OPEN ACCESS
CC BY NC

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

واکاوی تغییرات آتی شاخص‌های خشکی اقلیمی در آبخیز ایران مرکزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم

تقی طاوسی[1]، فائزه شجاع[2] و نسرین حسین‌آبادی[3]

۱- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲- محقق پسادکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، ایران، (نویسنده مسوول: Faeze.shoja@yahoo.com)
۳- دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۵/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۹/۲۹
صفحه: ۸۶ تا ۱۰۲

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: مسئله خشکی و بحران آب در فلات مرکزی ایران طی سال‌های اخیر بدلیل خشکسالی‌های متوالی و افزایش مصرف آب در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت جدی شده است و از آنجاییکه در این آبخیز تنها منبع آب، بارش باران می‌باشد کاهش میزان بارش با این شدت، می‌تواند عامل وقوع یک خشکسالی وسیع و در نهایت مهاجرت‌های گسترده از این نواحی گردد. به‌همین دلیل هدف پژوهش حاضر این است که تغییرات شاخص خشکی در پهنه وسیع آبخیز ایران مرکزی را در اقلیم در حال گذار آینده مورد واکاوی قرار دهد.

مواد و روش‌ها: برای رسیدن به‌هدف پژوهش نخست، پارامترهای اقلیمی کمینه و بیشینه دمای هوا، ساعات آفتابی و بارش ۴۰ ایستگاه همدید در آبخیز مرکزی ایران برای بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۱۰-۱۹۹۱) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. سپس مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل، شاخص خشکی و شاخص بارندگی انگوت به تفکیک هر ایستگاه در شرایط فعلی محاسبه گردید. به‌منظور پیش‌نگری تغییرات شاخص خشکی در چشم‌انداز آینده نیز برونداد سه مدل MIROC5، HadGEM2-ES و GFDL-CM3 برای دوره تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) و آینده میانی (۲۰۶۰-۲۰۴۱) تحت سناریوی واداشت تابشی RCP4.5، بر پایه مولد تصادفی LARS-WG6 ریزمقیاس‌نمایی گردید و پس از ارزیابی دقت مدل‌ها در مقابل داده‌های مشاهداتی مقادیر شاخص‌های مورد نظر در شرایط آینده محاسبه و نقشه‌های پهنه‌بندی منطقه مطالعاتی ترسیم شد.

یافته‌ها: پیش‌نگری تغییرات درصد تبخیر و تعرق تحت سناریوی RCP4.5 در دوره (۲۰۶۰-۲۰۴۱) نشان داد که بیشترین تغییر مربوط به ماه‌های ژانویه، مارس، دسامبر و نوامبر بوده که در این میان، شهرکرد با ۳۶/۸ درصد تغییر در ژانویه نسبت به دوره پایه بیشترین درصد تغییرات افزایشی را به خود اختصاص داده است. از لحاظ رژیم بارشی آبخیز فلات مرکزی مبتنی بر شاخص بارندگی انگوت در شرایط فعلی رژیم بارش از نوع زمستانه داشته که در مدل HadGEM2-ES با دوره پایه همخوانی دارد اما براساس مدل‌های MIROC5 و GFDL-CM3 نوع بارش زمستانه حال حاضر در تعداد زیادی از ایستگاه‌ها، به رژیم بارشی همه فصول در آینده تغییر شکل پیدا خواهد کرد. پهنه‌بندی اقلیمی حوضه مورد مطالعه براساس شاخص خشکی یونپ نیز نشان داد که در شرایط کنونی بیش از نیمی از ایستگاه‌ها دارای اقلیم خشک هستند و تنها کوهرنگ با شاخص خشکی ۰/۷۸ دارای اقلیم مرطوب و شمیرانات و الیگودرز به ترتیب با ضریب خشکی ۰/۲۱ و ۰/۲۰ شرایط نیمه خشک دارند. واکاوی شرایط اقلیمی آینده مطابق مدل GFDL-CM3، گویای این مهم است که نوع اقلیم مرطوب در حوضه مرکزی به تدریج مضمحل خواهد شد در صورتی که اقلیم فراخشک در سطح این حوضه گسترش بیشتری پیدا خواهد کرد. برونداد حاصل از مدل MIROC5 نیز نشان دهنده پیشروی ناحیه آب و هوایی فراخشک در قسمت‌های مختلف آبخیز ایران مرکزی است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد مقادیر به‌دست آمده از شاخص خشکی برمبنای مدل‌های GCM منتخب در حوضه مورد مطالعه نسبت به دوره مشاهداتی کاهش پیدا کرده و بنابراین تعداد زیادی از ایستگاه‌ها با شرایط خشک فعلی، در اقلیم آتی وضعیت فراخشک را تجربه خواهند کرد. این مسئله با توجه به روند افزایشی تبخیر-تعرق پتانسیل در سطح حوضه ایران مرکزی طی همه ماه‌های سال به‌خصوص در ایستگاه‌های مرطوب واقع در غرب، نشان از حاکمیت پدیده خشکی بر این منطقه در شرایط آینده دارد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق پتانسیل، تغییر اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی آماری، شاخص خشکی، GCMs

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین تهدیدهایی است که جهان امروز و نسل‌های آینده با آن مواجه است (۲۹) و تغییرپذیری شاخص خشکی یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم جهانی شناخته می‌شود (۳۰). شاخص خشکی و کمبود آب مرتبط با آن، یک وضعیت هیدرولوژیکی و اقلیمی درازمدت بوده و پیامدهای گسترده‌ای بر پویایی جوامع انسانی و اکوسیستم‌های محیطی دارد (۱۱). طبق گزارش‌های ارزیابی چهارم و پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (AR4 و AR5)، اقلیم جهانی در قرن بیست و یکم با سرعت بی‌سابقه‌ای تغییر خواهد کرد و فراوانی وقوع رویدادهای اقلیمی شدید، مانند بارش‌های حدی، دماهای بالا، امواج گرمایی، خشکسالی و سیلاب نیز **به‌طور** بی‌سابقه‌ای افزایش خواهند یافت (۳۲،۳۳). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که پدیده خشکی، که برحسب عرضه جوی (بارش) و تقاضای آب (تبخیر و تعرق بالقوه، PET) تعریف می‌شود، در دهه‌های اخیر در سطح جهانی افزایش‌یافته و پیش‌بینی می‌شود در آینده نیز به میزان قابل‌توجهی گسترش یابد (۱۷،۳۱). هرچند عدم قطعیت در سازوکارهای طبیعی و انسانی که منجر به تغییرات ضریب خشکی می‌شود، وجود دارد اما با گرم شدن کره زمین، انتظار می‌رود میانگین دوره‌های خشکسالی به‌تدریج بیشتر شده و به دلیل تغییر در عرضه و تقاضای رطوبت، تقریباً دوسوم جمعیت جهان خشکسالی شدید را تجربه خواهند کرد (۶).

برای نمایش دقیق ویژگی‌های پدیده خشکی در نواحی مختلف دنیا شاخص‌های متعددی براساس نیازها و اهداف طراحی شده‌اند؛ شاخص‌های خشکی نه‌تنها شاخص‌های مهمی برای بررسی رشد و توسعه بالقوه گیاهان هستند، بلکه می‌توانند برای مطالعه تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گیرند و همچنین عاملی در توضیح ویژگی‌های اقلیمی یک منظر باشند. از طرف دیگر این شاخص‌ها قادر هستند به شناسایی و طبقه‌بندی مخاطرات طبیعی اقلیمی مانند خشکسالی کمک نمایند (۲۲). اکثر مطالعات از مدل‌ها/شاخص‌های ساده

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

به‌عنوان نماینده ضریب خشکی استفاده می‌کنند که رویکرد شاخص خشکی (AI[1]) بیشترین استفاده را دارد: شاخص خشکی به‌عنوان نسبت تبخیر و تعرق بالقوه به بارش (PET/P) تعریف شده که گاهی اوقات معکوس آن به‌عنوان شاخص رطوبت (P/PET) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. AI مفهوم خشکی را در یک عدد خلاصه می‌کند؛ این شاخص ساده است و **به‌طور** ایده‌ال نشان‌دهنده تعامل پیچیده فرآیندهای جوی و سطح زمین می‌باشد که خشکی‌های زمین را شکل می‌دهند (۲۴). طی سال‌های اخیر نیز AI بر اساس مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها در سطح جهانی و منطقه‌ای در ارتباط با تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار گرفته است (۵۹). ازآنجاییکه بارش و تبخیر-تعرق اجزای تشکیل‌دهنده شاخص خشکی و مؤلفه‌های مؤثر بر وضعیت هیدرولوژیکی آبخیزها محسوب می‌شوند و از طرف دیگر در مطالعات تغییر اقلیم، تبخیر-تعرق به‌عنوان سومین عامل اقلیمی مهم کنترل کننده‌ی انرژی و جریان توده‌ای بین خشکی و اتمسفر مطرح است (۱۸)، بنابراین در پژوهش حاضر علاوه بر شاخص خشکی یونپ، از شاخص بارش انگوت با هدف تعیین تغییرات سالانه رژیم‌های بارشی و همچنین تغییرات تبخیر و تعرق برای برآورد شدت خشکی استفاده می‌شود. برخی پژوهش‌ها مانند دومیتراشکو و همکاران (۱۶) و لوکیک و همکاران (۳۷) از شاخص بارش آنگوت در ارزیابی فرسایش بارشی استفاده کردند. درویشی و قدم خیر (۱۳) جهت تحلیل اثرات درجه خشکی و مصطفی‌زاده و همکاران (۴۱) به‌منظور مطالعه تغییرات رژیم‌های خشک و مرطوب شاخص بارش انگوت را مورد استفاده قرار دادند. پیرامون شاخص AI نیز پژوهش‌های متعددی در نواحی مختلف دنیا صورت گرفته که نشان می‌دهند گستره‌های خشکی **به‌طور**کلی در شرایط افزایش CO2 و گرمایش جهانی افزایش می‌یابند (۵۰،۱۷،۲۱). مطابق مطالعه راماچاندران و همکاران (۴۷) در پایان قرن بیست و یکم، شرایط خشکی در ساحل شرقی جنوب هند تحت سناریوی RCP4.5 افزایش خواهد یافت زیرا مقادیر شاخص تمایل به کاهش دارند و این روند افزایشی پدیده خشک شدن را می‌توان به افزایش میانگین دمای سالانه نسبت داد. ون و همکاران (۶۰) با مطالعه اثرات تغییر اقلیم بر AI در فلات لوس چین به این نتیجه رسیدند که مرز منطقه خشکی بر اساس AI در سراسر فلات لوس طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۴ گسترش یافته است. وانگ و همکاران (۵۹) تغییرات آینده شاخص خشکی را بر مبنای خروجی مدل‌های CMIP5 در نواحی مختلف دنیا پیش‌نگری کردند. این پیش‌نگری که در سطوح ۲ و ۴ درجه سانتیگراد بیشتر، از دوره ماقبل صنعتی شدن انجام گرفت نشان‌دهنده این بود که مقادیر AI در عرض‌های جغرافیایی بالا کاهش بیشتری خواهد داشت. امانی و همکاران (۴) در بررسی پدیده خشکی تحت شرایط افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم در استان فارس به این نتیجه رسیدند هرچقدر از دوره ۲۰۳۰ دورتر و به دوره ۲۰۹۰ نزدیک‌تر می‌شویم، شدت پدیده خشکی در استان افزایش بیشتری می‌یابد. بررسی روند تغییرات شاخص خشکی طی دوره ۲۱۰۰-۱۹۶۶ در شمال غرب ایران بیانگر کاهش شدید شاخص تحت سناریوی A2 در این نواحی بود (۴۳). بختیاری و همکاران (۹) به‌منظور پیش‌نگری تغییرات AI در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰)، از مدل گردش عمومی جو (CanESM2) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 استفاده کردند. خروجی این مطالعه که برای ۵ اقلیم متفاوت ایران در ایستگاه‌های رشت، یاسوج، ایلام، مشهد و کرمان ارائه گردید حاکی از افزایش ضریب خشکی در همه ایستگاه‌ها به‌جز مشهد بود. نتایج مطالعات ذکرشده نشان می‌دهد که پدیده خشکی در بسیاری از مناطق جهان به دلیل تغییرات آب‌وهوایی تشدید گردیده است؛ این مسئله در نواحی خشک و نیمه‌خشک که حدود ۴۰ درصد از سطح زمین‌های جهان را شامل می‌شوند و بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات آب‌وهوایی دارند (۴۶) بسیار حائز اهمیت است. مسئله خشکی و بحران آب در فلات مرکزی ایران به ویژه استان‌های چهارمحال بختیاری، اصفهان و یزد طی سال‌های اخیر بدلیل خشکسالی‌های متوالی و افزایش مصرف آب در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت بسیار جدی شده است (۳۹). در آبخیز ایران مرکزی تنها منبع تأمین آب، بارش باران است و رودخانه با آورد زیاد و یا دریاچه آب شیرین با حجم قابل توجهی وجود ندارد. از طرفی بارش برف نیز در این ناحیه ناچیز بوده و به‌علت برخورداری از مناطق کم ارتفاع برف اندک زمستانی برای فصول پر مصرف بعدی ذخیره نمی‌گردد. بنابراین کاهش میزان بارش باران با این شدت، می‌تواند عامل وقوع یک خشکسالی وسیع باشد (۴۴). هرچند خشکی و کم آبی از ویژگی‌های ذاتی فلات مرکزی ایران است اما از آنجاییکه چالش کم آبی در نواحی مختلف کشور به مرحله بحرانی رسیده، ادامه این وضع موجب بروز مشکل در زمینه تأمین آب آشامیدنی، مختل شدن برخی فعالیت‌های کشاورزی و صنایع و در نهایت مهاجرت‌های گسترده خواهد شد. اگرچه در مطالعات مختلف (۴۸،۵۳،۵۶) پدیده خشکی در دیگر مناطق ایران مورد ارزیابی قرار گرفته، اما تغییرات این شاخص در حوضه وسیع مرکزی ایران با در نظر گرفتن تبخیر- تعرق پتانسیل و همچنین نوع رژیم بارشی در شرایط فعلی و آینده مسئله مهمی است که تاکنون به آن پرداخته نشده است. به همین دلیل هدف پژوهش حاضر این است تا به این پرسش کلیدی پاسخ دهد که پدیده خشکی در پهنه وسیع آبخیز ایران مرکزی در اقلیم در حال گذار آینده چه تغییراتی خواهد کرد؟

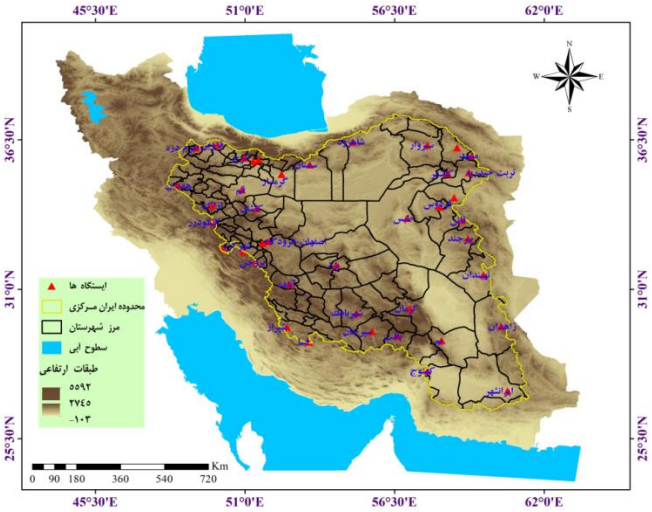
مواد و روش‌ها

موقعیت محدوده مورد مطالعه

آبخیز ایران مرکزی، بزرگترین حوضه منطقه‌ای ایران به شمار می‌رود که با وسعتی بالغ بر ۸۲۸ هزار کیلومترمربع، حدود ۵۱ درصد از مساحت کشور را دربرگرفته است. این پهنه جغرافیایی از نه آبخیز شامل دریاچه نمک، آبخیز اصفهان، گاوخونی، آبخیز دریاچه‌های تشک بختگان و مهارلو، آبخیز هامون- جازموریان، آبخیز کویر لوت، آبخیز کویر مرکزی، آبخیز کویر سیاه کوه، آبخیز ریگ زرین و دق سرخ و سرانجام آبخیز کویرهای درانجیر- ساغند تشکیل شده است. منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم نیمه خشک تا خشک می‌باشد و

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

میانگین بارش آن به جز در ارتفاعات محدود، از ۱۰۰ میلی‌متر در سال تجاوز نمی‌کند. بنابراین با وجود وسعت زیاد تنها ۳۰ درصد از حجم آب حاصل از نزولات جوی کل کشور را در خود دارد. آبخیز ایران مرکزی استان‌های اصفهان، یزد، کرمان، فارس و بخش‌هایی از استان‌های تهران، قم، مرکزی، سمنان، همدان، زنجان، هرمزگان، چهارمحال بختیاری، سیستان و بلوچستان، خراسان رضوی و جنوبی را دربرمی‌گیرد (۱۰، ۳۵).



شکل ۱- موقعیت آبخیز ایران مرکزی
Figure 1. Central Iran watershed

به‌منظور ارزیابی شاخص‌های خشکی در دوره مشاهداتی نخست پارامترهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه، ساعات آفتابی و بارش ۴۰ ایستگاه سینوپتیک واقع در محدوده آبخیز ایران مرکزی برای بازه زمانی ۲۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۱۰) از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ درج گردیده است. در ادامه جهت پیش‌نگری تغییرات خشکی در چشم‌انداز آتی خروجی مدل‌های GCM منتخب از سری مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم IPCC (CMIP5) برای دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۰) و آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) تحت سناریوی حدواسط RCP4.5 و برمبنای مولد تصادفی LARS-WG6 استخراج گردید. مراحل انجام پژوهش در ادامه تشریح می‌گردد:

شاخص خشکی (AI)

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر ارزیابی تغییرات شاخص خشکی در شرایط آتی در مقایسه با دوره زمانی فعلی است، ابتدا لازم است مقادیر AI براساس پارامترهای دما و بارش برای ایستگاه‌های مختلف محاسبه گردد. شاخص خشکی یک معیار پرکاربرد برای توصیف کمبود آب در یک اقلیم معین است (۳۰). این شاخص که به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، خشکی را با نسبت بارندگی (P) به تبخیر و تعرق بالقوه (PET) مطابق رابطه ۱، محاسبه می‌کند:

$$AI = \frac{P}{PET}$$ رابطه (۱)

در این رابطه، P و PET مقادیر متوسط سالانه هستند که در واحد طول بیان می‌شوند. جدول ۲ هفت طبقه درجه خشکی را بر اساس مقدار AI نشان می‌دهد. شدت خشکی با کاهش مقدار AI افزایش می‌یابد.

پژوهش‌های متعدد حاکی از این است که گنجاندن پارامتر تبخیر- تعرق در محاسبات شاخص خشکی، تخمین واقعی‌تری از کمبود آب یک منطقه ارائه می‌دهد (۵۸)، بنابراین در میان شاخص‌های مختلف خشکی، مواردی که بر اساس PET محاسبه می‌شوند، مانند AI، می‌توانند تنوع شرایط آب و هوایی را به روشی بسیار بهتر بیان کنند (۵۲).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

جدول ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Location of stations used in the study

نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی Lon	عرض جغرافیایی Lat	نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی Lon	عرض جغرافیایی Lat	نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی Lon	عرض جغرافیایی Lat	نام ایستگاه Station	طول جغرافیایی Lon	عرض جغرافیایی Lat
آباده Abadeh	52.62	31.2	قم Qom	50.86	34.77	گناباد Gonabad	58.68	34.35	زاهدان Zahedan	60.9	29.47
اصفهان Isfahan	51.71	32.52	سبزوار Sabzevar	57.65	36.21	همدان Hamedan	48.53	34.87	اراک Arak	49.78	34.07
اصفهان‌فرودگاه Isfahan airport	51.86	32.74	سمنان Semnan	53.42	35.59	ایرانشهر Iranshahr	60.72	27.23	بروجن Borujen	51.3	31.98
الیگودرز Aligudarz	49.7	33.41	شهربابک Shahr-e Babak	55.13	30.1	کاشان Kashan	51.48	33.97	کهنوج Kahnuj	57.71	27.99
بافت Baft	56.58	29.23	شاهرود Shahrud	54.93	36.38	کرج Karaj	50.95	35.81	خرم دره Khorramdarre	49.21	36.2
بم Bam	58.35	29.1	شمیرانات Shemiranat	51.49	35.8	کاشمر Kashmar	58.47	35.27	کوهرنگ Kuhrang	50.13	32.46
بیرجند Birjand	59.28	32.89	شیراز Shiraz	52.6	29.56	کرمان Kerman	56.96	30.26	تهران مهرآباد Tehran-Mehrabad	51.31	35.69
فسا Fasa	53.72	28.9	سیرجان Sirjan	55.66	29.55	مشهد Mashhad	59.63	36.24	نهبندان Nehbandan	60.03	31.54
فردوس Ferdows	58.18	34.03	تربت حیدریه Torbat-e Heydarieh	59.21	35.33	نیشابور Nishapur	58.8	36.27	شهرکرد Shahrekord	50.84	32.29
گرمسار Garmsar	52.36	35.24	یزد Yazd	54.29	31.9	قائن Qaen	59.18	33.74	طبس Tabas	56.95	33.6

جدول ۲- طبقه‌بندی آب و هوایی بر اساس شاخص خشکی

Table 2. Climate classification based on aridity index

نماد Symbol	تیپ اقلیمی Climate Type	شاخص خشکی یونپ UNEP Aridity index
E	فرا خشک (Extremely-arid)	I<0.05
A	خشک (Arid)	0.05<=I<0.2
S	نیمه خشک (Semi-arid)	0.2<=I<0.5
D	خشک نیمه مرطوب (Dry sub humid)	0.5<=I<0.65
M	نیمه مرطوب (Subhumid)	0.65<=I<0.75
H	مرطوب (Humid)	0.75<=I<=1
V	بسیار مرطوب (Very humid)	1<I

محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه

مقادیر AI به‌طور قابل‌توجهی بستگی به‌روش استفاده شده برای محاسبه PET دارد. روش‌های متعددی برای تخمین PET وجود دارد که درجه دقت آن‌ها با توجه به در دسترس بودن داده‌ها، مقیاس زمانی، کاربرد و نوع آب‌وهوا متفاوت است (۱۵). برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در پژوهش حاضر از روش هارگریوز- سامانی(۲۷) که مبتنی بر حداقل داده‌های اقلیمی است استفاده شده است:

هدف مرکز بین‌المللی آبیاری[1] توسعه روش‌های ساده و کاربردی برای برآورد نیاز آبی محصول با حداقل داده‌های اقلیمی است، زیرا عمده‌ترین مشکلات مربوط به اکثر روش‌های محاسبه و تخمین تبخیر و تعرق بالقوه در دسترس نبودن داده‌های اقلیمی و ضرورت کالیبراسیون محلی است و در بسیاری از کشورها داده‌های اقلیم‌شناسی اغلب ناقص و نادرست است. معادله هارگریوز و سامانی (۲۷) با داشتن حداکثر و حداقل دما قادر است تبخیر و تعرق را در دوره‌های ۲۴ ساعته، هفتگی، ۱۰ روزه و ماهانه محاسبه کند (۲). این معادله مطابق رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$ET0 = 0.0023 \times (T_{mean} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a$$ رابطه (۲)

در اینجا ET0: تبخیر- تعرق (میلی‌متر بر روز)، T_{max}، T_{min} و T_{mean}: به‌ترتیب بیشینه، کمینه و میانگین دمای روزانه برحسب درجه سلسیوس هستند. R_a: میزان تشعشع ورودی در بالای اتمسفر (میلی‌متر بر روز) است که براساس معادله ۳ محاسبه می‌شود:

رابطه (۳)

$$R_a = \frac{24(60)GSC}{\pi}\left[1 + 0.0033\cos\left(2\pi = \frac{N}{365}\right)\right] \times [Ws\sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(Ws)]$$

در رابطه فوق Gsc: ثابت خورشیدی معادل ۱۳۷۰ وات بر مترمربع (۱۹۹۶ لانگلی در دقیقه)، n: شماره روز که بر مبنای اول ژانویه، محاسبه می‌شود، δ: زاویه میل خورشید که بنا بر حرکت لحظه‌ای زمین در هر عرض جغرافیایی برای هر روز

1- International Irrigation Center

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

متغیر است، φ: عرض جغرافیایی محل و Ws: زاویه ساعتی غروب خورشید است که با توجه به فصل تابش و عرض جغرافیایی متغیر می‌باشد (۵۴). این محاسبات بر اساس میانگین ماهانه برای هر ایستگاه به طور مجزا در نرم‌افزار ماکرو اکسل ارائه‌شده توسط طاوسی (۵۷) محاسبه گردید.

شاخص بارندگی Angot (k)

شاخص بارندگی انگوت برای ارزیابی مازاد یا کسری بارش، به‌عنوان یک بیان ریاضی از نسبت بین میانگین بارندگی سالانه و ماهانه به دست می‌آید. این شاخص بر اساس تعداد روزهای ماه مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در این روش مقادیر K>1 نشان‌دهنده ماه مرطوب و K<1 نشان‌دهنده ماه خشک است (۱۳، ۳۸).

رابطه (۴)

$$k = p/P$$
$$p = q/n$$
$$P = Q/365$$

در رابطه فوق، q: میانگین بارندگی در یک ماه را نشان می‌دهد، Q: بیانگر میانگین بارندگی سالانه، n: تعداد روزهای ماه و ۳۶۵، تعداد روزهای سال با احتساب سال کبیسه است. براساس ضریب شاخص بارندگی ماهانه، ماه‌های خشک به چهار گروه، خشکی شدید (De)، خشکی زیاد (Dh)، خشکی متوسط (Dm) و خشکی ضعیف (Dw) تقسیم می‌شوند (۵۷).

شاخص بارندگی انگوت برای ارزیابی شرایط خشکی و تعیین رژیم‌های بارشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین رژیم بارندگی در این روش برمبنای طبقه‌بندی اقلیمی کوپن به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

رژیم بارش زمستانه (c): اگر ۷۰ درصد یا بیشتر از میانگین مجموع بارندگی سالانه در دوره سرد سال طی فصول پاییز و زمستان رخ دهد، رژیم بارندگی زمستانه است.

رژیم بارش تابستانه (b): اگر ۷۰ درصد یا بیشتر از میانگین مجموع بارندگی سالانه در دوره گرم سال طی فصول بهار و تابستان ریزش کند، رژیم بارندگی تابستانه است.

رژیم بارش همه فصول (a): اگر پراکندگی بارش در سال چنان باشد که درصد بارش هیچ‌یک از دو دوره گرم یا سرد سال به ۷۰ درصد میانگین مجموع بارندگی سالانه نرسد، رژیم بارندگی همه فصول است (۵۵).

ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های GCM

مدل‌های گردش کلی جو (GCMs) ابزار اولیه برای شبیه‌سازی آب‌وهوای فعلی و پروژه آب‌وهوای آینده هستند؛ بااین‌حال، شبیه‌سازی‌های GCM از آب‌وهوای محلی در مقیاس‌های فضایی کوچک‌تر از سلول‌های شبکه، اغلب ضعیف هستند، به‌ویژه زمانی که منطقه موردمطالعه توپوگرافی پیچیده را نشان می‌دهد. بنابراین، مدل‌های GCM در مقیاس بزرگ نباید مستقیماً برای مطالعات تأثیر استفاده شوند؛ در چنین شرایطی تولید اطلاعات زیر مقیاس شبکه GCMها، که به آن کاهش مقیاس می‌گویند، در ارزیابی تأثیر تغییرات آب‌وهوا موردنیاز است. در هر مدل اقلیمی تلاش شده تا فرآیندهایی که بر اقلیم مؤثرند شبیه سازی گردد و بر اساس آن وضعیت اقلیم برای سال‌های آینده پیش‌بینی شود. چون پیش‌بینی در شرایط اقلیم آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم به‌طور قطعی ممکن نیست، راه حل جایگزین، مشخص کردن امکان رخدادهای گوناگون با سناریوی اقلیمی است (۴۰). در پژوهش حاضر جهت تولید سناریوهای آینده بارش و دما از برونداد ۳ مدل گردش کلی جو (جدول ۳) تحت سناریوی واداشت تابشی RCP4.5 برای دوره آینده متوسط (۲۰۴۱–۲۰۶۰) استفاده شده است. RCP4.5 یک سناریوی تثبیت میانی با غلظت معادل CO2 ۵۸۰ تا ۷۲۰ ppm تا سال ۲۱۰۰ متغیر است.

برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های منتخب از روش آماری مولد تصادفی LARS-WG6 استفاده شده است. LARS-WG یک مولد تصادفی آب‌وهوا است که به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی در قالب سری‌های زمانی روزانه در یک مکان واحد تحت شرایط آب و هوایی فعلی و آینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین نسخه LARS-WG توسط راسکو و همکاران (۴۶) ارائه شد. نسخه ششم این مدل در سال ۲۰۱۸ جهت ریزمقیاس‌نمایی داده‌های گزارش پنجم (CIMP5) به‌روزرسانی و منتشر گردید (۲۸).

LARS-WG از داده‌های اقلیمی روزانه مشاهده شده در یک مکان معین برای محاسبه مجموعه‌ای از پارامترها جهت توزیع‌های احتمال متغیرهای آب و هوایی و همچنین همبستگی بین آن‌ها استفاده می‌کند. سپس این پارامترها برای تولید سری‌های زمانی آب‌وهوای مصنوعی با طول دلخواه با انتخاب تصادفی مقادیر از توزیع‌های مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرند. LARS-WG از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند که به‌عنوان تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) توزیع احتمال تقریبی داده‌های آب‌وهوای روزانه شناخته می‌شود (۲۶).

برای اجرای مدل LARS-WG داده‌های روزانه دمای کمینه، بیشینه، ساعات آفتابی و بارش طی دوره آماری ۱۹۹۱–۲۰۱۰ استفاده گردید و به‌عنوان مبنای تغییر اقلیم گذشته جهت شبیه‌سازی اقلیم آینده به کار گرفته شد. تولید داده در مدل LARS-WG در سه مرحله کالیبره کردن، ارزیابی و ایجاد داده‌های هواشناسی انجام می‌شود. در این مدل از روش زنجیره مارکف برای مدل‌سازی بارش استفاده می‌شود و سری‌های فوریه، دما را تخمین می‌زنند. دماهای کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرایندهای تصادفی و با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مورد نظر هستند، مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه سازی میانگین و انحراف معیار دمای فصلی بکار می‌رود. مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیده‌بانی شده بدست می‌آیند، در تحلیل خود همبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه استفاده می‌شوند.

در نهایت شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف (ENS) ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌منظور ارزیابی عملکرد و اطمینان از توانمندی مدل در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی آینده مورد استفاده قرار گرفت (۱۴،۶۱).

روابط مربوط به معیارهای اعتبار سنجی در ادامه آورده شده است:

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

رابطه (۵)
$$ENS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - O')^2}$$

در این معادله n: تعداد نقاط داده مشاهده شده را نشان می‌دهد، O_i و P_i : بیانگر داده‌های مشاهده شده و پیش‌بینی‌شده در زمان i و O': میانگین داده‌های مشاهده شده است.

در رابطه ۶، X_{obs}: مقدار مشاهده شده و X_{model} : مقدار شبیه‌سازی شده در زمان/مکان i است.
جایی که o_i و s_i: به‌ترتیب داده مشاهده شده و مدل شده را نشان می‌دهند. $\bar{o}$ و $\bar{s}$: نیز میانگین و σ_s و σ_o: انحراف معیار داده های مشاهده شده و مدل سازی شده هستند.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد GCMهای منتخب در تولید داده‌های اقلیمی

جهت درستی آزمایی عملکرد مدل‌های منتخب در بازتولید داده‌های دما و بارش حوضه مطالعاتی در چشم انداز آینده، خروجی داده‌های محاسباتی مدل‌ها طی دوره تاریخی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) و داده‌های ایستگاهی با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. در این مرحله با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌های منطقه، ۱۱ ایستگاه از مناطق مختلف به‌عنوان نماینده کل حوضه ایران مرکزی انتخاب گردیدند. نتایج این مقایسه که مبتنی بر آماره‌های های ENS، RMSE و R2 انجام گرفت در جدول ۳ نشان داده شده است. ضریب ENS یکی از پرکاربردترین توابع هدف در مطالعات مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. ENS به طور کلی بین ∞- تا ۱ قرار دارد، ارزش‌های

رابطه (۶)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

رابطه (۷)
$$R2 = \left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sigma_s \times \sigma_o}\right]^2$$

مثبت به سمت ۱، نشان دهنده تطابق خوب بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است (۱۴). RMSE برای ارزیابی قدرت پیش‌بینی مدل‌های مختلف استفاده می‌شود. کارایی ۱ مربوط به تطابق کامل پارامترهای مدل شده با داده‌های مشاهده شده است. کارایی صفر (RMSE = 0) نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های مدل به اندازه میانگین داده‌های مشاهده شده دقیق هستند.

جدول ۳- مشخصات GCMهای مورد استفاده در پژوهش
Table 3. Characteristics of GCMs used in the study (https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/data-portal.html)

نام مدل (Model)	مؤسسه/کشور (Institute/country)	طول × عرض (Lat×Lon)
GFDL-CM3	آزمایشگاه ژئوفیزیک و دینامیک سیالات ایالات متحده National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics	2.5 ° × 2°
HadGEM2-EC	مرکز هادلی، سازمان هواشناسی انگلستان UKMO Hadley Centre, United Kingdom	1. 875° × 1. 25°
MIROC5	مؤسسه تحقیقات جوی و اقیانوسی دانشگاه توکیو Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), Japan	1.41° × 1.39°

جدول ۴- نتایج اعتبارسنجی پارامترهای اقلیمی برونداد مدل‌های GCM در مقایسه با داده‌های مشاهداتی
Table 4. Validation of climate parameters of GCM models compared to observational data

آباده Abadeh	بافت Baft	ایرانشهر Iranshahr	اصفهان Isfahan	کرج Karaj	کوهرنگ Kuhrang	نهبندان Nehbandan	سبزوار Sabzevar	شاهرود Shahrud	تربت حیدیه Torbate Heydarieh	یزد Yazd		
بارش (Precipitation)												
2.38	3.37	0.96	2.87	4.19	7.92	4.53	2.44	1.76	3.85	1.1	RMSE	MIROC5
0.95	0.95	0.98	0.92	0.93	0.97	0.88	0.97	0.96	0.96	0.95	NS	
0.96	0.97	0.99	0.92	0.94	0.97	0.88	0.98	0.97	0.97	0.98	R2	
2.95	5.37	2.15	2.24	2.62	9.16	2.67	2.37	1.91	2.11	0.79	RMSE	
0.93	0.93	0.92	0.95	0.97	0.95	0.96	0.97	0.96	0.96	0.98	NS	HadGEM2-ES
0.96	0.97	0.94	0.95	0.98	0.96	0.96	0.98	0.99	0.99	0.98	R2	
3.02	3.1	1.9	2.73	4.11	6.95	3.98	1.83	1.8	2.49	1.2	RMSE	
0.92	0.98	0.94	0.92	0.93	0.98	0.91	0.98	0.96	0.98	0.94	NS	GFDL-CM3
0.95	0.98	0.94	0.93	0.93	0.98	0.91	0.98	0.97	0.99	0.98	R2	
دمای کمینه (Minimum temperature)												
0.3	0.25	0.27	0.29	0.29	0.23	0.26	0.23	0.21	0.22	0.25	RMSE	MIROC5
0.9983	0.9988	0.9988	0.9988	0.9985	0.999	0.9993	0.9993	0.9993	0.9995	0.9991	NS	
0.9984	0.9988	0.9988	0.999	0.9989	0.9991	0.9994	0.9994	0.9994	0.9995	0.9992	R2	
0.3	0.22	0.2	0.26	0.24	0.16	0.37	0.21	0.27	0.21	0.21	RMSE	
0.9983	0.9992	0.9993	0.999	0.999	0.9996	0.9981	0.9994	0.9989	0.9992	0.9994	NS	HadGEM2-ES
0.9984	0.9992	0.9993	0.9991	0.9991	0.9996	0.9989	0.9994	0.999	0.9995	0.9994	R2	
0.24	0.21	0.23	0.24	0.25	0.21	0.34	0.29	0.22	0.23	0.29	RMSE	
0.9989	0.9992	0.9991	0.9991	0.9989	0.9994	0.9984	0.9988	0.9993	0.9992	0.9989	NS	GFDL-CM3
0.9989	0.9992	0.9991	0.9993	0.9991	0.9994	0.9991	0.999	0.9993	0.9995	0.999	R2	
دمای بیشینه (Maximum temperature)												
0.22	0.27	0.26	0.3	0.28	0.17	0.35	0.28	0.32	0.34	0.35	RMSE	MIROC5
0.9994	0.9993	0.999	0.999	0.9993	0.9997	0.9985	0.9992	0.9989	0.9987	0.9986	NS	
0.9995	0.9994	0.9992	0.9992	0.9994	0.9998	0.9987	0.9993	0.9992	0.9989	0.9987	R2	
0.26	0.3	0.23	0.23	0.34	0.25	0.38	0.36	0.36	0.37	0.38	RMSE	
0.9991	0.9986	0.9993	0.9994	0.9989	0.9994	0.9982	0.9987	0.9986	0.9982	0.9984	NS	HadGEM2-ES
0.9992	0.9989	0.9993	0.9994	0.9992	0.9996	0.9984	0.999	0.999	0.9984	0.9984	R2	
0.28	0.24	0.27	0.26	0.31	0.26	0.35	0.32	0.28	0.3	0.41	RMSE	
0.9989	0.9991	0.9989	0.9993	0.999	0.9993	0.9985	0.999	0.9992	0.9989	0.9981	NS	GFDL-CM3
0.999	0.9992	0.999	0.9994	0.9991	0.9998	0.9986	0.9993	0.9994	0.9991	0.9982	R2	

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

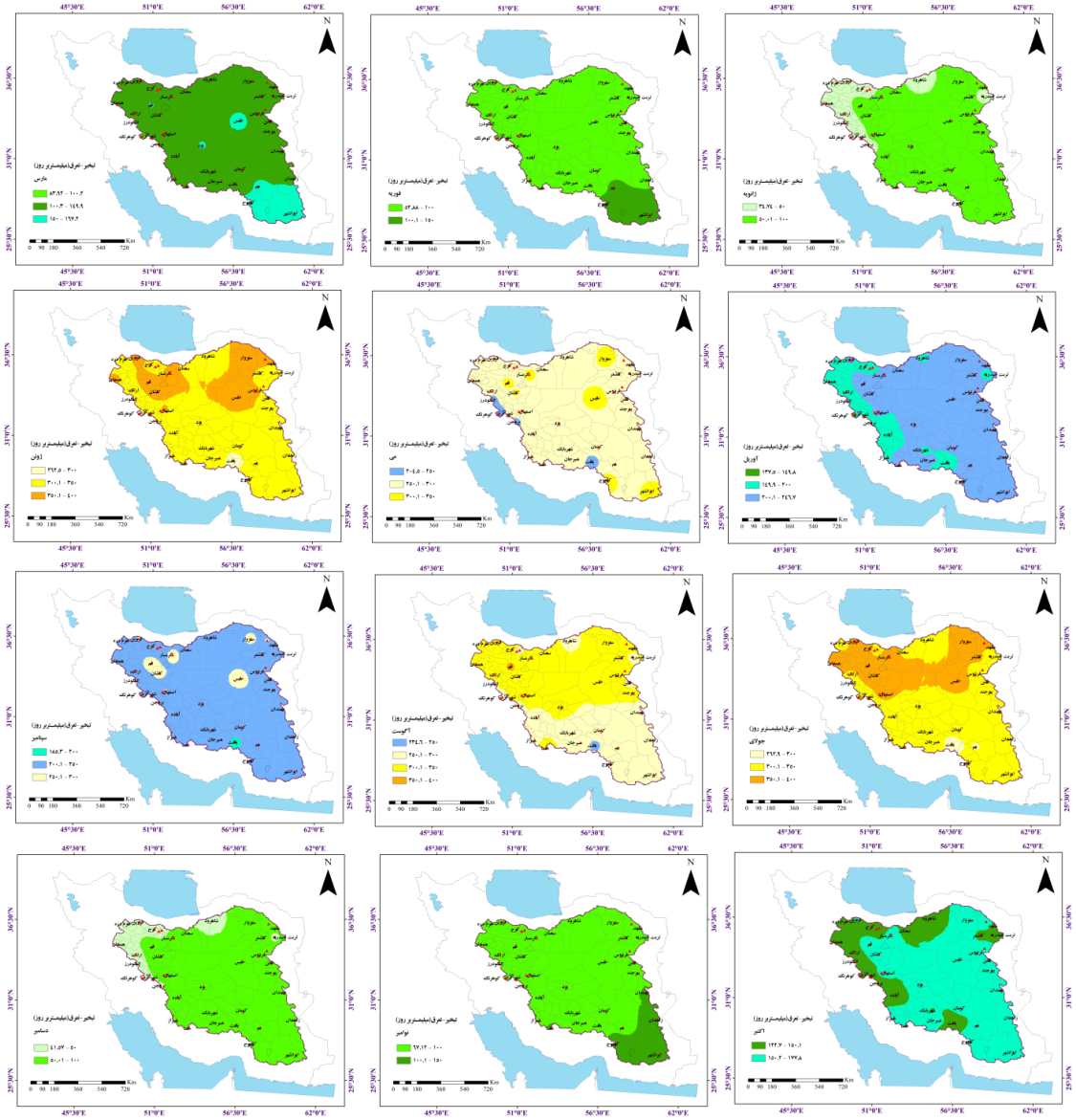
R^2 نیز رابطه بین داده‌های مشاهده شده و مدل شده را نشان می‌دهد. این پارامتر بین صفر و یک متغیر است و مقادیر ۱ نشان دهنده رابطه قوی بین دو گروه داده است (۱۴،۶۱). بنابراین مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۴ هر سه مدل MIROC5، HadGEM2-ES و GFDL-CM3 از دقت و کارایی مناسبی جهت تولید سناریوهای آینده برخوردار هستند.

ارزیابی مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل در افق ۲۰۴۱ -۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱-۲۰۱۰)

تبخیر و تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی است. حدود ۶۴ درصد از میانگین بارندگی سالانه زمینی به دلیل فرآیند تبخیر به جو باز می گردد (۵). تبخیر و تعرق نه تنها نقش مهمی در تعادل آب جهانی ایفا می کند، بلکه به طور قابل توجهی بر تعادل انرژی نیز تأثیر می‌گذارد. از این رو، تعیین کمیت تبخیر و تعرق برای مدیریت منابع آب، برنامه ریزی آبیاری و ارزیابی زیست محیطی ضروری است (۴۳). برآورد مقادیر تبخیر و تعرق ایستگاه‌های واقع در آبخیز ایران مرکزی در شرایط فعلی (۱۹۹۱-۲۰۱۰) در شکل ۲ نشان داده است. در یک چشم انداز کلی از نقشه‌ها می‌توان گفت در محدوده مورد مطالعه پهنه‌های سبز کم رنگ نشانگر کمترین میزان تبخیر و تعرق است و گستره‌هایی که با رنگ‌های نارنجی و قرمز مشخص گردیده بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق را نشان می‌دهند. با این توصیف در ماه ژانویه بیشینه تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های ایرانشهر، کهنوج و بم ثبت گردیده که به ترتیب مقادیر ۸۲/۳۹، ۷۸ و ۷۱ میلی‌متر را نشان می‌دهند از سوی دیگر کمترین میزان متغیر یاد شده در ایستگاه‌های واقع در بخش غربی و شمال غربی حوضه متعلق به همدان (۳۷/۸۹ میلی‌متر)، شهرکرد (۳۷/۵۳ میلی‌متر) و کوهرنگ (۳۴/۷۱ میلی‌متر) است. توزیع مکانی تغییرات تبخیر و تعرق در فوریه نیز تا حدودی مشابه ژانویه است هر چند مقادیر آن در ایستگاه‌های واقع در بخش جنوبی حوضه به بیش از ۱۰۰ میلی‌متر می‌رسد. با شروع فصل بهار و به تناسب افزایش دما مقادیر تبخیر و تعرق نیز افزایش پیدا می‌کند به طوریکه میزان آن در ایستگاه‌های ایرانشهر و کهنوج به‌ترتیب از ۱۶۷/۶ و ۱۶۶/۰۳ در مارس به ۲۴۲/۷ و ۲۴۶/۷ میلی‌متر در آوریل می‌رسند؛ در واقع بیش از ۷۰ میلی‌متر افزایش تبخیر- تعرق را طی یک ماه تجربه می‌کنند. در انتهای فصل بهار میزان تبخیر و تعرق در تمامی ایستگاه‌ها به بیش از ۲۰۰ میلیمتر در روز می‌رسد و ایستگاه‌های قم، کهنوج، گرمسار، طبس، سبزوار، ایرانشهر، کاشان، فسا و نهبندان مقادیر بیش از ۳۰۰ میلیمتر را نیز نشان می‌دهند. اگرچه گسترش پهنه‌های زرد و نارنجی در ژوئن و جولای بیانگر حاکمیت پدیده خشکی در کل حوضه ایران مرکزی است اما این وضعیت در جولای شدیدتر است؛ مقدار تبخیر و تعرق در اکثر ایستگاه‌ها بیش از ۳۰۰ میلی‌متر برآورد گردیده و ایستگاه قم عدد ۴۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد. از ابتدای فصل پاییز تبخیر و تعرق در ایستگاه‌ها کاهش یافته و بیشینه آن در نوامبر در ایستگاه‌های کهنوج، ایرانشهر، زاهدان، فسا و نهبندان بین ۱۰۰-۱۱۴ میلی‌متر متغیر است. در دسامبر نیز علاوه بر ایستگاه‌ها واقع در بخش‌های شمال غرب و غرب کشور در تربت حیدریه، شاهرود، سمنان، شمیران و کرج متغیر مورد نظر به کمتر از ۵۰ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۲).

مطابق نتایج به دست آمده از معیارهای آماری ارزیابی عملکرد مدل‌های GCM منتخب و از آنجاییکه هر سه مدل از کارایی قابل قبولی در حوضه مطالعاتی برخوردار بودند، لذا میانگین بروندادِ ریزمقیاس شده‌ی هر سه مدل مبنای سنجش تغییرات تبخیر- تعرق پتانسیل در شرایط آینده قرار گرفت. پیش‌نگری تغییرات متغیر یاد شده در محدوده‌ی آبخیز ایران مرکزی تحت سناریوی RCP4.5 در دوره آینده میانی نشان دهنده این است که مقادیر این متغیر طی ماه‌های مختلف سال در مقایسه با دوره پایه تغییرات افزایشی داشته همانطور که گسترش پهنه‌های زرد، نارنجی و قرمز در بخش قابل توجهی از سال بر منطقه مورد بررسی دلیلی براین ادعا است (شکل ۳). در ژانویه بیشینه تبخیر و تعرق مربوط به ایستگاه‌های ایرانشهر، کهنوج، بم، زاهدان و فسا است که مقادیر بین ۷۳-۷۸ میلی‌متر را نشان می‌دهند و کوهرنگ با ۴۰ میلی‌متر تبخیر و تعرق کمترین میزان را به خود اختصاص داده است. در فوریه متغیر ذکر شده در ۷ ایستگاه ایرانشهر، کهنوج، بم، یزد، زاهدان، فسا و طبس به بیش از ۱۰۰ میلی‌متر خواهد رسید و کمترین مقادیر در ایستگاه‌های واقع در غرب حوضه مشاهده می‌گردد. مشابه دوره پایه روند افزایشی تبخیر و تعرق در بهار سرعت بیشتری به خود گرفته و ایستگاه‌های کهنوج و ایرانشهر مقادیر نزدیک به ۲۰۰ میلی‌متر را تجربه می‌کنند. این وضعیت در اواسط بهار و طی ماه‌های آوریل و می آشکارتر است؛ به طوریکه در آوریل در ۳۳ ایستگاه مطالعاتی مقادیر بین ۲۰۰-۲۵۶ میلی‌متر به چشم می‌خورد و در می کمترین میزان متغیر در کوهرنگ برابر ۲۲۶ میلی‌متر است. ارزیابی ارزش‌های تبخیر و تعرق طی ماه‌های فصل تابستان حاکی از تفاوت قابل توجه این متغیر در اقلیم آینده میانی نسبت به شرایط پایه است: در ژوئن ۴ ایستگاه قم، گرمسار، سبزوار و کاشان ارزش‌های بیش از ۴۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهند و در جولای پهنه‌های هم تبخیر ۳۰۰-۴۵۰ میلی‌متر کل حوضه ایران مرکزی را در برگرفته است. با آغاز فصل پاییز و کاهش دما تبخیر و تعرق در ایستگاه‌ها به تدریج روند نزولی پیدا کرده و گستره‌های رنگی آبی و سبز با مقادیر تبخیر و تعرق کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر بر حوضه ایران مرکزی حاکم می‌گردد (شکل ۳).

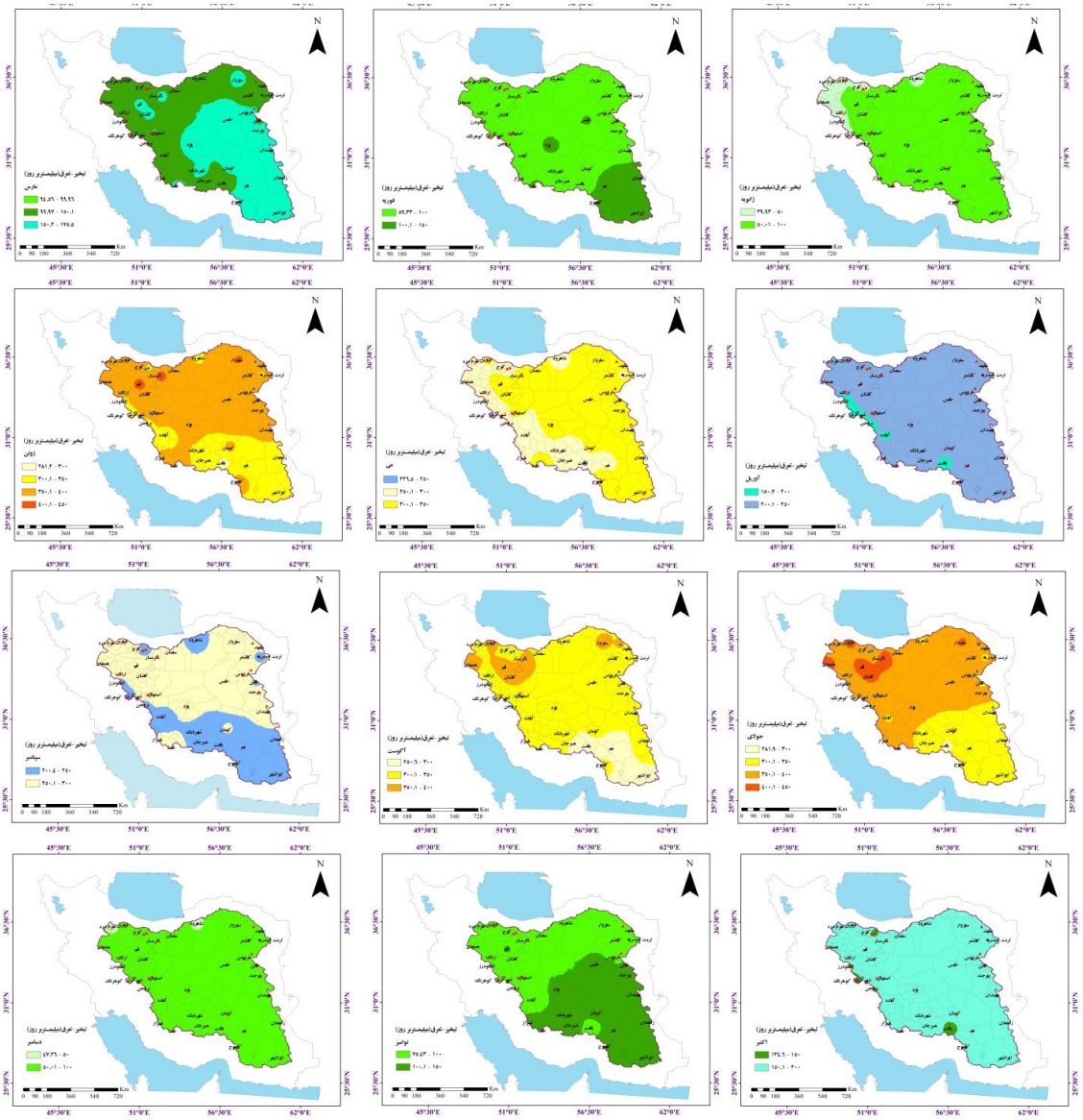
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]



شکل ۲- برآورد مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در آبخیز ایران مرکزی طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۰

Figure 2. Estimation of potential evapotranspiration values in the central Iran watershed during the period 1991-2010

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]



شکل ۳- برآورد مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در آبخیز ایران مرکزی در افق آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)
Figure 3. Estimation of potential evapotranspiration values in the central Iran watershed in the middle future horizon (2041-2060)

درصد تغییرات ماهانه و سالانه تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ نسبت به شرایط پایه

میزان تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل طی دوره ۲۰ ساله آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) نسبت به دوره مشاهداتی بر حسب درصد، تحت سناریوی RCP4.5 در جدول ۵ نشان داده شده است. این درصد به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه (۸)
$$PChange\ rate = \frac{PET_{future} - PET_{baseline}}{PET_{baseline}} \times 100$$

در رابطه ۸، PET_{future} میانگین تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و $PET_{baseline}$ متوسط آن در دوره مشاهداتی است. مطابق نتایج به دست آمده از این بخش تغییرات تبخیر و تعرق در چشم انداز آتی نسبت به شرایط پایه در کل حوضه ایران مرکزی و همچنین تمام ماه‌های مورد مطالعه افزایشی می‌باشد. بیشترین تغییرات افزایشی در ماه ژانویه و ایستگاه شهرکرد مشاهده می‌گردد؛ جاییکه میانگین تبخیر و تعرق در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ به میزان ۳۶/۸ درصد از شرایط پایه بیشتر خواهد بود. در این ماه ایستگاه‌های تربت حیدریه و کوهرنگ نیز به‌ترتیب با ۱۷/۲ و ۱۴/۹ درصد تغییرات افزایشی در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.

پس از ژانویه بیشترین درصد تغییرات ماهانه متغیر مورد بحث متعلق به ماه‌های مارس، دسامبر و نوامبر است که طی ماه‌های مارس و دسامبر ایستگاه تربت حیدریه با ۲۳/۱۸ و ۲۱/۲۲ درصد، رکورددار تغییرات تبخیر و تعرق در حوضه مورد مطالعه است. در طول فصل تابستان درصد تغییرات تبخیر و تعرق چشمگیر نیست؛ در ژوئن حداکثر و حداقل تغییرات به ترتیب با ۹/۷ و ۳/۵ درصد مربوط به شهربابک و ایرانشهر است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

در جولای ۲۱ ایستگاه تغییرات بین ۸-۱۰ درصد را نشان می‌دهند و در آگوست نیز میزان درصد تغییرات در ایستگاه‌های مختلف نزدیک به هم بوده و بین ۳-۹ درصد متغیر است (جدول ۵). درصد تغییرات سالانه تبخیر و تعرق نشان می‌دهد میانگین درصد تغییرات در ایستگاه‌های مختلف بین ۴ تا ۱۱ درصد می‌باشد. حداقل تغییرات در ایستگاه‌های ایرانشهر، کهنوج و بم و بیشینه تغییرات در تربت حیدریه، شهربابک، شهرکرد و کوهرنگ به چشم می‌خورد.

نتایج این بخش از تحقیق با مطالعات انجام شده سایر محققین در داخل کشور هم‌سو می‌باشد: هادی و همکاران (۲۵) که تغییرات تبخیر- تعرق گیاه مرجع را در اقلیم‌های مختلف برمبنای مدل HadCM3 ارزیابی کردند به این نتیجه رسیدند، ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های مرطوب‌تر، بیشتر تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند. مطابق مطالعه دانش‌فراز و رزاق‌پور (۱۲) میانگین مجموع پتانسیل تبخیر و تعرق استان آذربایجان غربی در بازه زمانی (۲۰۴۶-۲۰۶۵) نسبت به (۲۰۱۱-۲۰۳۰)، تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 به‌ترتیب ۵۰/۴۰، ۳۰/۸۲ و ۴۹/ ۳۲ میلی‌متر در سال افزایش خواهد داشت. گودرزی و همکاران (۲۳) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر- تعرق حوضه آبخیز دریاچه ارومیه نشان دادند که میزان تبخیر و تعرق در تمامی ماه‌ها و تمامی فصول در دوره‌های آتی تحت تأثیر دما افزایش خواهد یافت که این افزایش به صورت متوسط بلندمدت در سطح حوضه بین ۴/۲ تا ۱۵ درصد خواهد بود. نتایج پژوهش جورابلو و همکاران (۳۴) حاکی از این بود که متوسط دما و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع تا انتهای قرن روند افزایشی خواهند داشت. این تغییرات افزایشی در محدوده‌ی غرب ایران نیز در مطالعه حیدری تاشه کبود و خوشخو (۲۸) تأیید شده است.

تعیین رژیم بارشی آبخیز فلات مرکزی مبتنی بر شاخص بارندگی انگوت

محاسبه مقادیر شاخص بارندگی انگوت بیانگر این است که در محدوده فلات مرکزی (شرایط فعلی و آینده) رژیم بارش تابستانه وجود ندارد و نوع رژیم بارشی زمستانه یا نامشخص بر کل منطقه حاکم می‌باشد. مطابق نتایج مندرج در جدول ۶ در دوره مشاهداتی به جز سه ایستگاه مشهد، شاهرود و خرمدره که رژیم بارشی همه فصول دارند در سایر مناطق بارش زمستانه غالب است و این ایستگاه‌ها ۷۰ درصد میانگین بارندگی سالانه خود را در فصل سرد دریافت می‌کنند. از لحاظ رژیم بارشی می‌توان گفت در چشم‌انداز آینده بروندادِ مدل HadGEM2-ES با دوره پایه مطابقت دارد اما براساس مدل‌های MIROC5 و GFDL-CM3 نوع بارش زمستانه حال حاضر در تعداد زیادی از ایستگاه‌ها، به رژیم بارشی همه فصول در آینده تغییر شکل پیدا کرده است. این مسئله نشان دهنده این مهم است که بارش به جای تمرکز در فصل سرد، در فصول مختلف سال توزیع گردیده است. همچنین مقایسه میانگین مقادیر بارش سالانه تحت GCMهای منتخب نسبت به دوره پایه گویای این است که برمبنای دو مدل HadGEM2-ES و MIROC5 میانگین بارش سالانه به جز چند ایستگاه کاشان، تربت حیدریه، کهنوج، خرمدره و نهبندان که بین ۱ تا ۱۷ میلی‌متر کاهش بارش را نشان می‌دهند در سایر ایستگاه‌ها بارش افزایش پیدا کرده و بیشینه این تغییرات افزایشی متعلق به کوهرنگ است. بارش این ایستگاه در دوره آینده تحت دو مدل مذکور به‌ترتیب به‌میزان ۱۵۴ و ۲۴۰ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. اما مدل GFDL-CM3 شرایط متفاوتی را نشان می‌دهد؛ تغییرات بارش مطابق این مدل در آینده میانی در ۱۴ ایستگاه افزایشی و در بقیه قسمت‌های حوضه کاهشی خواهد بود. در همین راستا سالاری فنودی و همکاران (۴۹) که در پژوهش خود بارش تابستانه جنوب شرق ایران را در شرایط تغییر اقلیم بر مبنای مدل‌های پایگاه کوردکس مورد ارزیابی قرار دادند به این نتیجه رسیدند که به دلیل پیچیدگی فرآیند بارش و تغییرپذیری زیاد آن برآورد این پارامتر تحت شرایط تغییر اقلیم عدم قطعیت‌های زیادی در بر خواهد داشت و لازم است از انواع مدل‌های GCM و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی مختلف استفاده نمود. بنابراین می‌توان گفت تغییرات افزایشی بارش در حوضه مطالعاتی با پژوهش‌های امیدوار و همکاران (۴۵) و سلیمانی ساردو و مصباح‌زاده (۵۱) همخوانی دارد. حال آنکه مطابق بررسی‌های علیجانی و عارف (۷) و خزائی و همکاران (۳۶) بارش‌های سالانه در برخی نواحی خشک ایران در اقلیم آتی کاهش خواهد یافت.

پهنه‌بندی شاخص خشکی در شرایط فعلی و تحت سناریوی حدواسط RCP4.5 در آینده میانی

به‌منظور شناخت پهنه‌های آب و هوایی در محدوده ایران مرکزی و بررسی ضریب خشکی آب و هوایی بر پایه شاخص یونپ، نخست مقادیر این شاخص برای دوره مشاهداتی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) محاسبه گردید و نتایج آن با بروندادِ ریزمقیاس شده ۳ مدل MIROC5، HadGEM2-ES و GFDL-CM3 در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ مورد مقایسه قرار گرفت.

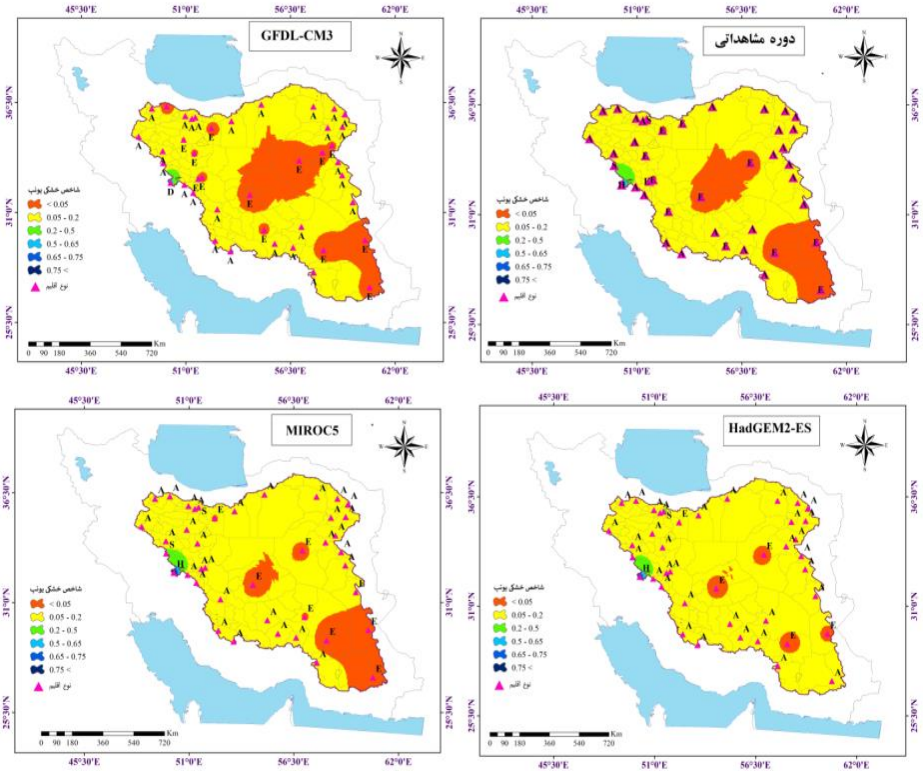
نقشه پهنه‌بندی بر پایه شاخص AI در شرایط پایه گویای این واقعیت است که علیرغم وجود چهار طبقه آب و هوایی در حوضه ایران مرکزی، اما پهنه اقلیمی خشک در بخش وسیعی از حوضه‌ی مذکور ویژگی غالب منطقه بوده و بیش از نیمی از ایستگاه‌های مورد مطالعه در شرایط اقلیمی خشک به سر می‌برند. در این دوره به جز کوهرنگ، شمیران و الیگودرز که به‌ترتیب با ضریب خشکی ۰/۷۸، ۰/۲۱ و ۰/۲۰ شرایط مرطوب و نیمه خشک را تجربه می‌کنند سایر ایستگاه‌های واقع در محدوده استان‌های سمنان، یزد، کرمان و بخش‌هایی از اصفهان و فارس تحت سیطره اقلیم فرا خشک قرار دارند (شکل ۴).

خروجی مدل GFDL-CM3 در شرایط آینده میانی حکایت از رخداد تغییرات منفی و پیشروی ناحیه آب و هوایی فراخشک در منطقه مورد مطالعه دارد. برمبنای مدل مذکور کوهرنگ از شرایط مرطوب در دوره فعلی به سمت اقلیم نیمه مرطوب خشک در آینده متمایل شده و ایستگاه‌های شمیران و الیگودرز در وضعیت خشک قرار گرفته‌اند. مطابق نقشه پهنه بندی مدل GFDL-CM3 خبری از اقلیم مرطوب در حوضه مورد بررسی نیست و ایستگاه‌های فردوس، گناباد، قم و

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

شهربابک در آینده تحت استیلای اقلیم فراخشک قرار خواهند گرفت. این وضعیت‌ها در شکل ۴ قابل مشاهده است.

برونداد مدل HadGEM2-ES تفاوت آشکاری با دو مدل دیگر CMIP5 مورد مطالعه دارد. مطابق این مدل مرز آب و هوای فرا خشک نسبت به دوره مشاهداتی کاهش یافته و فقط به مناطقی در استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و یزد محدود می‌شود در عوض مرز آب و هوای خشک گسترش پیدا کرده و بخش وسیعی از فلات مرکزی ایران را دربرگرفته است. نکته قابل توجه در مدل HadGEM2-ES عدم تغییر شاخص خشکی در ایستگاه‌های کوهرنگ و شمیران تحت شرایط تغییر اقلیم است؛ به طوریکه برمبنای مدل مذکور هر دو ایستگاه شرایط مرطوب و نیمه خشک خود را حفظ خواهند کرد. طبق مدل MIROC5 نیز ایستگاه کوهرنگ همانند دوره پایه، تحت سناریوی بینابین واداشت تابشی مرطوب خواهد بود. اگرچه خروجی این مدل نشان دهنده کاهش وسعت منطقه فرا خشک در حوضه ایران مرکزی است اما ایستگاه‌های کرمان و نهبندان که در دوره پایه در محدوده اقلیم خشک قرار داشتند، مطابق برونداد MIROC5 تحت حاکمیت اقلیم فراخشک قرار خواهند گرفت (شکل ۴).



شکل ۴- پهنه‌بندی آب و هوایی آبخیز فلات مرکزی برمبنای شاخص خشکی یونپ در شرایط فعلی (۱۹۹۱-۲۰۱۰) و تحت سناریوی RCP4.5 در آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Figure 4. Climatic classification of the central Iran watershed based on the UNEP aridity index in the present (1991-2010) and under the RCP4.5 scenario in the middle future (2041-2060)

نتایج این بخش از تحقیق با پژوهش‌های صورت گرفته توسط آقاجانلو و همکاران (۱)، طاوسی (۵۶)، نوری و همکاران (۴۴)، رنجبر و طباطبایی (۴۸) مطابقت دارد. در پایان لازم به ذکر است که اگر چه GCMها به‌عنوان قابل اعتمادترین مدل‌های عددی برای مطالعه اقلیم احتمالی آینده در نظر گرفته می‌شوند (۳) اما استفاده ازآن‌ها برای پیش‌بینی‌های آینده منوط به برخی عدم قطعیت‌های ناشی از منابع مجزا مانند سناریوهای مختلف انتشار/غلظت، پارامترسازی، ساختار GCMها و شرایط مرزی و اولیه است (۵۲). در بین‌روش‌های گوناگون عدم قطعیت رویکرد مجموعه‌های چند مدل یکی از رایج‌ترین رویکردها در کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از GCM است (۳). به همین دلیل با توجه به وسعت آبخیز ایران مرکزی و اهمیت مسئله تغییر اقلیم در این محدوده پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آینده جهت بررسی تغییرات خشکی و تبخیر-تعرق در این منطقه مجموعه متنوع GCMها و سناریوهای انتشار به کار گرفته شود و برای کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های اقلیمی رویکرد گروهی مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

جدول ۵- درصد تغییرات ماهانه و سالانه تبخیر- تعرق پتانسیل در چشم‌انداز آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) نسبت به دوره مشاهداتی

Table 5. Monthly and annual changes of potential evapotranspiration in the future (2041-2060) compared to the observation period

سالانه Annual	دسامبر Dec	نوامبر Nov	اکتبر Oct	سپتامبر Sep	آگوست Aug	جولای Jul	ژوئن Jun	می May	آوریل Apr	مارس Mar	فوریه Feb	ژانویه Jan	ایستگاه Station
2293.7	64.2	93.8	154.3	237.3	305.1	346.8	335.8	276.8	197.3	134.3	86.9	61.1	آباده، Abadeh
2493.6	64.1	95.4	166.9	259.9	337	379.6	367.6	300.6	215.7	148.3	95.3	63.2	اصفهان، Isfahan
2620	65.1	99.2	173.4	274.2	358.5	403.6	387.7	318.6	230.7	152.4	94.8	61.7	اصفهان-فرودگاه، Isfahan airport
2216.7	51.8	82.7	147.2	241.3	316.9	365.5	339.2	259.5	180.3	118.9	66.8	46.6	الیگودرز، Aligudarz
2558.7	89.5	119	177.3	246.6	298.5	324.7	344.7	327.1	251.3	173.9	118.2	87.7	ایرانشهر، Iranshahr
1974.5	62	87.6	135.5	200.3	250.5	281.8	281.1	243.7	177.9	118.8	78.8	56.6	بافت، Yazd
2344.5	76.3	102.2	157.6	229	280	314.6	320.1	295.5	225.5	161.9	106.9	75	بم، Bam
2534.7	73.1	107.2	172.3	262.1	323.9	357.5	366.3	321.2	233.6	154.7	96.6	66.2	بیرجند، Birjand
2600.5	78.4	112	179.5	264.5	331.2	371.9	375	324.8	232.8	152.7	103.8	73.8	فسا، Fasa
2531.9	65.8	100.3	167.1	264.8	331.1	370.9	375.6	317.2	231.6	154.4	90.9	62	فردوس، Ferdows
2764.2	63.3	100.2	180.3	287.4	378.4	428.9	418.9	343.5	248.1	156.9	95	63.4	گرمسار، Garmsar
2477.1	58.7	96.1	163.1	252.8	329.4	371	368.4	311	233.9	150.4	85.5	56.7	گناباد، Gonabad
2479.9	51.2	83.3	165.6	274.8	370.2	412.3	382.3	290.3	208.6	131.3	68.2	41.6	همدان، Hamedan
2700.8	62.4	99.2	173.2	278.1	372.9	415	402.8	332.5	248.4	158.2	96	62	کاشان، Kashan
2454.8	58.2	90.9	156.5	254.7	338	381.7	369.6	303.8	224.1	139.3	83.1	55.1	کاشمر، Kashmar
2497.1	77.9	108.4	169.2	254.6	317.9	352.6	355.4	308	228.6	155.4	98.8	70.3	کرمان، Kerman
2432.2	52.3	84	155	254.6	348	401.3	379.3	295.4	205.2	132.7	76.3	48.1	کرج، Karaj
2454.8	58.3	90	157.2	252.6	338.4	381.5	378	308.6	219.3	136.1	80.8	53.8	مشهد، Mashhad
2594.4	60.5	94.3	168.1	272.9	359.2	403.2	392.8	323.3	236.9	146.5	82.7	54	نیشابور، Nishapur
2428.9	68.4	101.3	164.6	245.4	313.5	345.8	354.7	305.7	229.7	149	91.6	59.2	قائن، Qaen
2843.3	65.6	103.8	189	300.8	393.9	436.1	425.1	346.1	256.7	164.1	98.6	63.4	قم، Qom
2679.1	62	98.1	172.6	277.3	360.1	404.1	404.3	343.9	252.4	154.7	91.4	58.2	سبزوار، Sabzevar
2409.8	54	87.6	155.5	252.3	330.3	372.1	359.6	300	220.7	142.7	81.1	53.9	سمنان، Semnan
2432.6	72.7	104.4	164.8	245.6	307.3	347.4	350.4	298.5	222.3	152.7	98.1	68.4	شهربابک، Shahr-e Babak
2279.8	48.2	82.4	150	236.2	313.6	348.5	345.7	289.6	212.7	132.7	72.5	47.8	شاهرود، Shahrud
2215.2	49.8	77.7	144.8	234.3	313.7	355.2	334.1	269.3	193.7	123.5	70.9	48.1	شمیران، Shemiran
2435.2	72.5	104.4	168.3	250.9	315.3	357.5	350.4	293.6	212.5	146.8	95.8	67.2	شیراز، Shiraz
2362.3	73.3	103.4	162.3	239.2	299.2	336.7	336	291	212	146.1	95.7	67.6	سیرجان، Sirjan
2299.3	57.2	89.6	155.2	242.4	303.1	338.5	343.8	291.8	214.6	135.8	75.7	51.7	تربت حیدریه، Torbate Heydarieh
2576.3	73	104.6	172.6	262.3	334.5	374.3	369.5	315.6	236.5	161.6	104.2	67.6	یزد، Yazd
2470.2	78.9	111	169.5	248.8	309.3	337.4	338.6	303.8	235.4	159.4	104.1	74.1	زاهدان، Zahedan
2381.6	55.9	86.4	158.5	258.5	338.2	380.1	360.6	285.7	204.1	134.7	72.3	46.6	اراک، Arak
2172.8	54.3	84.2	145.8	233.7	306.5	347.9	327.9	257.1	178.6	118.1	71.6	47.2	بروجن، Borujen
2621.4	87.6	122.5	184.3	250.6	306.1	339.9	366.4	338.7	252.2	175.6	114.5	83.1	کهنوج، Kahnuj
2278.5	47.3	78.3	151.5	250.4	334.8	363	348.1	277.7	199	122.2	63.7	42.5	خرم دره، Khorramdarre
1966.9	47.9	75.4	134.4	218.2	293.7	326.4	300.2	226.3	150.5	94.5	59.3	39.9	کوهرنگ، Kuhrang
2324.2	51.6	81.5	149.1	239.4	322	374.1	358.2	285	206	130	76.9	50.4	تهران-مهرآباد، Tehran
2491.8	75.9	109.5	176.3	258.3	304.3	331.3	354.8	320.7	235.2	157.8	99	68.6	نهبندان Nehbandan
2330.2	57.3	88.4	158.4	252.3	329.3	371.7	350.3	276.3	191.4	128.4	75	51.4	شهرکرد، Shahrekord
2698.4	67.2	106	180.7	280.3	346.1	393.4	396.5	338.3	253.3	167.8	102.3	66.7	طبس، Tabas

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

جدول ۶- تعیین رژیم‌های بارشی آبخیز ایران مرکزی

Table 6. Determine of the precipitation regimes in the central Iran watershed

MIROC5		HadGEM2-ES		GFDL-CM3		دوره پایه Baseline		ایستگاه Station
رژیم بارشی	بارش (mm) precipitation	رژیم بارشی Pre-regime	بارش (mm) precipitation	رژیم بارشی Pre-regime	بارش (mm) precipitation	رژیم بارشی Pre-regime	بارش (mm) Precipitation	
c	158.62	c	163.07	c	125.35	c	97.93	آباده، Abadeh
c	159.005	c	173.645	c	118.68	c	107.5	اصفهان، Isfahan
c	137.31	c	137.925	c	85.47	c	85.57	اصفهان-فرودگاه، Isfahan airport
c	458.395	c	439.415	c	320.84	c	409.87	الیگودرز، Aligudarz
c	210.835	c	283.12	c	238.1	c	198.76	بافت، Yazd
c	48.37	c	60.795	a	64.26	c	38.51	بم، Bam
c	166.63	c	195.38	c	140.52	c	160.26	بیرجند، Birjand
c	338.235	c	449.185	c	297.02	c	297.99	فسا، Fasa
c	163.745	c	167.15	c	112.46	c	135.95	فردوس، Ferdows
c	109.98	c	128.95	c	86.86	c	97.28	گرمسار، Garmsar
c	155.3	c	151.81	a	117.46	c	136.58	گناباد، Gonabad
a	362.865	c	347.12	a	273.69	c	320.96	همدان، Hamedan
a	111.195	c	150.405	a	124	c	108.47	ایرانشهر، Iranshahr
a	151.56	c	142.255	a	114.77	c	158	کاشان، Kashan
a	293.38	c	318.82	a	221.33	c	258.42	کرج، Karaj
c	210.145	c	235.68	a	159.66	c	197.87	کاشمر، Kashmar
c	120.325	c	160.765	c	128.78	c	118.34	کرمان، Kerman
a	273.05	c	268.73	a	216.02	a	245.86	مشهد، Mashhad
a	263.965	c	263.895	a	218.33	c	238.32	نیشابور، Nishapur
c	179.145	c	184.465	c	125.58	c	165.1	قائن، Qaen
c	188.77	c	191.845	c	137.29	c	151.33	قم، Qom
c	210.56	c	228.17	c	176.83	c	190.42	سبزوار، Sabzevar
a	164.13	c	174.595	a	135.15	c	111.55	سمنان، Semnan
c	133.915	c	164.675	c	110.89	c	123.11	شهربابک، Shahr-e Babak
a	167.67	a	177.81	a	121.48	a	136.95	شاهرود، Shahrud
c	462.625	c	513.3225	c	373.64	c	425.36	شمیران، Shemiran
c	347.99	c	478.1	c	347.25	c	334.29	شیراز، Shiraz
c	143.27	c	208.81	c	144.74	c	110.36	سیرجان، Sirjan
c	262.805	c	283.87	a	214.1	c	270.76	تربت حیدریه، Torbate Heydarieh
c	63.17	c	66.875	c	49.14	c	45.43	یزد، Yazd
c	82.17	c	116.465	c	93.62	c	78.57	زاهدان، Zahedan
a	324.445	c	324.675	c	253.37	c	304.39	اراک، Arak
c	264.51	c	328.94	c	214.02	c	259.55	بروجن، Borujen
c	176.305	c	276.32	c	219.09	c	186.27	کهنوج، Kahnuj
c	282.555	c	316.755	a	281.44	a	300.06	خرم دره Khorramdarre
c	1627.105	c	1541.22	c	1106.28	c	1386.87	کوهرنگ، Kuhrang
c	284.59	c	332.33	c	228.04	c	243.08	تهران-مهرآباد Tehran
c	123.35	c	147.825	c	142.64	c	124.61	نهبندان Nehbandan
c	340.72	c	371.17	c	265.02	c	335.65	شهرکرد Shahrekord
c	105.54	c	99.855	c	83.61	c	73.93	طبس، Tabas

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

منابع

1. Aghajanlou, M.B., J. Jafari and A. Sabzi Parvar. 2013. Investigat ing the possible effects of climate change on the aridity index in Iran, under scenario A2. the second regional conference on climate change and global warming, Zanjan (In Persian).
2. Ahmadpari, H., M. safavi gerdini and M. Ebrahimi. 2019. An appropriate method for estimating potential evapotranspiration in the absence of meteorological data (The case study of Khorrambid Township in Fars Province). Land Management Journal, 7(2): 223-230 (In Persian).
3. Ahmed, K., D.A. Sachindra, S. Shahid, Z. Iqbal, N. Nawaz and N. Khan. 2020. Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. Atmospheric Research, 236: 104806.
4. Amani, Z., R. Deihimfard and A. Mokhtassi Bidgoli. 2016. Evalution of drought under increasing of temperature due to climate change in rainfed wheat-growing areas of Fars province using Aridity Index. Journal of Crop Production, 9(2): 151-174 (In Persian).
5. Amiri, M. and H.R. Pourghasemi. 2019. Comparing Different Methods of Potential Evapotranspiration and Studying Temporal and Spatial Changes in the Mahalou Watershed using GIS. Journal of Watershed Management Research, 10(19): 22-35 (In Persian).
6. An, S., G. Park, H. Jung and D. Jang .2022. Assessment of Future Drought Index Using SSP Scenario in Rep. of Korea. Sustainability, 14(7): 4252.
7. Aref, M. and B. Alijani. 2018. Investigation of temperature and precipitation variations of Yazd-Ardakan basin with SDSM under the conditions of future climate change. Journal of Arid Biome, 8(1):89-101 (In Persian).
8. Arias, P.A., G. Ortega, L.D. Villegas and J.A. Martínez. 2021. Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (100): 75-96.
9. Bakhtiari, B., N. Mahdavi and N. Sayari .2021. Variations and Sensitivity Analysis on Aridity Index (AI) in Some Climate Samples in Iran. Iran-Water Resources Research, 17(1): 1-15 (In Persian).
10. Barzegari, F. and H. Malekynejhad. 2015. Linear Moments Application in Drought Prediction (Case Study: Central Catchment of Iran), Water and Soil Science, 25(2): 13-23 (In Persian).
11. Chai, R., J. Mao, H. Chen, Y. Wang, X. Shi, M. Jin and S.D. Wullschleger. 2021. Human-caused long-term changes in global aridity. Climate and Atmospheric Science, 4(1): 1-8.
12. Danesh Faraz, R. and H. Razzakpour. 2014. Assessment of climate change effects on potential evaporation and transpiration in West Azarbaijan province. Geographical Space, [online] 14(46): 199-211 (In Persian).
13. Darvishi, Y. and M. Ghadamkheir. 2021. Assessing and Analyzing the Effects of Climate Drought Using Tavosi Monthly Drought, Ingot (K) and UNEP Indices (UNEP) (Case study: cities of Golestan province). Climate Change Research, 2(7): 49-70 (In Persian).
14. Dash, S.S., B. Sahoo and N.S. Raghuwanshi. 2019. A SWAT-Copula based approach for monitoring and assessment of drought propagation in an irrigation command. Ecological Engineering, 127: 417-430.
15. Donohue, R.J., T.R. McVicar and M.L. Roderick .2010. Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. Journal of Hydrology, 386(1-4): 186-197.
16. Dumitraşcu, M., C.S. Dragotă, I. Grigorescu, C. Dumitraşcu and A. Vlăduţ. 2017. Key pluvial parameters in assessing rainfall erosivity in the south-west development region, Romania. Journal of Earth System Science, 126(4): 1-17.
17. Feng, S. and Q. Fu. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate. Atmospheric Chemistry and Physics, 13(19): 10081-10094.
18. Foroghi, M., Y. Dinpashoh and S. Jahanbakhsh Asl .2020. Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west rejoin of Iran. Journal of Climate Research, 1398(37): 21-37 (In Persian).
19. Fu, C.B. and Z.G. Ma. 2008. Global change and regional aridification. Journal of Atmospheric Sciences, 32(4): 752-760.
20. Fu, Q. and S. Feng. 2014. Responses of terrestrial aridity to global warming. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(13): 7863-7875.
21. Fu, Q., L. Lin, J. Huang, S. Feng and A. Gettelman. 2016. Changes in terrestrial aridity for the period 850–2080 from the Community Earth System Model. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(6): 2857-2873.
22. Gavrilov, M.B., T. Lukić, N. Janc, B. Basarin and S.B. Marković. 2019. Forestry Aridity Index in Vojvodina. North Serbia. Open Geosciences, 11(1): 367-377.
23. Goudarzi, M., B. Salahi and S.A. Hosseini. 2018. Estimation of Evapotranspiration Rate Due to Climate Change in the Urmia Lake Basin. Jwmseir, 12(41): 1-12 (In Persian).
24. Greve, P., M.L. Roderick, A.M. Ukkola and Y. Wada. 2019. The aridity index under global warming. Environmental Research Letters, 14(12): 124006.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

25. Hadi, F., A. khashei siuki, A. Shahidi and M. Farzaneh. 2016. Examination the Effect of Climate Change on Potential Evapotranspiration in Different Climates. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 10(2): 230-240 (In Persian).
26. Hailesilassie, W.T., N.K. Goel, T. Ayenew and S. Tekleab. 2022. Future precipitation changes in the Central Ethiopian Main Rift under CMIP5 GCMs. Journal of Water and Climate Change, 13(4): 1830-1841.
27. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Transaction of ASAE, 1(2): 96-99.
28. Heydari Tasheh Kaboud, Sh. and Y. Khoshkhou .2019. Projection and Prediction of the Annual and Seasonal Future Reference Evapotranspiration Time Scales in the West of Iran Under Rcp Emission Scenarios. Journal of Geographical Sciences, 19(53): 157 -176 (In Persian).
29. Hosseinizadeh, A., H. SeyedKaboli, H. Zareie, A. Akhondali and B. Farjad .2015. Impact of climate change on the severity, duration, and frequency of drought in a semi-arid agricultural basin. Geoenvironmental Disasters, 2(1): 1-9 (In Persian).
30. Houmsi, M.R., M.S. Shiru, M.S. Nashwan, K. Ahmed, G.F. Ziarh, S. Shahid and S. Kim .2019. Spatial shift of aridity and its impact on land use of Syria. Sustainability, 11(24): 7047.
31. Huang, J., H. Yu, X. Guan, G. Wang and R. Guo. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change. Nature Climate Change, 6(2): 166-171.
32. IPCC. 2007. Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland: 104.
33. IPCC .2013. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA:1535
34. Joorabloo, S., K. Azhdary, Z. Ganji and M. Delghandi. 2018. Climate Change Impact on Reference Evapotranspiration and Precipitation Deficit in Semnan Region. Irrigation Sciences and Engineering, 41(4): 61-75 (In Persian).
35. Karami, S. 2021. Re-Analyzing of Consequences and Methods of Climatological Changes Managements (Case Study: Iran's Central Basin). Journal of Applied Researches in Geographical Sciences, 20(59):19-37 (In Persian).
36. Khazaei, M., H. khazaee and B. saghafian. 2020. Climate Change Impact on Extreme Rainfalls in Arid Region of Iran. Journal of Environmental Science and Technology, 22(9): 31-42 (In Persian).
37. Lukić, T., T.M. Ponjiger, B. Basarin, D. Sakulski, M. Gavrilov, S. Marković and A. Petrović. 2021. Application of Angot precipitation index in the assessment of rainfall erosivity: Vojvodina Region case study (North Serbia). Acta Geographica Slovenica, 61(2): 123-153.
38. Maria, A.L. and M.I.H.A.I.L.A. Dumitru. 2022. Application of the Angot (k) pluviometric index to Cotnari Weather Station in the period 1961-2020. Georeview: Scientific Annals of Stefan cel Mare University of Suceava. Geography Series, 32(1): 29-38.
39. Mazare, M.M., H. Kaviar and S. Kargar. 2017. Investigating the legal conditions of water boundaries in the central plateau of Iran and the effect of compliance with the legal boundaries in getting out of the water scarcity crisis, 7th Iranian National Water Resources Management Conference (In Persian).
40. Mohammadi Sedigheh M., S. Ghazanfari and A. Abkar. 2021. Prediction of Rainfall under HadCM3 and CanESM2 Climate Change Models using Statistical Downscaling Model (Case Study: Tabriz Synoptic Station). Journal of Watershed Management Research, 11(22): 220-232 (In Persian).
41. Mostafazadeh, R., R. Asiabi-hir and S.S. Nabavi. 2023. Determining the variations of monthly wet and dry regimes using Angot index in Ardabil Province. Applied researches in Geographical Sciences, 23(69) (In Persian).
42. Nemati, A., S.H. Qureshi Najafabadi, Gh. Jodaki and S.S. Mousavi Nadushni. 2017. Investigating the spatio-temporal distribution and intensity of a widespread drought phenomenon in the Central Iran watershed using NASA's Gravitational Satellite (GRACE) and TSDI index, 16th Iranian Hydraulic Conference (In Persian).
43. Nikam, B.R., P. Kuma, V. Garg, P.K. Thakur and S.P. Aggarwal. 2014. Comparative evaluation of different potential evapotranspiration estimation approaches. International Journal of Research in Engineering and Technology, 3(6): 544-552.
44. Nouri, M., M. Homaee and M. Bannayan. 2016. Assessing Trends of aridity index changes over 1966-2100 period in the Northwest of Iran. Watershed Engineering and Management, 8(4): 439-453c
45. Omidvar, K., N. Javanshiri and I. Babaian. 2013. Climate change survey in the period of 2011-2030 in the south of Kerman province using the exponential microscale GCM model. The first national hydrometeorological conference, Kerman (In Persian).
46. Racsko, P., L. Szeidl and M. Semenov. 1991. Serial approach to local stochastic weather models. Ecological modelling, (57): 27-41.
47. Ramachandran, A., D. Praveen, R. Jaganathan and K. Palanivelu. 2015. Projected and observed aridity and climate change in the east coast of south India under RCP 4.5. The Scientific World Journal.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

48. Ranjbar, F. and H. Tabatabaii .2022. Investigation of the trend of Aridity index in the northern stations of Iran during the period 1982-2019. Climate Change Research, 3(9): 12-24 (In Persian).
49. Salari Fanoodi, M., M. Khosravi., T. Tavousi and M. Hamidian Pour. 2020. Evaluation and comparison of the accuracy of the CORDEX database's summer precipitation network data with station data (Case study: summer precipitation of South East of Iran). Journal of Climate Research, 1399(43): 15-32 (In Persian).
50. Scheff, J. and D.M. Frierson. 2015. Terrestrial aridity and its response to greenhouse warming across CMIP5 climate models. Journal of Climate, 28(14): 5583-5600.
51. Soleimani Sardoo, F. and T. Mesbahzadeh. 2021. The Prediction of Temperature and Precipitation Using Climate Change Scenarios and Statistical Exponential Down scaling Models. Environmental Researches, 11(22): 97-110 (In Persian).
52. Song, Y.H., E.S. Chung and M.S. Shiru. 2020. Uncertainty analysis of monthly precipitation in GCMs using multiple bias correction methods under different RCPs. Sustainability, 12(18): 7508.
53. Tabari, H. and M.B. Aghajanloo. 2013. Temporal pattern of aridity index in Iran with considering precipitation and evapotranspiration trends. International Journal of Climatology, 33(2): 396-409 (In Persian).
54. Tavosi, T., M. Mansouri Daneshvar and A. Movaqqari. 2012. The Zonation of Aridity Intensity in Iran Using Hargreaves- Samani Evapotranspiration Model Based on Digital Elevation Model (DEM). Geography and Environmental Sustainability, 2(3): 95-110 (In Persian).
55. Tavosi, T., F. shoja and E. Asgari. 2019. Amendment of Climate Zones of the Northeastern Iran Based On a Combination of Changes in Aridity Index. Desert Management, 7(13): 117-134 (In Persian).
56. Tavousi, T. 2018. Investigating the trend of fluctuations in annual precipitation and UNEP aridity index of climatic zones in the west and northwest of Iran. Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 27(105): 85-96 (In Persian).
57. Tavousi, T., C. Kajehamiri Khaledi and M. Salari Fanoudi .2021. Review of Iran's Climatic Zoning Based on Some Climate Variables. Desert Management, 8(16): 17-36(In Persian).
58. Tsakiris, G. and H. Vangelis .2004. Towards a drought watch system based on spatial SPI. Water Resources Management, 18(1): 1-12.
59. Wang, X., D. Jiang and X. Lang .2021. Future changes in Aridity Index at two and four degrees of global warming above preindustrial levels. International Journal of Climatology, 41(1): 278-294.
60. Wen, M., D.J. ChengSong, G. Zhang, W. Lai and W. Jiang. 2018. Impacts of climate change on aridity index and its spatiotemporal variation in the Loess Plateau of China, from 1961 to 2014. Environmental Earth Sciences, 77(4): 1-12.
61. Zehtabian, G.R., A. Salajegheh, A. Malekian, N. Boroomand and A. Azareh. 2016. Evaluation and comparison of performance of SDSM and CLIMGEN models in simulation of climatic variables in Qazvin plain. Desert, 21(2): 155-164 (In Persian).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]

Evaluation of the Future Changes of Climatic Aridity Indices in the Central Iran Watershed under Climate Change Scenarios

Taghi Tavosi[1], Faeze Shoja[2] and Nasrin Hosseinabadi[3]

1- Professor in Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2- Postdoctoral researcher in climatology, Department of Physical Geography, University of Tehran, Teheran, Iran, (Corresponding author: Faeze.shoja@yahoo.com)
3- Ph.D. in Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
Received: 12 Agusut, 2022 Accepted: 20 December, 2022

Extended Abstract

Introduction and Objective: The problem of drought and water crisis in the in the central Iran watershed has become serious in recent years due to consecutive droughts and increased water consumption in drinking, agriculture and industry sectors. Since rain is the only source of water supply in this catchment area, a decrease in the amount of rainfall with this intensity can cause a widespread drought and eventually large migrations from these areas. Therefore, the aim of this research is to analyze the changes in the aridity index in the vast area of the central Iran watershed in future.

Material and Methods: In order to achieve the study's objective, the minimum and maximum air temperature, sunshine hours, and precipitation of 40 synoptic stations in the Central Iran watershed for a period of 20 years (1991-2010) were received from the Meteorological Organization.Then the values of potential evapotranspiration, aridity index, and Angot precipitation index were calculated for each station in the current conditions. In order to project changes in the aridity index in the future, the output of three MIROC5, HadGEM2-ES, and GFDL-CM3 models for the historical period (1991–2010) and the medium future (2041–2060) under the RCP4.5 scenario and based on the LARS- WG6 scaled down. After evaluating the accuracy of the models against the observational data, the index values were calculated in future conditions, and zoning maps were drawn for the study area.

Results: Projection of changes in evapotranspiration values under the RCP4.5 scenario (2041–2060) showed that the most changes were in January, March, December, and November. Shahrekord showed the highest percentage of incremental changes, with 36.8% change in January compared to the base period. In terms of rainfall regime, the Central Iran watershed has a winter rainfall regime based on the Angot precipitation index in the current conditions. The HadGEM2-ES model is consistent with the base period, but based on the MIROC5 and GFDL-CM3 models, the winter precipitation in many stations will change to the all-season precipitation regime in the future. Climatic zoning of the UNEP aridity index in the studied area indicated that in current conditions, more than half of the stations have a dry climate. Only Kohrang has a humid climate with an aridity index value of 0.78. Shemiranat and Oligoders have semi-dry conditions with values of 0.21 and 0.20, respectively. The evaluation of the future climate conditions according to the GFDL-CM3 model shows that the humid climate in central Iran will gradually disappear, while the semi-arid climate will expand in this region. The output of the MIROC5 model also shows the expansion of the ultra-arid climate zone in different parts of the catchment area of Central Iran.

Conclusion: The results showed that the aridity index values based on selected GCM models have decreased in the studied area compared to the observation period. Therefore, a large number of stations that have dry conditions in the base period will experience ultra-dry conditions in the future climate.The evapotranspiration potential in the Central Iran watershed is increasing during all months of the year, especially in wet stations in the west. This issue shows the dominance of the aridity index over this region in future conditions.

Keywords: Aridity Index, Climate change, Evapotranspiration potential, Gcms, Statistical downscaling

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2025-07-04]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1402.14.27.8.5]
[DOI: 10.61186/jwmr.14.27.86]