرز در طول سال توزیع گردیده است. شکل A-۷ نیز مؤید این امر است که در این نواحی تفاوت ماه به ماه بارش نسبت به سایر نقاط کم‌تر و ثبات فصل بارشی بیشتر می‌باشد. بر اساس



شکل ۷- A) توزیع مکانی نمایه ضریب تغییرات ماه به ماه بارش (به درصد)، B) توزیع مکانی رژیم‌های بارش ناحیه خزری براساس سهم پراش تناوب‌های مختلف بارشی، C) توزیع مکانی نمایه یکنواختی بارش، D) توزیع مکانی نمایه فصلی بارش ناحیه خزری طی دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۶۶
Figure 7- A) Spatial distribution of coefficient of variation index of month to month precipitation (in percent), B) spatial distribution of Caspian precipitation regimes based on of different harmonics of precipitation, C) spatial distribution of precipitation homogeneity index, D) spatial distribution of the Caspian precipitation seasonal index during the statistical period of 1966-2016

جدول ۲- درصد مساحت رژیم‌های مختلف بارشی ناحیه خزری براساس نمایه فصلی طی دوره مورد مطالعه

Table 2- Percentage of the area of different precipitation regimes in the Caspian region based on the seasonal index during the study period

یکنواخت Very equable	یکنواخت با یک فصل مرطوبتر Equable with a definite wetter season	عمدتاً فصلی با یک فصل خشک کوتاه‌تر Rather seasonal with a short drier season	درصد مساحت Percentage of the area
6.28	76.13	13.25	

جنبه‌های پنهان و توزیع فصلی بارش ناحیه خزری ارزیابی گردید. در این پژوهش تلاش گردید که انواع تناوب‌های بارشی ناحیه خزری (اشکال امواج بلند (سالانه) تا بسیار کوتاه (دو ماهه) استخراج گردد. در مرحله بعد نمایه خوشه‌ای، نمایه ضریب تغییرات، نمایه یکنواختی و نمایه فصلی بارش ناحیه خزری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که، میانگین بارش سالانه در خط ساحل به‌ویژه در جنوب‌غربی دریای خزر بیش‌تر است و با دور شدن از ساحل کاهش می‌یابد. در بخش‌های جنوب‌غربی دریای خزر بیشینه بارش در فصل پاییز همچنین در ارتفاعات البرز بیشینه اصلی بارش در فصل زمستان و بیشینه فرعی در فصل پاییز و کمینه بارش در فصل تابستان رخ می‌دهد. ضریب تغییرات ماهانه بارش نشانگر نوسان‌های شدید بارش ماهانه می‌باشد. به‌طوری‌که دامنه آن از ۵ درصد در ماه‌های آوریل و می به ۴۴۰ درصد در ماه اکتبر می‌رسد. با

نتایج حاصل از مقایسه تحلیل خوشه‌ای، نمایه ضریب تغییرات، نمایه یکنواختی و نمایه فصلی نشان داد که، طبقات بارشی حاصل از نمایه فصلی به‌جهت مشابهت این طبقات با میانگین بارش ماهانه و سالانه به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. بنابراین، به‌نظر می‌رسد این نمایه بهینه‌ترین شگرد برای تعیین رژیم‌های بارشی ناحیه خزری می‌باشد. درصد پهنه‌های زیر پوشش طبقات این دستگاه طبقه‌بندی در جدول ۲ ارایه شده است.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، با استفاده از داده‌های روزانه ۳۸۵ ایستگاه همدید، اقلیم‌شناسی و باران‌سنجی سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های باران‌سنجی وزارت نیرو طی بازه زمانی ۱۹۶۶-۲۰۱۶ (۵۱ سال)

با یک فصل مرطوب‌تر که گسترده‌ترین رژیم بارشی (۷۶/۱۳ درصد) است در شرق و غرب ناحیه و جنوب دریای خزر حاکم می‌باشد. ویژگی بارز این ناحیه توزیع بارش در طول فصل‌های مختلف سال همراه با یک فصل خشک رژیم عمدتاً فصلی با یک فصل خشک کوتاه که ۱۳/۲۵ درصد از ناحیه خزری را پوشش می‌دهد در خط ساحلی دریای خزر، بخش‌هایی از ارتفاعات تالش و بخش کوچکی از شرق ناحیه دیده می‌شود. توزیع زمانی بارش در این بخش از ناحیه خزری متمرکز می‌باشد.

نتایج حاصل از مقایسه تحلیل خوشه‌ای، نمایه ضریب تغییرات، نمایه یکنواختی و نمایه فصلی نشان داد که، طبقات بارشی حاصل از نمایه فصلی به جهت مشابهت این طبقات با میانگین بارش ماهانه و سالانه به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد. بنابراین، به نظر می‌رسد این نمایه بهینه‌ترین تکنیک برای تعیین رژیم‌های بارشی ناحیه خزری می‌باشد. بر مبنای این طبقه‌بندی رژیم بارشی، سه طبقه رژیم بارشی در ناحیه خزری وجود دارد. وجود این سه طبقه گویای حضور و فعالیت سیستم‌های همدید و محلی مختلفی در ناحیه خزری است. در واقع می‌توان گفت که، موقعیت جغرافیایی منحصر بفرد این منطقه بویژه قرارگیری آن بر جانب جنوبی دریای خزر، استقرار رشته‌کوه‌های مرتفع و توپوگرافی پیچیده همراه با جابه‌جایی مداوم پشته‌ها و ناهای امواج غربی بر روی منطقه، بروز چنین پیچیدگی را در ساختار بارش منطقه‌ای در پی داشته است (۲۴). همچنین، گسترش پرفشار سبیری از یک سو و گسترش جنوب‌سوی کم‌فشار ایسلند از سامانه‌های اثرگذار در بخش‌های غربی ناحیه خزری است (۴۰ و ۱۶). علاوه بر این گسترش پرفشار دریای سیاه و کم‌فشار مدیترانه‌ای (۱۹ و ۵) عوامل مؤثر بر بارش بخش‌های شرقی ناحیه است. بنابراین شناخت رفتار تناوبی و توزیع زمانی بارش ناحیه خزری از ضروریات اصلی این پژوهش می‌باشد، بدین جهت پیشنهاد می‌شود که به شناخت منشأ و سازوکار هر یک از بارش‌های ناحیه خزری پرداخته شود.

تغییر فصل از زمستان به بهار، تغییرات بارش در ناحیه خزری رو به کاهش است و با تغییر فصل از تابستان به پاییز، تغییرات بارش سیر صعودی می‌یابد.

نتایج حاصل از تحلیل چرخه‌ها نشان داد که در ناحیه خزری سه طبقه پراش همساز متمایز را می‌توان شناسایی نمود. پراکندگی جغرافیایی این طبقات نشان می‌دهد که تفاوت این طبقات متأثر از عرض جغرافیایی و فاصله از دریای خزر می‌باشد. نمایه ضریب تغییرات ماه به ماه بارش در ناحیه خزری بین ۱۰ تا ۸۰ درصد در نوسان می‌باشد. این وضعیت بر اختلاف زیاد نقاط از نظر تغییرپذیری ماه به ماه بارش دلالت دارد. بیش‌ترین ضریب تغییرپذیری ماه به ماه بارش (۶۰ تا ۷۰ درصد) در خط ساحلی دریای خزر می‌باشد. این وضعیت گویای تغییرات فراوان ماه به ماه و عدم ثبات فصل بارشی در این مناطق است. با دور شدن از خط ساحلی ضریب تغییرات نیز به تدریج کاسته می‌شود به طوری که در بخش‌هایی از جنوب دریای خزر (ارتفاعات البرز) بین ۱۵ تا ۳۰ درصد می‌باشد. این امر گویای تفاوت کم بارش دریافتی طی ماه‌های مختلف سال است. به عبارتی نشانگر فعالیت سامانه‌های متنوع باران‌زایی و با حداقل تداوم سامانه‌های باران‌زا در این قبیل نقاط و ثبات فصل بارشی است. نمایه یکنواختی بیانگر این است که، عموماً با افزایش بارش رژیم بارش متمرکزتر و با کاهش بارش توزیع زمانی بارش یکنواخت‌تر می‌گردد. بنابراین، در بخش‌های ساحلی دریای خزر توزیع بارش متمرکزتر است و با پیشروی به سمت مناطق جنوبی ناحیه (بخشی از ارتفاعات البرز) توزیع زمانی بارش یکنواخت‌تر می‌گردد. نمایه فصلی نشانگر وجود سه نوع رژیم بارشی در ناحیه خزری می‌باشد. رژیم یکنواخت کم‌ترین وسعت مکانی (۶/۲۸ درصد) را در بر می‌گیرد. این رژیم بارشی در بخش‌های کوچکی از ارتفاعات البرز مشاهده می‌گردد. مشخصه اصلی این رژیم بارشی این است که، علاوه بر برخورداری از بارش‌های ناشی از عوامل کلان، از بارش‌های همرفتی و محلی نیز متأثر می‌شوند. رژیم بارش یکنواخت

منابع

- 1- Abaje I.B., Ishaya S., and Usman S.U. 2010. An Analysis of Rainfall Trends in Kafanchan, Kaduna State, Nigeria. Research Journal of Environmental and Earth Sciences 2(2): 89-96.
- 2- Alboura J., Asin J., Centelles A., and Gonz'alez B. 2003. Spatial-temporal analysis of the precipitation in the Ebro basin. Journal of Hydrology 210: 67-99.
- 3- Alexandersson H. 1986. A Homogeneity Test Applied to precipitation data. Journal of Climatology, 6:661- 675.
- 4- Alijani B. 2008. Climate of Iran. Payam Noor University Press, Tehran. (In Persian)
- 5- Alijani B., Mohammadi H., and Bigdeli A. 2008. The Role of Pressure Patterns on the Precipitation of the South Coast of Caspian Sea. Territory 4(16): 37-52. (In Persian with English abstract)
- 6- Asakareh H. 2010. An analysis of precipitation regime change in Zanjan province. NIVAR Journal of Meteorological Organization 34(70,71): 63-76. (In Persian with English abstract)
- 7- Asakareh H., and Razmi R. 2011. Change of the Precipitation Regime in Northwest of Iran. Journal of Climate Research 2(7,8): 99-114. (In Persian with English abstract)
- 8- Asakareh H., and Razmi R. 2014. Temporal Distribution and Regime of Precipitation of Northwest of Iran. Geographical Researches 29(1): 145-160. (In Persian with English abstract)
- 9- Asakareh H. 2011. Fundamentals of Statistical Climatology. University of Zanjan Press, Zanjan. (In Persian)

- 10- Asakereh H., and Varnaseri ghandali N. 2021. Decade changes in monthly mean of precipitation in recent five decades over the Caspian coast of Iran territory. *Journal of Climate Research* 11(42):31-46. (In Persian with English abstract)
- 11- Clark S., Reeder M.J., and Jakob C. 2018. Rainfall regimes over northwestern Australia. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 144: 458-467.
- 12- Dalezios N.R., and Bartzokas A. 1995. Daily precipitation variability in semiarid agricultural regions in Macedonia, Greece. *Hydrological Sciences Journal* 40(5): 569-585.
- 13- Domroes M., Kaviani M., and Schaefer D. 1998. An analysis of regional and intra-annual precipitation variability over Iran using multivariate statistical methods. *Theoretical and Applied Climatology* 61: 151-159.
- 14- Farshadfar E. 2010. Principles and Methods of Multivariate Statistics. Sadaf Publications, Kermanshah. (In Persian)
- 15- Fetene Z.A., Weldegerima T.M., Zeleke T.T., and Nigussie M. 2018. Harmonic Analysis of Precipitation Time Series in Lake Tana Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology* 3: 1-9.
- 16- Ghashghaei Gh. 1996. Investigation of the effect of Siberian high pressure on the autumn Precipitation of the southern coast of the Caspian Sea. Master's thesis of natural geography. Tarbiat Moallem University. (In Persian with English abstract)
- 17- Ghayoor H.A., and Masoudian S.A. 1998. Spatial study of the uniformity index of temporal distribution of precipitation in Iran. *Geographical Researches* 13(2,3): 19-28. (In Persian)
- 18- Ghayoor H.A., Masoodiyan S.A., Azadi M., and Noori H. 2011. Temporal and Spatial Analysis of Precipitation Events in the Southern Coasts of Caspian Sea. *Geographical Researches* 26(100): 1-30. (In Persian with English abstract)
- 19- Halabian A.H., Dehghanpour A.R., and Ashori Ghaleroodkhany Z. 2016. Synoptic Analysis of Extreme and Widespread Precipitations in Caspian Eastern Coasts. *Geography and Environmental Hazards* 5(19): 37-57. (In Persian with English abstract)
- 20- Hosseini M., Masoodian S.A., and Movahedi S. 2015. Analysis of the Concurrence of Black Sea High Pressure System and Daily Precipitation in IRAN. *Geographical Researches* 30(1): 1-16. (In Persian with English abstract)
- 21- Jackson I.J., and Weinand H. 1995. Classification of tropical rainfall stations: a comparison of clustering techniques. *International Journal Climatology* 15(9): 985-994.
- 22- Jahanbakhsh S., Abtahi V., Ghorbani M.A., Tadayoni M., and Valaei A. 2015. Temporal and Spatial Distribution of Rainfall in Tabriz County Using Hierarchical Cluster Analysis. *Geographic Space* 15(50): 59-81. (In Persian with English abstract)
- 23- Jahanbakhsh S., and Karami F. 1999. Synoptic analysis of the effect of Siberian high-pressure on precipitation on the southern coasts of the Caspian Sea. *Geographical Researches* 54,55: 107-131. (In Persian)
- 24- Janbaz Ghobadi Gh.R., Mofidi A., and Zarrin A. 2011. Recognizing the Synoptic Patterns of Wintertime Heavy Precipitation in the Southern Coast of the Caspian Sea. *Geography and Environmental Planning* 22(2): 23-40. (In Persian with English abstract)
- 25- Justino F., Setzer A., Bracegirdle T.J., Mendes D., Grimm A., Dechiche G., and Schaefer C.E.G.R. 2010. Harmonic analysis of climatological temperature over Antarctica: present day and greenhouse warming perspectives. *International Journal Climatology* 31(4): 1-17.
- 26- Kadioglu M., Ozturk N., Erdun H., and Sen Z. 1999. on the precipitation climatology of Turkey by harmonic analysis. *International Journal Climatology* 19: 1717-1728.
- 27- Kansakar S.R., and Hannah D.M., Gerrard J., and Rees G. 2004. spatial pattern in the precipitation regime of Nepal. *International Journal Climatology* 24(13): 1645-1659.
- 28- Karagiannidis A., Bloutsos A., Mahers P., and Sachsamanoglou Ch. 2008. Some statistical characteristics of precipitation in Europe. *Theoretical and Applied Climatology* 91: 193-204.
- 29- Khalili A. 1973. Precipitation patterns of Central Elburz. *Theoretical and Applied Climatology* 21(2): 215-232.
- 30- Khorshiddoust A.M., and Shirzad A.A. 2014. The Study of Precipitation in North of Iran Using Cluster and Discriminative Function Analyses. *Journal of Geography and Planning* 18(49): 101-118. (In Persian with English abstract)
- 31- Khoshhaldastjerdi J. 1997. Analysis and presentation of synoptic climatological models for precipitation of more than one hundred millimeters on the southern coasts of the Caspian Sea. Ph.D Thesis in Natural Geography. Tarbiat Modares University. (In Persian with English abstract)
- 32- Kirkyla K.I., and Hameed S. 1989. Harmonic analysis of the seasonal cycle in precipitation over the united state: Acomparison between observations and a general circulation model. *Journal of Climate* 2(12): 1463-1475.
- 33- Lana A., Campins J., Genovés A., and Jans A. 2007. Atmospheric Patterns for Heavy Rain Events in The Balearic Islands. *Advances in Geosciences* 12: 27-32.
- 34- Livada I., and Asimakopoulos D.N. 2005 . Individual seasonality index of rainfall regimes in Greece. *Climate Research* 28(2): 155-161.
- 35- Livada I., Chralambous G., and Assimakopoulos M.N. 2008. Spatial and temporal study of precipitation characteristics over Greece. *Theoretical and Applied Climatology* 93: 45-55.

- 36- Lyra G.B., Oliveira-J ´unior J.F., and Zeri M. 2014. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Alagoas state, Northeast of Brazil. *International Journal Climatology* 34: 3546–3558.
- 37- Martinez M.D., Lana X., Burgueno A., and Serra C. 2007. Spatial and temporal daily rainfall regime in Catalonia (NE Spain) derived from four precipitation indices, years1950–2000. *International Journal Climatology* 27(1): 123–138.
- 38- Masoodiyan S.A. 2003. Investigation of Precipitation Geographical Dispersion In Iran through Rotated Factor Analysis. *Geography And Development Iranian Journal* 1(1): 79-87. (In Persian with English abstract)
- 39- Masoodiyan S.A. 2005. Identification of precipitation regimes in Iran by cluster analysis. *Geographical Research Quarterly* 37(1): 47-59. (In Persian)
- 40- Masoodiyan S.A. 2011. *Climate of Iran*. Sharia Toos Press, Mashhad. (In Persian)
- 41- Masoodiyan S.A., and Ataei H. 2005. A Cluster Analysis of Prcipitation Seasons of Iran. *Research Bulletin of Isfahan University (Humanities)* 18(1): 1-12. (In Persian with English abstract)
- 42- Mohammadi H., Azizi Gh., Taghavi F., and Yousefi Y. 2011. Temporal and Spatial Variability of Maximum Monthly Precipitation over Southern Parts of The Caspian Sea. *Physical Geography Research Quarterly* 43(75): 1-18. (In Persian with English abstract)
- 43- Nastos P.T., and Zerefos C.S. 2010. Cyclic Modes of the Intra-annual Variability of Precipitation in Greece. *Advances In Geosciences* 25: 45–50.
- 44- Oliveira-Júnior J.F., Góis G., and Coll Delgado R. 2017. Cluster analysis identified rainfall homogeneous regions in Tocantins state, Brazil. *Bioscience Journal* 33(2): 333-340.
- 45- Pohl E., Gloaguen R., and Seiler R. 2015. Remote Sensing-Based Assessment of the Variability of Winter and Summer Precipitation in the Pamirs and Their Effects on Hydrology and Hazards Using Harmonic Time Series Analysis. *Remote Sensing* 7: 9727-9752.
- 46- Pourasghar F., Jahanbakhsh S., Sari saraf B., Ghaemi H., and Tadayoni M. 2013. Precipitation Regime in South Part of Iran Studying of Iran. *Journal of Geography and Planning* 17(44): 27-46. (In Persian with English abstract)
- 47- Razmi R. 2010. Precipitation regime change in Azerbaijan of Iran. M.A physical Geography (climatology) thesis. Zanjan University. Faculty of Human Science. (In Persian with English abstract)
- 48- Reiser H., and Kutiel H. 2007. The rainfall regime and its uncertainty in Valencia and Larnaca. *Advances in Geosciences* 12: 101–106.
- 49- Saligheh M., Nasserzadeh M.H., and Chehreara Ziabari T. 2016. Study of the relation between NCPI and CACO indices with autumn precipitation of Southern Coast of Caspian Sea. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences* 16(43): 217-238. (In Persian with English abstract)
- 50- Scott C.M., and Shulman M.D. 1979. An Areal and Temporal Analysis of Precipitation in the Northeastern United States. *Journal of Applied Meteorology* 18: 627-633.
- 51- Tarawneh Q. 2016. Harmonic analysis of precipitation climatology in Saudi Arabia. *Theoretical and Applied Climatology* 124: 205-217.
- 52- Tarawneh Q., and Kadoglu M. 2003. An analysis of precipitation climatology in Jordan. *Theoretical and Applied Climatology* 74: 123-126.
- 53- Walsh R.P.D., and Lawler D.M. 1981. Rainfall seasonality spatial patterns and change through time. *Weather* 36(7): 201–208.



Identifying the Precipitation Regime of the Iranian Coast of Caspian Sea

H. Asakereh^{1*}- N. Varnaseri Ghandali²

Received: 23-11-2020

Accepted: 15-03-2021

Introduction: Precipitation is one of the most important climatic variables playing a decisive role for different purposes. Temporal changes in precipitation affect many climatic and environmental phenomena (such as runoff, floods, air temperature, and humidity) as well as many human activities (such as agriculture and housing). The precipitation regime includes all characteristics and statistics of precipitation in relation to its distribution throughout the year, and the temporal distribution of precipitation according to the months or seasons of the year is called the "Precipitation Regime."

Materials and Methods: The daily data of 385 stations were obtained from Iran Meteorological Organization and the Ministry of Energy for the period of 2016-1966 (51 years). The hidden aspects of precipitation and precipitation regime of the Iranian coast of Caspian Sea were studied. At first, these stations were used in order to create maps with a spatial resolution of 3×3 km, and the general specifications of the monthly and annual precipitation were presented. Sinusoidal behaviors of monthly precipitation in each pixels were then investigated. Accordingly, first to sixth harmonics were extracted. Finally, the cluster analysis method was used based on the Euclidean distance and the "Ward" method of linkage to identify the spatial patterns of precipitation based on the contribution of different periodic and its zoning. Then, the homogeneity and seasonal index of precipitation was estimated.

Results and Discussion: The results show that the mean annual precipitation is higher on the coastline, especially in the southwest of the Caspian Sea, and decreases as it passes from the coast. In the southwest parts of the Caspian Sea, maximum precipitation occurs in the autumn. At the Alborz highlands, the maximum and minimum precipitation fall during winter and summer, respectively. The monthly precipitation coefficient of variation indicates that with seasonal changes from winter to spring, precipitation changes in the Caspian region are declining, and with changes in seasonal precipitation from summer to autumn, precipitation changes are in the ascendant. The largest variability coefficient of the month to month of the precipitation (60 to 70 percent) was calculated at the coastline of the Caspian Sea. This shows notable month to month precipitation changes and seasonal instability in these areas. The coefficient of variation is gradually reduced by distance from the coastline. The lowest coefficient of variation was obtained in the southern parts of the Caspian Sea (the Alborz altitudes) between 15% and 30%. This suggests a small difference in rainfall over the course of the months. In other words, they indicate the activity of various rainy systems, or at least the continuity of rainy systems in these areas, and the stability of the precipitation season. The homogeneity index indicates that the precipitation distribution is more concentrated in the coastal areas of the Caspian Sea, and it becomes more uniform with the advance towards the southern parts of the area (part of the Alborz heights). The seasonal precipitation index of the Caspian Sea region indicates three types of precipitation regime. The lowest spatial extent (6.28%) is related to the uniform precipitation regime, found in small parts of the Alborz heights. The most abundant regime has a wetter season. This precipitation regime, which includes 76.13% of the Iranian coast of Caspian Sea, is observed in the eastern and western regions of the Caspian Sea. The third regime (13.25% of the study area), which is mainly seasonal with a short dry season, covers the Caspian Sea coastline, parts of the Talesh heights, and a small part of the eastern region.

Conclusion: The results revealed that the precipitation classes obtained based on the seasonal index were closer to the reality due to the similarity of these classes with the average monthly and annual precipitation. Therefore, this index seems to be the most optimal tool for determining precipitation regimes in the Caspian region. According to this precipitation regime classification, there are three classes of precipitation regime in the Caspian region. The existence of these three classes indicates the presence and activity of different synoptic and local systems in the

1 and 2- Professor of Climatology and Ph.D. Student in Climate Changes, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

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

DOI: 10.22067/jsw.2021.67063.0

Caspian region.

Keywords: Caspian region, Coefficient of variation index, Homogeneity index, Precipitation regime, Seasonal index

Contents

Simulation of Growth and Development of Tomato (<i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.) under Drought Stress: - Simulation of Soil Water Content, Evapotranspiration, and Green Canopy Cover	318
E. Farrokhi - M. Nassiri Mahallati- A. Koocheki- S.A. Beheshti	
Environmental Flow Assessment of Karun River in Upstream and Downstream of Beheshtabad Dam	333
F. Hayatgheibi - N. Shahnoushi- B. Ghahreman- H. Samadi Borujeni- M. Ghorbani- M. Sabouhi Sabouni	
Investigation of the Intra-Seasonal Sensitivity of Maize Evapotranspiration to Water Stress, at Different Irrigation Levels	348
R. Saeidi	
Optimization of Cropping Pattern through Groundwater Resources Management Using DE and PSO Algorithms	364
M. Komasi - A. Alizadefard	
Sediment Estimation Using Different Erosion Components	378
H. Saeediyani - H.R. Moradi	
Genesis and Micromorphology of Soils Located on Different Geomorphic Surfaces in the Jazmoorian Playa	394
S. Sanjari - M.H. Farpoor- M. Mahmoodabadi- S. Barkhori	
Effect of Soil Characteristics on Yield and Preparing the Crop Requirements Table of Oranges in Selected Areas of Iran	407
A. Zeinadini - M.N. Navidi- A. Asadi Kangarshahi- M. Eskandar- S.A. Seyed Jalali- A. Salmanpour- J. Seyedmohammadi- M. Ghasemi- S.A. Ghaffarinejad- Gh. Zareian	
The Impact of Breakpoints in Rainfall Time Series on Drought Characteristics Changes (Case Study: Tabriz and Arak Stations, Iran)	425
M. Gaznavi - A. Mosaedi - M. Ghabaei Sough	
Modeling Average Relative Humidity of Sunrise to Sunset Using Values Measured at Different Hours in Iran	443
B. Mirkamandar - H. Sanaeinejad - H. Rezaee-Pazhand- M. Farzandi	
Identifying the Precipitation Regime of the Iranian Coast of Caspian Sea	459
H. Asakereh - N. Varnaseri Ghandali	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 35

No. 3

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., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).