

## پیش‌بینی میزان تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه تحت سناریوهای RCP در دوره‌های آتی (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گلپایگان)

سید محمدرضا میرحسینی<sup>۱</sup>، هدی قاسمیه<sup>۲\*</sup>، خدایار عبداللهی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۲. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان

۳. استادیار، گروه مهندسی طبیعت دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۷/۰۴، تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۱۱/۳۰)

### چکیده

تبخیر و تعرق، انتقال انرژی بین سطح زمین و جو است و سازنده‌ترین مکانیسم ارتباطی بین هیدروسفر، لیتوسفر و بیوسفر محسوب می‌شود. پژوهش حاضر، روی پیش‌بینی تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه آبخیز گلپایگان به‌عنوان پاسخ به تغییرات آب‌وهوایی تمرکز دارد. به این منظور، از شش الگوریتم هارگریوز-سامانی، تورنت-وایت، رومانکو، اودین، خاروفا و بلانی‌کریدل و نیز الگوریتم پنمن-مانتیث-فائو به‌عنوان الگوریتم‌های معیار برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. نتایج نشان داد الگوریتم هارگریوز-سامانی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، عملکرد نزدیک‌تری به الگوریتم معیار پنمن-مانتیث-فائو داشته است. بنابراین، این الگوریتم برای ارزیابی تأثیر احتمالی تغییرات آب‌وهوایی در دوره‌های آینده بر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. سپس، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو GCM برای دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6,4.5,8.5 توسط مدل LARS-WG6 و با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2-ES برآورد شد. در نهایت، مقادیر تبخیر و تعرق پیش‌بینی شده در دوره‌های آینده با نتایج تبخیر و تعرق در دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷) مقایسه شد تا تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر تبخیر و تعرق پتانسیل بررسی شود. نتایج بیانگر افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل تحت کلیه سناریوهای RCP در دوره‌های آینده بود. افزایش تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک به ترتیب ۶/۳۱، ۷/۰۵ و ۷/۱۰ درصد؛ در دوره آینده میانی ۹/۶۹، ۹/۸۴ و ۱۱/۸۲ درصد و در دوره آینده دور، ۸/۱۷، ۱۳/۷۹ و ۱۸/۱۵ درصد به‌دست آمد.

**کلیدواژگان:** تغییر اقلیم، تبخیر و تعرق پتانسیل، حوضه آبخیز گلپایگان، هارگریوز.

## مقدمه

تغییر اقلیم به‌عنوان یک پدیده پیچیده اتمسفری-اقیانوسی، به مفهوم تغییر در شرایط میانگین آب‌وهواست که در مقیاس جهانی و در یک دوره طولانی‌مدت اتفاق می‌افتد [۱]. از جمله دلایل اصلی این پدیده، فعالیت‌های خورشیدی، آتشفشان‌ها، اقیانوس‌ها و از همه مهم‌تر، افزایش گازهای گل‌خانه‌ای در نتیجه فعالیت‌های انسانی و صنعتی شدن کشورهاست که منجر به دگرگونی آب‌وهوا می‌شود و تغییر مقدار پارامترهای هواشناسی مانند دما و بارش را در نقاط مختلف جهان به‌دنبال دارد [۲]. در نتیجه، میانگین متغیرهای اقلیمی به‌خصوص مؤلفه‌های دما و بارش در مقیاس سالانه یا فصلی، کارکرد زیادی در چرخه هیدرولوژی دارند و معمولاً به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی تغییر اقلیم استفاده می‌شوند. بنابراین، ارزیابی متغیرهای بارش و دما تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، ضروری به نظر می‌رسد. البته، این مؤلفه‌ها ذاتاً از یک عدم اطمینان برخوردار هستند و اغلب تصمیم‌گیرندگان، استنباط آنها را سخت می‌دانند [۳]. مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)<sup>۱</sup> به‌عنوان مدل‌های عددی که فرایندهای فیزیکی را نشان می‌دهند، می‌توانند اقلیم حاضر را شبیه‌سازی کرده و شرایط اقلیم آینده را تحت سناریوهای مختلف پیش‌بینی کنند [۴].

تبخیر و تعرق مرجع به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های مهم در چرخه هیدرولوژی، کارکرد بسیار مهمی در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، برنامه‌ریزی منابع آب و استفاده کارآمد از آب قابل دسترس دارد. تا کنون روش‌های مختلفی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ارائه شده که تفاوت اصلی آنها در ساختار و نیز پارامترهای هواشناسی استفاده‌شده است. روش استاندارد پنمن-مانتیت-فائو به‌عنوان روشی مرجع بر مبنای اصول فیزیکی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از متغیرهای هواشناسی مانند دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی از سوی سازمان خواروبار جهانی<sup>۲</sup> ارائه شده است. مهم‌ترین محدودیت این روش، نیاز به آمار و اطلاعات روزانه است که مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است [۵]. از طرفی، کم بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی که قادر به ثبت تمام متغیرهای هواشناسی این روش باشند و عدم اطمینان کافی

از دقت اطلاعات ثبت‌شده، از دیگر عوامل محدودکننده کاربرد این روش محسوب می‌شوند [۶]. از این‌رو، روش‌های تجربی مانند تورنت‌وایت، بلانی‌کریدل و هارگریوز با متغیرهای کمتر و قابل دسترس‌تر برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ارائه شده‌اند، با توجه به اینکه مقدار تبخیر و تعرق مرجع حداقل تا ۸۰ درصد وابسته به متغیرهای دما و تابش خورشیدی هستند [۷]. لیانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۸] در تحقیقی بیان کردند که پارامترهای اقلیمی نظیر میانگین و حداکثر دمای هوا، رطوبت نسبی و ساعت‌های آفتابی، از مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر و تعرق بوده و با داشتن این متغیرها، تبخیر و تعرق برای دوره‌های آینده قابل محاسبه و پیش‌بینی خواهد بود. محققان مختلفی در سراسر دنیا به پژوهش‌هایی در زمینه تبخیر و تعرق پرداخته‌اند که بعضی از آنها به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

جوو<sup>۴</sup> و همکاران [۹] به بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر اکوهیدرولوژی حوضه رودخانه جیوشو<sup>۵</sup> در کشور چین با استفاده از مدل HadCM3<sup>۶</sup> و ریزمقیاس‌گردانی SDSM<sup>۷</sup> تحت دو سناریوی A2 و B2 طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۹۹ پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد دمای حداقل و حداکثر روزانه و تبخیر و تعرق پیش‌بینی‌شده در ۹۰ سال آینده، دارای روند افزایشی است. لی و همکاران [۱۰] نیز طی تحقیقی نتیجه گرفتند که استفاده از تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)<sup>۸</sup> به‌منظور رسیدن به تبخیر و تعرق واقعی (AET)<sup>۹</sup>، یک رویکرد مهم در مدل‌های هیدرولوژیکی است. با این حال، آنها برای تشخیص بهترین مدل به منظور برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در مناطق خشک به ارزیابی شش مدل بلانی‌کریدل<sup>۱۰</sup>، هارگریوز<sup>۱۱</sup>، پرستلی-تیلور<sup>۱۲</sup>، دالتون<sup>۱۳</sup>، پنمن<sup>۱۴</sup> و شاتلورث<sup>۱۵</sup> پرداختند. طی پژوهشی دیگر، قریبا<sup>۱۶</sup> و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی و توزیع پراکنندگی تبخیر و تعرق پتانسیل تحت تأثیر

3. Liang

4. Gue

5. Guishui

6. Hadley Centre Coupled Model, Version 3

7. Statistical DownScaling Model

8. Potential EvapoTranspiration

9. Actual Evapo Transpiration

10. Blaney-Criddle

11. Hargreaves

12. Priestley-Taylor

13. Dalton

14. Penman

15. Shuttleworth

16. Gharbia

1. General Circulation Model

2. Food and Agriculture Organization

براساس ۳ سناریوی RCP، پارامترهای حداقل و حداکثر دما و باران را در دوره آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۶۰) پیش‌بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که دما بین ۱/۰۱ تا ۱/۱۲ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بارش حدود ۲۱/۲۳ درصد افزایش می‌یابد. لیو<sup>۱</sup> و همکاران [۱۶] نیز در مطالعه‌ای از داده‌های تاریخی آب‌وهوا برای کشور چین در دوره پایه ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۰ برای تعیین بازه‌های زمانی مناسب به منظور استفاده از شاخص تبخیر و تعرق برای ارزیابی خطر خشکسالی استفاده کردند و فراوانی درجه خشکسالی و مدت زمان تغییرات مکانی و زمانی در سه دوره زمانی (۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰، ۲۰۴۱ تا ۲۰۷۰ و ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹) را تحت سناریوهای RCP مورد سنجش قرار دادند و در نهایت به این نتیجه رسیدند که دوره زمانی ۲۰۷۱ تا ۲۰۹۹، طولانی‌ترین دوره زمانی از لحاظ خشکسالی بوده و از نظر مکانی، خطرات خشکسالی در مناطق شمالی شدیدتر از مناطق جنوبی به‌دست آمد.

با توجه به تحقیقات انجام‌شده، روش‌های ترکیبی برآورد تبخیر و تعرق مانند پنمن-مانتیث-فائو به متغیرها و پارامترهای هواشناسی زیادی احتیاج دارند. این روش‌ها به دلیل استفاده از تعداد زیادی متغیر اقلیمی در محاسبه قابل قبول است، ولی به دلیل اینکه همه اطلاعات مورد نیاز محاسبه نمی‌شوند، نمی‌توانند تخمین مناسبی ارائه دهند. این روش‌ها نیاز به داده‌هایی مانند تابش، دما، رطوبت و سرعت باد دارند و از آنجا که در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی، داده‌های دمایی ثبت می‌شود، بررسی دقت روش‌های تجربی که فقط به عامل دما نیازمند هستند، ضرورت می‌یابد [۱۷]. کسب داده‌های دمایی بسیار راحت‌تر از داده‌های تابشی است و اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه تبخیر و تعرق از این روش قابل دسترس‌تر و سریع‌تر است. از طرفی، دما یکی از پارامترهای کلیدی مؤثر در تغییرات اقلیمی است [۱۸]. میزان تبخیر و تعرق مستقیم با متغیرهای اقلیمی ارتباط است و انتظار می‌رود با تغییر در پارامترهای اقلیمی به‌ویژه دمای هوا و متغیرهای مرتبط با دما، میزان این متغیر نیز تغییر کند [۱۹]. بنابراین، با توجه به مسائل مطرح‌شده، ابتدا مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG6

تغییرات آب‌وهوایی در سطح حوضه آبخیز رودخانه شانون پرداختند. آنها از شش مدل برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده کردند و در نهایت، از بهترین الگوریتم اعتبارسنجی به منظور ارزیابی تأثیر احتمالی تغییرات آب‌وهوایی آینده بر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل بهره بردند. بابائیان و کوهی [۱۲] به ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از مدل ریزمقیاس‌گردانی (LARS-WG)<sup>۱</sup> و روش تبخیر و تعرق هارگریوز در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی در سه دوره آتی تحت سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 پرداختند. یافته‌های آنها، بیانگر افزایش تبخیر و تعرق بالقوه در ایستگاه‌های مشهد، تربت حیدریه و سبزوار در انتهای دوره آینده نسبت به دوره پایه به ترتیب به میزان ۱۳/۴، ۱۴/۲ و ۹/۳ درصد بود. همچنین، گاربا و همکاران [۱۳]، تبخیر و تعرق پتانسیل را در دوره‌های فواصل زمانی آینده (۲۰۲۰، ۲۰۵۰، ۲۰۸۰) در حوضه آبخیز شانون پیش‌بینی کردند. به این منظور، آنها از شش مدل تجربی برای ارزیابی تأثیر احتمالی تغییرات آب‌وهوایی آینده بر میزان تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده کردند و سپس، به مقایسه دوره پایه با مقادیر پیش‌بینی‌شده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی، آثار درخور توجهی بر تبخیر و تعرق و نوسان ذخایر آب شیرین دارند. گودرزی و همکاران [۱۴] در پژوهشی، تأثیرات احتمالی تغییرات اقلیمی بر مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را تحت سناریوهای B1، B2، A2 و A1B با استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌گردانی آماری LARS-WG و SDSM و خروجی مدل گردش عمومی HadCM3 در سه دوره زمانی آینده بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان تبخیر و تعرق محاسبه‌شده در تمامی ماه‌ها و تمامی فصول در دوره‌های آتی تحت تأثیر دما افزایش خواهد یافت. یافته‌های تحقیق ایشان، بیانگر افزایش تبخیر و تعرق در هر سه دوره آتی نسبت به دوره پایه بود. طی تحقیقی دیگر، جواهریان و همکاران [۱۵] به پیش‌بینی پارامترهای دما و بارندگی در حوضه آبخیز سد لار با استفاده از مدل SDSM پرداختند و برای این منظور، دوره پایه را از سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۵ انتخاب کردند و

1. LARS-WG: Long Ashton Research Station- Weather Generator

در پژوهش پیش رو به منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز گلپایگان، از آمار هواشناسی سه ایستگاه سینوپتیک (با توجه به روش تیسن‌بندی صورت‌گرفته در سطح حوضه) طی دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۷ (حداکثر سال آماری پایه در سه ایستگاه) استفاده شد. ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب شامل گلپایگان در داخل حوضه، و داران و الیگودرز در خارج حوضه هستند که متغیرهای هواشناسی مطالعه‌شده شامل دمای حداقل و حداکثر، تابش، رطوبت نسبی، فشار بخار واقعی، فشار بخار اشباع و سرعت باد به صورت روزانه از این ایستگاه‌ها تهیه شد. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گلپایگان در کشور و ایستگاه‌های سینوپتیک بررسی‌شده در شکل ۱ و همچنین، مشخصات جغرافیایی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

با توجه به آمار هواشناسی ایستگاه‌های بررسی‌شده، حداقل و حداکثر دمای مشاهده‌شده در این سه ایستگاه در دوره پایه بررسی‌شده (۱۹۹۲ تا ۲۰۱۷) برابر با ۲۴/۸- درجه سانتی‌گراد مربوط به ایستگاه الیگودرز و ۴۰+ درجه سانتی‌گراد مربوط به ایستگاه گلپایگان به‌دست آمد. همچنین، میانگین حداقل و حداکثر دمای ماهانه طی ۲۶ سال برابر با ۰/۵۹- و ۲۶/۷۵+ و متوسط دمای ۲۶ ساله سه ایستگاه برابر با ۱۳/۰۸+ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد که در شکل ۲ به صورت جداگانه آورده شده است.

به‌منظور شبیه‌سازی و برآورد متغیرهای اقلیمی بارش و دمای سه ایستگاه هواشناسی موجود در محدوده حوضه آبخیز گلپایگان در دوره پایه و نیز خروجی مدل جهانی (HadGEM2-ES)<sup>۱</sup> برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای مختلف (RCP(2.6, 4.5, 8.5)<sup>۲</sup> در دوره‌های مختلف آینده نزدیک، میانی و دور استفاده می‌شود. سپس، میزان تبخیر و تعرق پتانسیل برای دوره پایه و دوره‌های آینده محاسبه می‌شود. از جمله موضوعات در نظر گرفته‌شده در تحقیق حاضر این است که مقادیر این متغیر با پنج الگوریتم مبتنی بر دما در دوره پایه محاسبه و نتایج آن با الگوریتم معیار پنمن-مانتیش-فائو در همین دوره مقایسه می‌شود. سپس، بهترین الگوریتم از نظر عملکرد و نتیجه با الگوریتم معیار، برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آینده و براساس متغیر پیش‌بینی‌شده دما استفاده می‌شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه‌شده

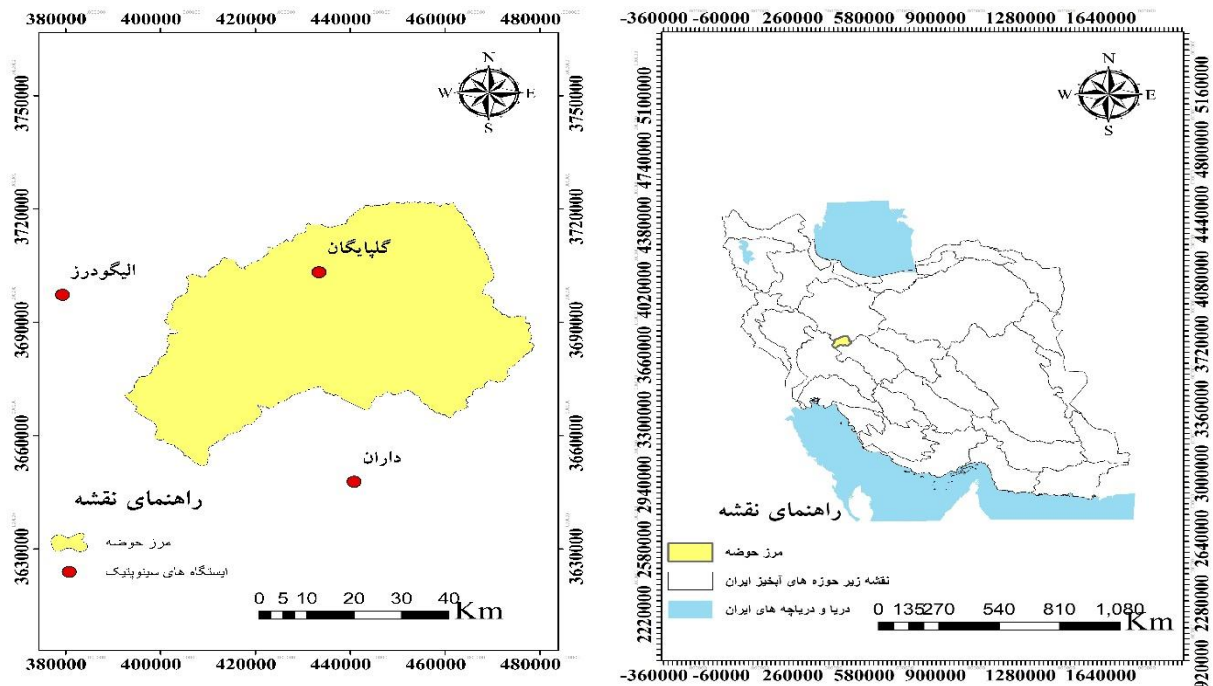
حوضه آبخیز گلپایگان با مشخصات جغرافیایی ۴۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۶ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و صفر دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۸ دقیقه عرض شمالی در مرکز ایران و در حوضه آبریز دریاچه نمک قرار گرفته است. وسعت حوضه مطالعه‌شده، ۳۳۹۷/۸۵ کیلومتر مربع است که ۰/۲ درصد از مساحت کل کشور را دربرمی‌گیرد.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مطالعه‌شده

| ارتفاع از سطح دریا (m)<br>(m)Height above mean sea level | عرض جغرافیایی<br>Latitude | طول جغرافیایی<br>Longitude | نام ایستگاه<br>Name Station |
|--|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 2022   | 33° 23'                   | 49° 42'                    | الیگودرز                    |
| 2290   | 32° 57'                   | 50° 21'                    | داران                       |
| 1870   | 33° 27'                   | 50° 16'                    | گلپایگان                    |

1. HadGEM2-ES: is a coupled Earth System Model that was used by the Met Office Hadley Centre for the CMIP5 centennial simulations.

2. RCP: Representative Concentration Pathways



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز گلپایگان و ایستگاه‌های مطالعه‌شده



شکل ۲. میانگین طولانی‌مدت دماهای حداقل و حداکثر ایستگاه‌های مطالعاتی در دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷)

معرفی مدل لارس  
در تحقیق حاضر، ریزمقیاس‌نمایی داده‌های هواشناسی بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و... توسط مدل LARS-WG6 در دوره پایه انجام شد. سپس، پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی با استفاده از مدل اقلیمی HadGEM2-ES (از سری مدل‌های موجود در CMIP5) در دوره‌های آتی و تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 صورت گرفت. یادآوری این نکته ضروری است که هنگام انجام تحقیق، متغیرهای NCEP استفاده‌شده در مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM فقط تا سال ۲۰۰۷ موجود بود و بنابراین، با توجه به کاهش

۱. CMIP: Coupled Model Intercomparison Project

از حدود ۲/۵ در ۲/۵ درجه به حدود ۰/۵ در ۰/۵ درجه ارتقا یافته‌اند که پیشرفت بسیار بزرگی است. ویژگی‌های سناریوهای استفاده‌شده در تحقیق حاضر براساس میزان واداشت تابشی و غلظت دی‌اکسید کربن تا سال ۲۱۰۰ به شرح جدول ۲ است [۲۰].

جدول ۲. ویژگی‌های سناریوهای RCP استفاده‌شده در تحقیق حاضر

| سناریو<br>Scenario | تیم طراحی<br>Design team                           | واداشت تابش ( $w/m^2$ )<br>Radiative forcing ( $w/m^2$ )  |
|--------------------|--|---|
| RCP2.6             | تیم مدل‌سازی IMAGE از مؤسسه ارزیابی‌های محیطی هلند | واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به $۲/۶ w/m^2$ در سال ۲۱۰۰ می‌رسد.       |
| RCP4.5             | گروه مدل‌سازی MiniCAM                              | واداشت تابشی ناشی از گازهای گل‌خانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار $۴/۵ w/m^2$ و بعد از سال ۲۱۰۰ ثابت می‌ماند. |
| RCP8.5             | تیم مدل‌سازی MESSAGE و مؤسسه IIASA                 | واداشت تابشی به میزان بیش از $۸/۵ w/m^2$ در سال ۲۱۰۰ می‌شود.  |

ساده‌تر برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شود. براساس نتایج مطالعات پیشین، بهترین روش‌ها برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در سه دسته قرار می‌گیرند [۲۲] که عبارت‌اند از:

(۱) روش‌های مبتنی بر تابش؛

(۲) روش‌های مبتنی بر انتقال جرم؛

(۳) روش‌های مبتنی بر دما.

در پژوهش حاضر، مدل پنمن - مانیت - فائو به‌عنوان معیار سنجش مدل‌های دیگر برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره پایه قرار گرفت و از آنجا که تعداد پارامترهای مورد نیاز در مدل پنمن - مانیت - فائو زیاد و برآورد آنها در دوره‌های آینده دشوار است، نزدیک‌ترین و ساده‌ترین مدل‌ها به روش پنمن - مانیت - فائو در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره پایه و سپس، بهترین مدل برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره‌های آینده استفاده شد. مدل‌های استفاده‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از:

- مدل پنمن - فائو - مانیت<sup>۳</sup> (مبتنی بر تابش، انتقال جرم و دما)؛

- مدل هارگریوز - سامانی<sup>۴</sup> (مبتنی بر دما)؛

- مدل اودین<sup>۵</sup> (مبتنی بر دما و تابش)؛

- مدل تورنت‌وایت<sup>۶</sup> (مبتنی بر دما)؛

سال آماری در صورت استفاده از این مدل، از مدل LARS-WG6 که کارایی زیادی دارد، استفاده شد.

همچنین، درخور یادآوری است که تغییر مهمی در قدرت تفکیک مکانی مدل‌های گزارش پنجم نسبت به گزارش‌های چهارم و سوم صورت گرفته و آن این است که

LARS-WG برای تولید داده‌های بارش روزانه، تابش روزانه و دماهای حداکثر و حداقل روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیمی حال و آینده به کار می‌رود و شامل سه بخش اصلی واسنجی، ارزیابی و تولید داده‌های هواشناسی در دوره‌های آینده است. در تحقیق پیش رو پس از واسنجی داده‌های روزانه یادشده برای یک دوره پایه، داده‌های تولیدشده با داده‌های واقعی (مشاهده‌شده) از طریق معیارهای آماری مختلف شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)<sup>۱</sup>، انحراف مدل (BIAS) و نش‌ساتکلیف (NS)<sup>۲</sup> مقایسه شدند. به این ترتیب، مدل ارزیابی شد (که فرمول‌های آنها در بخش‌های بعدی آورده شده است). پس از اطمینان از درستی نتایج ارزیابی، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی با استفاده از مدل اقلیمی برای دوره‌های آینده تحت سناریوهای RCP صورت گرفت.

معرفی مدل‌ها برای اندازه‌گیری تبخیر و تعرق پتانسیل برای اطمینان در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل باید به عواملی از جمله تعداد ایستگاه هواشناسی و تعداد سال‌های آماری و تنوع پارامترهای اندازه‌گیری توجه کرد [۲۱]. هر چه تعداد ایستگاه‌های هواشناسی بیشتر باشد، می‌توان به اطلاعات دقیق‌تری دست یافت، ولی از آنجا که تعداد این ایستگاه‌ها و تنوع پارامترهای اندازه‌گیری در سطح حداقل است، بسیاری از دانشمندان توصیه می‌کنند از روش‌های

3. Penmann- Manteith-FAO

4. Hargreaves-Samani

5. Oudin

6. Thorntwaite

1. RRMSE: Root Mean Square Error

2. NS: Nash- Sutcliffe

طریق تخمین اشعه‌های خارج از زمین توصیه می‌کنند و براساس مطالعات قبلی خود معادله ساده‌ای ارائه دادند که فقط به دما، روز و عرض جغرافیایی نیاز دارد [۲۶]. مدل هارگریوز-سامانی به صورت روابط ۲-۷ ارائه شده است:

$$ET_o = 0.0023(T_m + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_{a2} \quad (2)$$

$$R_{a1} = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) \quad (3)$$

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (4)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1/39\right) \quad (5)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (6)$$

$$R_{a2} = \frac{R_{a1}}{\lambda \varphi_w} \quad (7)$$

که در روابط یادشده،  $ET_o$ : تبخیر و تعرق مرجع برحسب  $mm/day$ ،  $T_m$ : میانگین دمای روزانه برحسب  $^{\circ}C$ ،  $T_{max}$ : حداکثر دمای روزانه برحسب  $^{\circ}C$ ،  $T_{min}$ : حداقل دمای روزانه برحسب  $^{\circ}C$ ،  $R_{a2}$ : آب معادل تابش فرازمینی،  $R_{a1}$ : تابش فرازمینی برحسب  $mm/day$ ،  $G_{sc}$ : ثابت خورشیدی (مساوی با  $0.0802$   $MJ/m^2/day$ )،  $d_r$ : فاصله نسبی زمین تا خورشید،  $\omega_s$ : زاویه ساعتی خورشید برحسب رادیان،  $\varphi$ : عرض جغرافیایی برحسب رادیان،  $\delta$ : زاویه میل خورشید برحسب رادیان،  $J$ : شماره روز از سال (از اول ژانویه)،  $\lambda$ : گرمای نهان تبخیر برحسب  $MJ/Kg$

$\varphi_w$ : جرم مخصوص آب برحسب  $Kg/m^3$

#### مدل اودین

اودین، کارایی مدل برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل را در ۳۰۸ حوضه آبریز در کشورهای فرانسه، استرالیا و آمریکا بررسی کرد و به این نتیجه رسید که مدل‌های مبتنی بر دما و تابش، بهترین عملکرد را دارند [۲۷]. در نهایت، اودین مدل خود را ارائه کرد که به صورت معادله ۸ است:

$$ET_o = \left(\frac{R_a}{\lambda \rho}\right) \left(\frac{T_a}{100}\right) \quad (8)$$

که در این معادله،  $ET_o$ : تبخیر و تعرق مرجع برحسب

- مدل بلانی-کریدل<sup>۱</sup> (مبتنی بر دما و رطوبت نسبی و باد)؛  
- مدل خاروفا<sup>۲</sup> (مبتنی بر دما)؛  
- مدل روماننکو<sup>۳</sup> (مبتنی بر دما).

#### مدل پنمن - مانتیث - فائو

فائو در سال ۱۹۹۸، روش پنمن-مانتیث-فائو را به‌عنوان روش استاندارد برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع معرفی کرد. معادله پنمن-مانتیث-فائو برای محاسبه تبخیر و تعرق در دوره روزانه به صورت رابطه ۱ است [۲۳].

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/T + 273.16]U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن،  $ET_o$ : تبخیر و تعرق مرجع برحسب  $mm/day$ ،  $R_n$ : تابش خالص ورودی به سطح گیاه برحسب  $MJ/m^2/day$ ،  $G$ : شار گرمای خاک برحسب  $MJ/m^2/day$ ،  $T$ : میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری برحسب  $^{\circ}C$ ،  $U_2$ : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب  $m/s$ ،  $e_s$ : فشار بخار اشباع برحسب  $KPa$ ،  $e_a$ : فشار بخار واقعی برحسب  $KPa$ ،  $(e_s - e_a)$ : کمبود فشار بخار برحسب  $KPa$ ،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار برحسب  $KPa/^{\circ}C$ ،  $\gamma$ : ضریب ثابت سایکرومتری برحسب  $KPa/^{\circ}C$ . معادله پنمن-مانتیث-فائو برای محاسبه روزانه تبخیر و تعرق پتانسیل علاوه بر مختصات مکان ایستگاه، به داده‌هایی نظیر دمای هوا، تابش و سرعت باد نیازمند است.

#### مدل هارگریوز - سامانی

هارگریوز، یک معادله تجربی را برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در سال ۱۹۷۵ منتشر کرد [۲۴]. مدل مورد نظر با استفاده از داده‌های حاصل از یک لایسیمتر و داده‌های ایستگاه هواشناسی برای یک دوره ۸ ساله به‌دست آمده است. وی گفت که بخشی از تابش فرازمینی که از طریق ابرها نفوذ می‌کند و به سطح زمین می‌رسد، منبع اصلی حرارت برای فرایندهای تبخیر و تعرق است. مطالعات بعدی توسط هارگریوز و سامانی نشان داد تابش خورشیدی را می‌توان از اختلاف بین حداکثر و حداقل دما تخمین زد [۲۵]. از آنجا که داده‌های تابش خورشیدی غالباً در دسترس نیست، هارگریوز و سامانی برآورد آن را از

1. Blaney- Criddle  
2. Kharrufa  
3. Romanenko

که در آن،  $ETP_c$ : تبخیر و تعرق پتانسیل اصلاح شده برحسب  $D, \text{mm/month}$ : متوسط ساعات‌های روشنایی روزانه در ماه مورد نظر و یا تعداد ساعات‌های روشنایی به  $hr$  که بستگی به عرض جغرافیایی و ماه مربوطه دارد و  $N$ : تعداد روزهای ماه مورد نظر است.

#### مدل بلانی‌کریدل

روش بلانی‌کریدل، یکی از روش‌های قدیمی برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل در آمریکا شناخته شده است که به‌طور گسترده در سایر نقاط جهان استفاده می‌شود. اگرچه ابتدا برای تخمین آب مصرفی محصولات کشاورزی در غرب آمریکا استفاده می‌شد؛ اما بعدها برای تبخیر و تعرق پتانسیل در زمین‌های کشاورزی یا حوضه‌هایی با پوشش گیاهی منطبق استفاده شد [۲۹]. رابطه این مدل به صورت زیر است (رابطه ۱۳):

$$ET_0 = K[P(0.46T_m + 8.13)] \quad (13)$$

فرمول پیشنهادی بلانی‌کریدل توسط پرویت<sup>۱</sup>، از اساتید سابق دانشگاه کالیفرنیا، بررسی شد [۳۰] که برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن به‌صورت رابطه ۱۴ ارائه شد:

$$ET_0 = a + b[P(0.46T_m + 8.13)] \quad (14)$$

که در آن،  $ET_0$ : تبخیر و تعرق مرجع برحسب  $\text{mm/day}$ ؛  $T_m$ : میانگین دمای روزانه برحسب  $^{\circ}\text{C}$ ؛  $P$ : ضریب مربوط به طول روز (ضریب روشنایی)،  $K$ : ضریب مصرف که بستگی به نوع پوشش گیاهی و محل دارد و در نهایت،  $a$  و  $b$ : ضرایب منطقه‌ای هستند که از روابط ۱۵ و ۱۶ به‌دست می‌آیند:

$$a = 0.0043(RM_{\min}) - (n/N) - 1.41 \quad (15)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RM_{\min}) + 1.07(n/N) + 0.066(U_{\text{day}}) - 0.006(RH_{\min})(n/N) - 0.0006(RH_{\min})(U_{\text{day}}) \quad (16)$$

در این فرمول‌ها،  $n$  تعداد ساعات‌های آفتابی،  $N$  حداکثر ساعات‌های ممکن تابش آفتاب،  $RH_{\min}$  حداقل رطوبت نسبی برحسب درصد و  $U_{\text{day}}$  سرعت باد طی روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین برحسب  $m/s$  است. اگر آمار اندازه‌گیری

$R_a, \text{mm/day}$ : تابش فرازمینی برحسب  $\lambda, \text{MJ/m}^2$ ؛ گرمای نهان تبخیر برحسب  $\rho, \text{MJ/Kg}$ : چگالی آب که برابر با یک است،  $T_a$ : میانگین دمای روزانه برحسب  $^{\circ}\text{C}$ . این معادله به تابش خورشیدی از طریق روز جولین، عرض جغرافیایی و داده‌های واقعی متکی است؛ بنابراین تنها متغیر واقعی مستقل، دما است.

#### مدل تورنت‌وایت

تورنت‌وایت، معادله‌ای ساده برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در مناطقی که دارای پوشش گیاهی تنک هستند، ارائه کرد [۲۸]. مدل تورنت‌وایت، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل را با استفاده از مقادیر دمای میانگین ماهانه و ضریب اصلاحی براساس عرض جغرافیایی محاسبه می‌کند. برآورد این تبخیر و تعرق شامل مراحل محاسباتی به شرح زیر است (روابط ۹-۱۱):

$$ETP = 16.2 \left( \frac{10T_i}{I} \right)^{\alpha} \quad (9)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_i}{5} \right)^{1.514} \quad (10)$$

$$\alpha = (0.675I^3 - 77.1I^2 + 17920I + 492390)10^{-6} \quad (11)$$

که در آن،  $ETP$ : تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه برحسب  $\text{mm}$ ؛  $T_i$ : دمای متوسط ماهانه برحسب  $^{\circ}\text{C}$  و  $I$ : شاخص حرارتی سالانه که عبارت است از: مجموع شاخص‌های حرارتی ماهانه. رابطه تورنت‌وایت هنگامی استفاده می‌شود که دمای متوسط ماهانه بین صفر و  $26/5$  درجه سانتی‌گراد باشد. برای دماهای صفر و زیر صفر، مقدار تبخیر و تعرق صفر در نظر گرفته می‌شود و شاخص حرارتی آن نیز صفر است و برای دماهای بیشتر از  $26/5$  درجه سانتی‌گراد، تبخیر و تعرق مستقل از  $I$  است و از جدول‌های مربوطه براساس میانگین دمای ماهانه به‌دست می‌آید. مقدار محاسبه‌شده از رابطه تورنت‌وایت برای ماه‌های ۳۰ روزه با ۱۲ ساعت روشنایی است و اگر یکی از این شرایط تغییر یابد، مقدار محاسبه‌شده از راه زیر تصحیح می‌شود (رابطه ۱۲).

$$ETP_c = ETP \left( \frac{D * N}{360} \right) \quad (12)$$



با روش پنمن-مانتیت-فائو مقایسه شدند. این سه معیار عبارت‌اند از: ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، انحراف مدل (BIAS) و نش-ساتکلیف (NS). پارامتر RMSE، خطای مدل را نشان می‌دهد و کمتر بودن مقادیر مربوط به این معیار، نشان‌دهنده کارایی بهتر مدل است. نزدیک به صفر بودن معیار BIAS نیز نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل در شبیه‌سازی است. همچنین، مقدار معیار NS بین منفی بی‌نهایت تا یک متغیر است و هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده بیشتر بودن دقت مدل است. روابط مربوط به هر یک از معیارهای ارزیابی عملکرد یادشده در زیر نشان داده شده است (روابط ۲۰-۲۲).

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (21)$$

$$NS = 1 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O}_i)^2} \right) \quad (22)$$

در این روابط، S مقادیر برآوردشده توسط مدل‌های مورد سنجش، O نشان‌دهنده مقادیر به‌دست‌آمده توسط مدل پنمن-مانتیت-فائو، اندیس i ماه‌های سال و n تعداد ماه‌های سال که برابر ۱۲ است.

#### یافته‌ها

##### ارزیابی عملکرد مدل آماری LARS-WG6

مقادیر معیارهای ارزیابی RMSE، BIAS و NSE مربوط به هر یک از متغیرهای هواشناسی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده هر یک از ایستگاه‌های مطالعاتی طی دوره آماری ۱۹۹۲-۲۰۱۷ در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است.

جدول ۳. مقادیر معیارهای ارزیابی متغیرهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک الیگودرز طی دوره ۱۹۹۲-۲۰۱۷

| معیارهای ارزیابی    | بارش (mm)          | دمای حداقل (°C)          | دمای حداکثر (°C)         | تابش خورشیدی (MJ/m <sup>2</sup> /day)    |
|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Evaluation criteria | Precipitation (mm) | Minimum temperature (°C) | Minimum temperature (°C) | Solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> /day) |
| BIAS                | 3.24               | 0.06                     | -0.01                    | 0.1                                      |
| NSE                 | 0.94               | 0.99                     | 1                        | 0.99                                     |
| RMSE                | 6.05               | 0.17                     | 0.3                      | 0.007                                    |

سرعت باد در ارتفاع دیگری در اختیار باشد، برای تبدیل به باد در ارتفاع دو متر از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود:

$$U_{2m} = U_z (2/Z)^{0.15} \quad (17)$$

که در آن، Z ارتفاعی است که سرعت باد در آن اندازه‌گیری شده و  $U_z$  سرعت باد در ارتفاع z برحسب m/s است.

#### مدل خاروفا

مدل خاروفا، معادله نسبتاً ساده‌ای است که مشابه رابطه بلانی‌کریدل است و تبخیر و تعرق پتانسیل را از طریق ایجاد همبستگی با دما و زمان تابش خورشید (ضریب روشنایی) به‌دست می‌آورد (رابطه ۱۸) [۳۱].

$$ETP = 0.34P(T_m)^{1.3} \quad (18)$$

که در آن، P و  $T_m$  مشابه تعاریف یادشده در مدل بلانی‌کریدل هستند.

#### مدل رومانکو

رومانکو، معادله برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل را با استفاده از دمای متوسط و رطوبت نسبی ارائه کرد (رابطه ۱۹) [۳۲].

$$ET_o = 0.0018(25 + T_a)^2 (100 - R_h) \quad (19)$$

که در آن،  $ET_o$ : تبخیر و تعرق پتانسیل برحسب mm/day،  $T_a$ : میانگین دمای روزانه برحسب °C و  $R_h$ : میانگین رطوبت نسبی روزانه برحسب درصد است.

#### بررسی عملکرد مدل‌های استفاده‌شده

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، رابطه پنمن-مانتیت-فائو به‌عنوان روش استاندارد و معیار در نظر گرفته شد و مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل برآوردشده در هر یک از سه ایستگاه هواشناسی با سایر مدل‌ها توسط سه معیار ارزیابی

جدول ۴. مقادیر معیارهای ارزیابی متغیرهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک داران طی دوره ۱۹۹۲-۲۰۱۷

| معیارهای ارزیابی    | بارش (mm)          | دمای حداقل (°C)          | دمای حداکثر (°C)         | تابش خورشیدی (MJ/m <sup>2</sup> /day)    |
|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Evaluation criteria | Precipitation (mm) | Minimum temperature (°C) | Minimum temperature (°C) | Solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> /day) |
| BIAS                | 1.28               | 0.04                     | -0.09                    | -0.1                                     |
| NSE                 | 0.99               | 1                        | 1                        | 0.99                                     |
| RMSE                | 2.17               | 0.2                      | 0.28                     | 0.49                                     |

جدول ۵. مقادیر معیارهای ارزیابی متغیرهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک گلپایگان طی دوره ۱۹۹۲-۲۰۱۷

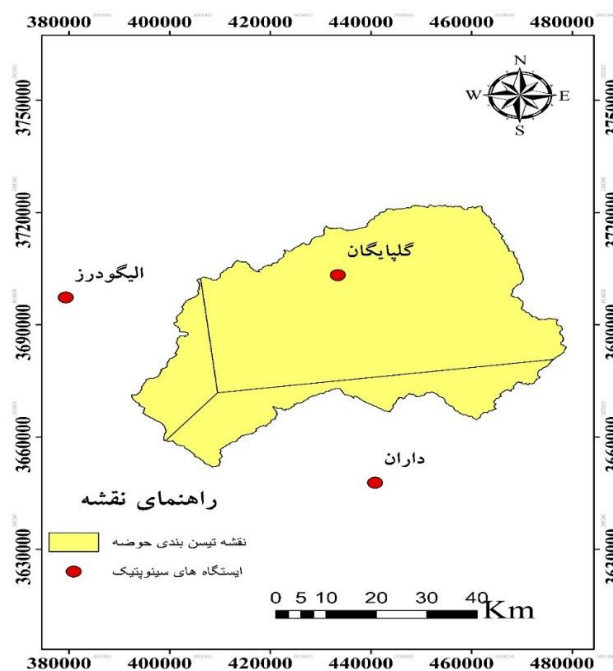
| معیارهای ارزیابی    | بارش (mm)          | دمای حداقل (°C)          | دمای حداکثر (°C)         | تابش خورشیدی (MJ/m <sup>2</sup> /day)    |
|---------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Evaluation criteria | Precipitation (mm) | Minimum temperature (°C) | Minimum temperature (°C) | Solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> /day) |
| BIAS                | -0.99              | 0                        | -0.04                    | 0.02                                     |
| NSE                 | 0.97               | 1                        | 1                        | 1  |
| RMSE                | 2.13               | 0.2                      | 0.2                      | 0.27                                     |

همان‌طور که در جدول‌های یادشده ملاحظه می‌شود، نزدیک به یک بودن مقادیر معیار NSE، کم بودن مقادیر مربوط به شاخص خطاسنجی RMSE و همچنین، نزدیک به صفر بودن شاخص BIAS، نشان‌دهنده کارایی زیاد مدل در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش خورشیدی در سه ایستگاه الیگودرز، داران و گلپایگان طی دوره پایه است.

ارزیابی عملکرد مدل‌های تبخیر و تعرق میانگین ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی طی دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷) با استفاده از شش مدل برآوردی محاسبه شد. نتایج آنها با نتایج مدل پنمن-مانتیث-فائو به‌عنوان مدل مرجع با به‌کارگیری معیارهای ارزیابی خطا مقایسه شد. پس از به‌دست آمدن نتایج مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش‌های مختلف در سه ایستگاه الیگودرز، داران و گلپایگان، میانگین وزنی تبخیر و تعرق پتانسیل برای کل حوضه به‌دست آمد. برای این منظور، ابتدا سطح تأثیر هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از روش تیسن‌بندی در نرم‌افزار Arc-GIS به‌دست آمد که در شکل ۳ نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول‌های یادشده ملاحظه می‌شود، نزدیک به یک بودن مقادیر معیار NSE، کم بودن مقادیر مربوط به شاخص خطاسنجی RMSE و همچنین، نزدیک به صفر بودن شاخص BIAS، نشان‌دهنده کارایی زیاد مدل در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی روزانه بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش خورشیدی در سه ایستگاه الیگودرز، داران و گلپایگان طی دوره پایه است.

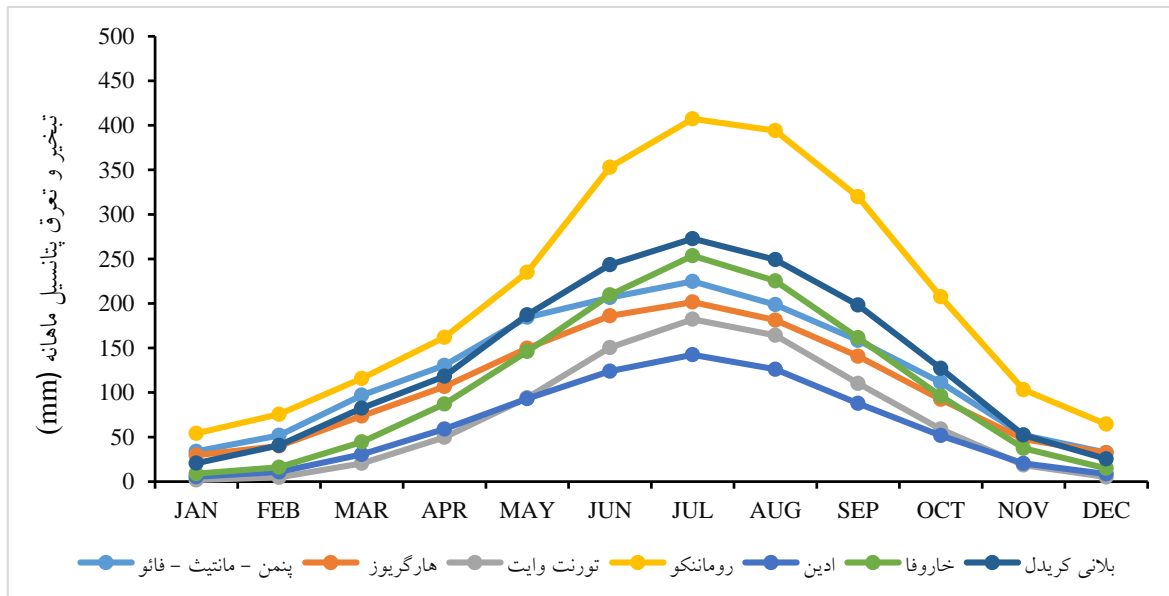
ارزیابی عملکرد مدل‌های تبخیر و تعرق میانگین ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل برای هر یک از ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی طی دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷) با استفاده از شش مدل برآوردی محاسبه شد. نتایج آنها با نتایج مدل پنمن-مانتیث-فائو به‌عنوان مدل مرجع با به‌کارگیری معیارهای ارزیابی خطا مقایسه شد. پس از به‌دست آمدن نتایج مربوط به تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش‌های مختلف در سه ایستگاه الیگودرز، داران و گلپایگان، میانگین وزنی تبخیر و تعرق پتانسیل برای کل حوضه به‌دست آمد. برای این منظور، ابتدا سطح تأثیر هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از روش تیسن‌بندی در نرم‌افزار Arc-GIS به‌دست آمد که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه تیسن‌بندی حوضه آبخیز گلپایگان

ارزیابی خطا و آسانی استفاده از متغیرها به‌منظور برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در سال‌های آینده، مدل هارگریوز - سامانی انتخاب شد. همچنین، نتایج مربوط به مدل روماننکو بیشترین اختلاف را با نتایج مدل پنمن - مانیتث - فائو به‌عنوان مدل مرجع داشت (شکل ۴ و جدول ۶).

مساحت کل حوضه، برابر با ۳۳۹۷/۸۵ کیلومترمربع است که سطح تأثیر مربوط به ایستگاه‌های گلپایگان، داران و الیگودرز به‌ترتیب برابر با ۲۴۸۲/۴۷، ۶۰۶/۳۳ و ۳۰۹/۰۵ کیلومترمربع به‌دست آمد. بنابراین، میانگین وزنی برای هر یک از مدل‌ها برآورد شده و در نهایت، با توجه به معیارهای



شکل ۴. میانگین وزنی ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبخیز گلپایگان طی دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷)

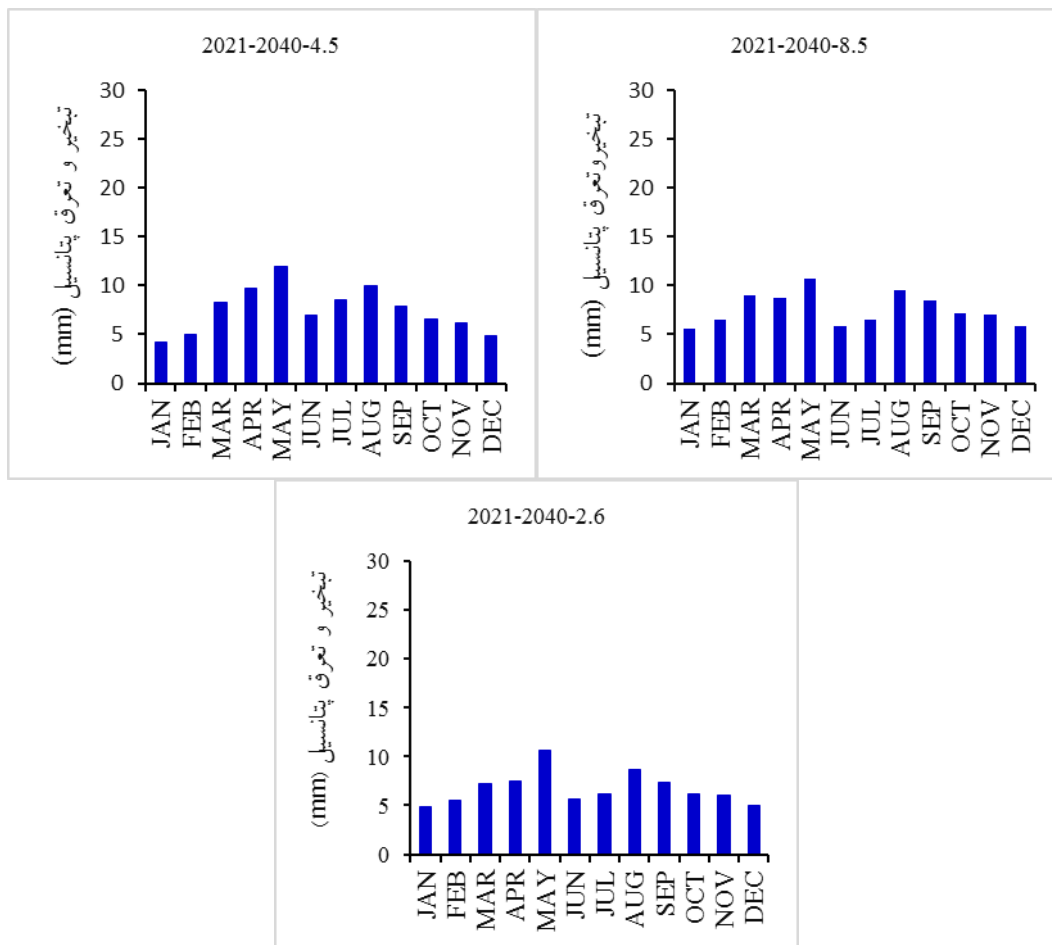
جدول ۶. معیارهای ارزیابی میانگین وزنی ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل حوضه آبخیز گلپایگان طی دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷)

| معیارهای ارزیابی | هارگریوز - سامانی | تورنت‌وایت  | روماننکو  | ادین   | خاروفا   | بلانی کریدل    |
|------------------|-------------------|-------------|-----------|--------|----------|----------------|
|                  | Hargreaves-Samani | Thorntwaite | Romanenko | Oudin  | Kharrufa | Blaney-Criddle |
| BIAS             | -16.73            | -51.81      | 84.14     | -60.20 | -15.11   | 11.28          |
| NSE              | 0.9               | 0.54        | 0.5       | 0.3    | 0.88     | 0.89           |
| RMSE             | 19.23             | 55.43       | 106.72    | 64.16  | 29.33    | 26.99          |

تبخیر و تعرق پتانسیل و در ماه‌های JAN و DEC، کمترین افزایش تبخیر و تعرق نسبت به دوره پایه قابل مشاهده است. همچنین، با توجه به جدول ۷، بیشترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل در هر سه سناریو نسبت به دوره پایه در ماه‌های JAN و DEC و کمترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق نسبت به دوره پایه در ماه‌های JUN و JUL مشاهده می‌شود.

مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل هارگریوز - سامانی در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷)

در این مرحله، میانگین وزنی ماهانه تبخیر و تعرق سه ایستگاه سینوپتیک طی دوره بیست‌ساله ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ برآورد شده و به‌منظور مقایسه، از میانگین وزنی دوره پایه تفاضل‌گیری شده است. با توجه به شکل ۵، در هر سه سناریو در ماه‌های MAY و AUG، بیشترین افزایش میزان



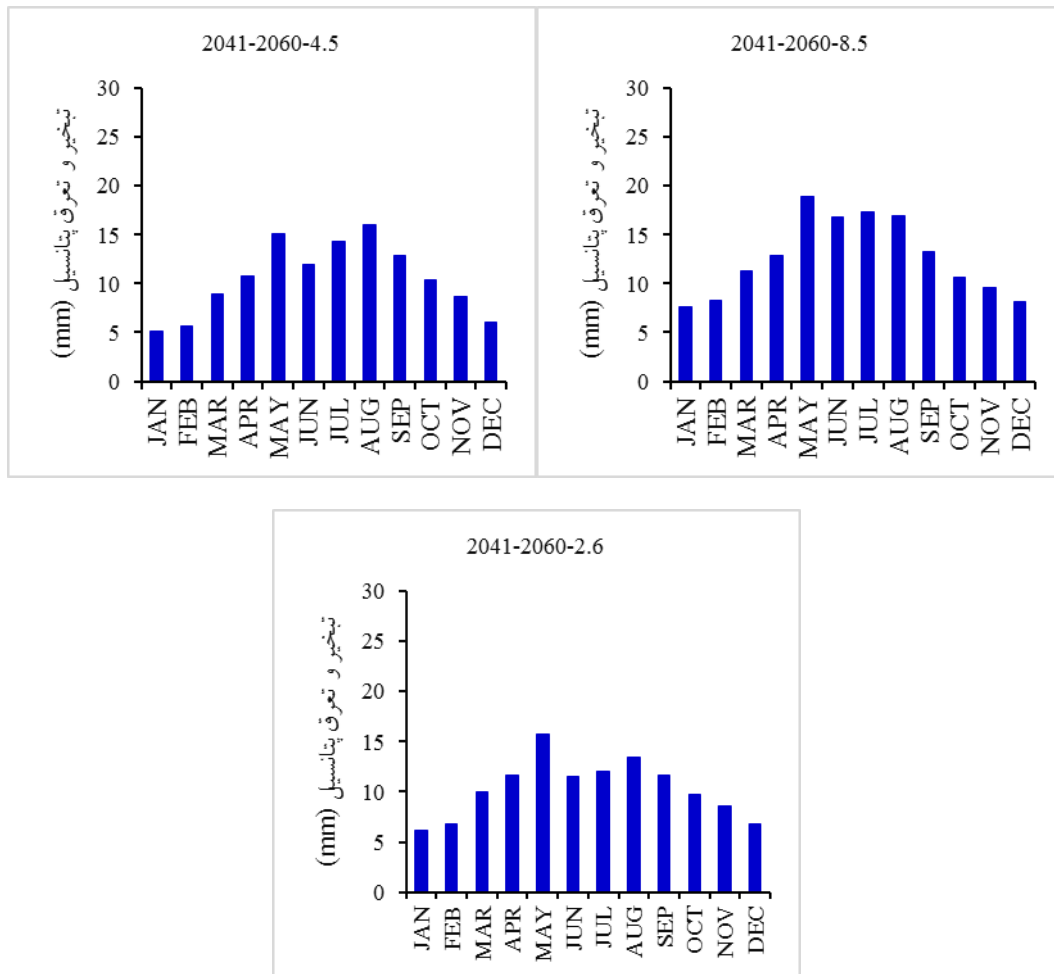
شکل ۵. تفاضل میانگین وزنی تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه آبخیز گلبایگان در دوره‌های آینده نزدیک و دوره پایه

جدول ۷. تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آینده نزدیک نسبت به دوره پایه تحت سه سناریو

| RCP    | JAN    | FEB    | MAR    | APR   | MAY   | JUN   | JUL   | AUG   | SEP   | OCT   | NOV    | DEC    |
|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| RCP2.6 | 16.45% | 13.84% | 9.82%  | 7.02% | 7.08% | 3.06% | 3.04% | 4.79% | 5.23% | 6.65% | 12.75% | 15.45% |
| RCP4.5 | 14.43% | 12.48% | 11.35% | 9.07% | 8.02% | 3.76% | 4.23% | 5.54% | 5.61% | 7.09% | 13.06% | 14.97% |
| RCP8.5 | 18.69% | 16.14% | 12.31% | 8.23% | 7.19% | 3.12% | 3.21% | 5.24% | 6.03% | 7.83% | 14.84% | 18.26% |

بیشترین افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل و در هر سه سناریو، ماه‌های JAN و DEC کمترین افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل را نسبت به دوره پایه داشته است. همچنین، در جدول ۸ در هر سه سناریو، بیشترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل نسبت به دوره پایه در ماه‌های JAN و DEC و کمترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق نسبت به دوره پایه در ماه‌های JUN و JUL مشاهده می‌شود.

مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل هارگریوز-سامانی در دوره آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷) در این مرحله، میانگین وزنی ماهانه تبخیر و تعرق سه ایستگاه سینوپتیک طی دوره بیست‌ساله ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰ برآورد شده و به منظور مقایسه، از میانگین وزنی دوره پایه تفاضل‌گیری شده است. با توجه به شکل ۶، در دو سناریوی RCP4.5 و RCP2.6 در ماه‌های MAY و AUG و در سناریوی RCP8.5، در ماه‌های MAY و JUL



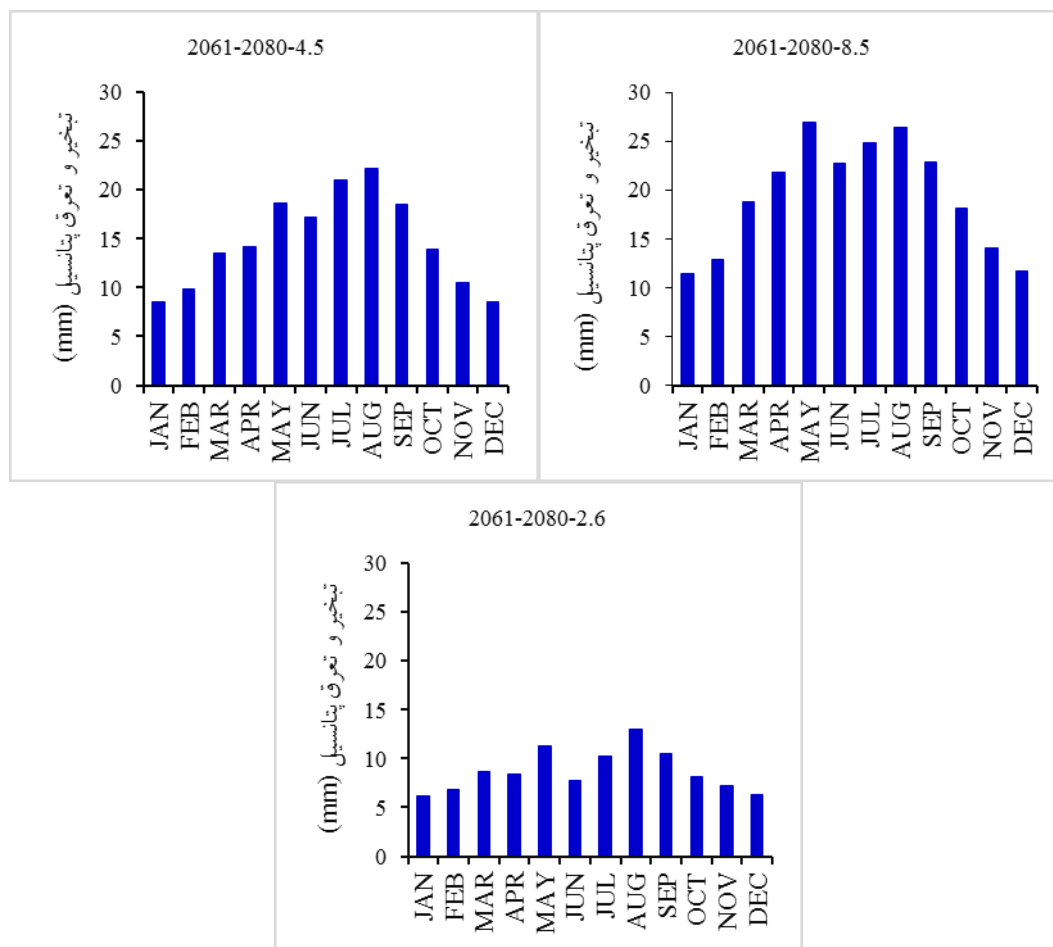
شکل ۶. تفاضل میانگین وزنی تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه آبخیز گلیایگان در دوره‌های آینده میانی و دوره پایه

جدول ۸. تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آینده میانی نسبت به دوره پایه تحت سه سناریو

| RCP    | JAN    | FEB    | MAR    | APR    | MAY    | JUN   | JUL   | AUG   | SEP   | OCT    | NOV    | DEC    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| RCP2.6 | 20.95% | 16.90% | 13.60% | 10.94% | 10.51% | 6.19% | 5.97% | 7.44% | 8.28% | 10.52% | 18.04% | 21.19% |
| RCP4.5 | 17.29% | 14.28% | 12.12% | 10.07% | 10.11% | 6.44% | 7.12% | 8.85% | 9.20% | 11.21% | 18.14% | 18.93% |
| RCP8.5 | 25.62% | 20.66% | 15.32% | 12.02% | 12.61% | 9.01% | 8.58% | 9.33% | 9.42% | 11.51% | 20.03% | 20.46% |

خورشیدی تا اواسط قرن ۲۱ افزایشی و از اواسط تا اواخر این قرن کاهش می‌شود. با این حال، بیشترین افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در سه سناریو در دو ماه MAY و AUG و کمترین افزایش در دو ماه JAN و DEC است. همچنین، در جدول ۹ در هر سه سناریو، بیشترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل نسبت به دوره پایه در ماه‌های JAN و DEC و کمترین درصد تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق نسبت به دوره پایه در ماه‌های JUN و JUL مشاهده می‌شود.

مقایسه تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۲-۲۰۱۷) در این مرحله، میانگین وزنی ماهانه تبخیر و تعرق سه ایستگاه سینوپتیک طی دوره بیست‌ساله (۲۰۶۱ تا ۲۰۸۰) برآورد و به‌منظور مقایسه، از میانگین وزنی دوره پایه تفاضل‌گیری شده است. با توجه به شکل ۷، در سناریوی RCP2.6، افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل نسبت به افزایش این متغیر در دوره آینده میانی کمتر بوده است که این نتیجه، تأییدی بر این موضوع است که واداشت تابش



شکل ۷. تفاضل میانگین وزنی تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه حوضه آبخیز گلپایگان در دوره آینده دور و دوره پایه

جدول ۹. تغییرات افزایشی تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره آینده دور نسبت به دوره پایه تحت سه سناریو

| RCP    | JAN    | FEB    | MAR    | APR    | MAY    | JUN    | JUL    | AUG    | SEP    | OCT    | NOV    | DEC    |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RCP2.6 | 21.13% | 17.17% | 11.74% | 7.85%  | 7.58%  | 4.14%  | 5.11%  | 7.18%  | 7.48%  | 8.76%  | 15.28% | 19.42% |
| RCP4.5 | 29.11% | 24.61% | 18.34% | 13.33% | 12.46% | 9.24%  | 10.41% | 12.23% | 13.13% | 15.11% | 22.17% | 26.40% |
| RCP8.5 | 38.86% | 32.07% | 25.48% | 20.42% | 17.99% | 12.23% | 12.33% | 14.56% | 16.27% | 19.71% | 29.57% | 36.15% |

مطابقت دارد. به طور مثال، کوچک‌زاده و نیکبخت [۳۴] بیان کردند که روش هارگریوز سامانی در اقلیم‌های خشک بیابانی، نیمه‌خشک و مدیترانه‌ای و همچنین، در مقیاس ماهانه مناسب‌تر هستند.

همچنین، نتایج به‌دست آمده بیانگر افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل تحت همه سناریوهای RCP برای هر یک از دوره‌های زمانی آینده است. میانگین سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره پایه حدود ۱۲۸۱ میلی‌متر در سال است؛ در حالی که کمترین افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل به‌طور متوسط در دوره زمانی آینده نزدیک و تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۸۰/۸ میلی‌متری نسبت به دوره پایه و بیشترین افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل به‌طور متوسط در

## بحث و نتیجه‌گیری

بررسی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق، همگی وابستگی خود را به دما نشان می‌دهند. در این مطالعه، رابطه ضریب اصلاحی هارگریوز - سامانی به صورت رابطه‌ای خطی و مستقیم از متغیرهای دما و تغییرات دما ارائه شد. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق استفاده‌شده در تحقیق با روش استاندارد پنمن - مانیتث - فائو نشان می‌دهد روش هارگریوز - سامانی، بیشترین دقت را نسبت به سایر روش‌ها در منطقه مطالعه‌شده داشته است. تحقیقات این بخش از تحقیق با یافته‌های دین‌پژوه [۳۳] و کوچک‌زاده و نیکبخت [۳۴] مبنی بر کارایی و دقت مناسب روش هارگریوز - سامانی برای برآورد تبخیر و تعرق

- Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2004; 130(3):184-91.
- [7]. Samani Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. Journal of irrigation and drainage engineering. 2000; 126(4):265-7.
- [8]. Liang L, Li L, Liu Q. Temporal variation of reference evapotranspiration during 1961–2005 in the Taoer River basin of Northeast China. Agricultural and Forest Meteorology. 2010; 150(2):298-306.
- [9]. Guo B, Zhang J, Gong H, Cheng X. Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin, China. Ecohydrology & Hydrobiology. 2014; 14(1):55-67.
- [10]. Li S, Kang S, Zhang L, Zhang J, Du T, Tong L, Ding R. Evaluation of six potential evapotranspiration models for estimating crop potential and actual evapotranspiration in arid regions. Journal of Hydrology. 2016; 543:450-61.
- [11]. Gharbia SS, Smullen T, Gill L, Johnston P, Pilla F. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. Science of the Total Environment. 2018; 633:571-92.
- [12]. Babaeian I, Kouhi M. Agroclimatic indices assessment over some selected weather stations of Khorasan Razavi Province under climate change scenarios. Journal of Water and Soil. 2012; 26(4): 953-967. (In Persian).
- [13]. Gharbia S, Smullon T, Gill L, Johnston P, Pilla F. Spatially distributed potential evapotranspiration modeling and climate projections. Science of The Total Environment. 2018; 571:592-633.
- [14]. Goudarzi M, Salahi B, Hosseini SA. Estimation of evapotranspiration rate due to climate change in the Urmia Lake basin. Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering. 2018; 13(41):1-2.
- [15]. Javaherian M, Ebrahimi H, Aminnejad B. Prediction of changes in climatic parameters using CanESM2 model based on RCP scenarios (case study): Lar dam basin. Ain Shams Engineering Journal. 2020; <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.04.012>.
- [16]. Liu Y, Chon J, Pan T. Spatial and temporal patterns of drought hazard for China under different RCP scenarios in the 21st century. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2020.
- دوره زمانی آینده دور و سناریوی RCP8.5 به میزان ۲۳۲/۶ میلی‌متری نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود و به‌طور کلی، افزایش درصد تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در سه دوره آینده نسبت به دوره پایه و تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب برابر است با آینده نزدیک (۶/۳۱، ۷/۰۵، ۷/۱۰)، آینده میانی (۹/۶۹، ۹/۸۴، ۱۱/۸۲) و آینده دور (۸/۱۷، ۱۳/۷۹، ۱۸/۱۵). به بیان دیگر، بیشترین افزایش درصد تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل مربوط به آینده دور و تحت سناریوی RCP8.5 بوده است. افزایش میزان تبخیر و تعرق در دوره‌های آینده در پژوهش‌های محققان دیگری همچون حیدری و خوشخو [۳۵] و جلال کمالی و همکاران [۳۶] نیز به اثبات رسیده است. این مطالعه، یک روش سیستماتیک برای شبیه‌سازی تبخیر و تعرق پتانسیل توزیع‌شده در سیستم‌های بزرگ حوضه را نشان می‌دهد.

#### منابع

- [1]. Dey P, Mishra A. Separating the impacts of climate change and human activities on stream flow: A review of methodologies and critical assumptions. Journal of Hydrology. 2017; 548: 278-90.
- [2]. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge; 2013.
- [3]. Schubert SD, Lim YK. Climate variability and weather extremes: Model-simulated and historical data. In Extremes in a Changing Climate. Netherlands: Springer; 2013 (pp. 239-285).
- [4]. Miao C, Duan Q, Sun Q, Li J. Evaluation and application of Bayesian multi-model estimation in temperature simulations. Progress in physical geography. 2013; 37(6):727-44.
- [5]. Hargreaves GH, Allen RG. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 2003; 129(1):53-63.
- [6]. Vanderlinden K, Giraldez JV, Van Meirvenne M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in southern Spain.

- [17]. Salarian M, Najafi M, Davari K, Eslamiyan SS, Heidari M. The most Appropriate Method to Estimate Potential Evapotranspiration in Meteorological Data Scarce Condition in the Warm and Cold Months of the Year (Case Study of Isfahan). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2012; 1(8):62-73. (In Persian).
- [18]. Ojwang G, Agatsiva J, Situma C. Analysis of climate change and variability risks in the smallholder sector. *Environment and Natural Resources Management working paper*; 2010.
- [19]. Kouhi M, Sanaei- Nejad H. Evaluation of Climate Change Scenarios based on Two Statistical Downscaling Methods for Reference Evapotranspiration in Urmia Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2014; 4(7): 559-574. (In Persian).
- [20]. Chong-Hai XU, Ying X. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 2012; 5(6):527-33.
- [21]. Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 1997; 87(1):55-73.
- [22]. Xu CY, Singh VP. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*. 2002; 16(3):197-219.
- [23]. Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements* FAO irrigation and drainage paper 56, Rome, Italy: FAO; 1998.
- [24]. Hargreaves GH. Moisture availability and crop production. *Trans. ASAE*. 1975; 18 (5): 980-984.
- [25]. Hargreaves GH, Samani ZA. Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Div*. 1982; 108: 225-230.
- [26]. Hargreaves GH, Samani ZA. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric*. 1985; 1: 96-99.
- [27]. Oudin L, Hervieu F, Michel C, Perrin C, Andréassian V, Anctil F, Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*. 2005; 303(1-4):290-306.
- [28]. Thornthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev*. 1948; 38: 55-94.
- [29]. Blaney HF, Criddle WD. *Determining Water Requirements in Irrigated Area from Climatological Irrigation Data*, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Paper; 1950.
- [30]. Pruitt W, Doorenbos J. *Empirical Calibration: A Requisite for Evapotranspiration Formulae Based on Daily or Longer Mean Climate Data?*. The Committee; 1977.
- [31]. Kharrufa N. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beiträge zur Hydrologie*. 1985; 5: 39-47.
- [32]. Romanenko VA. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute*. 1961;3:12-25.
- [33]. Dinpashoh Y. Study of Reference Crop Evapotranspiration in I.R. of Iran. *Agricultural Water Management*, 2003; 84, 123-129. (In Persian).
- [34]. Kouchakzadeh M, Nikbakht J. Comparison of different methods to estimate reference evapotranspiration in Iran different climate with PMFAO Standard Method, *Agricultural Sciences*. 2004;10(3): 43-57.
- [35]. Heydari Tasheh Kaboud Sh, Khoshkhoo T. Projection and prediction of the annual and seasonal future reference evapotranspiration time scales in the West of Iran under RCP emission scenarios, 2019; 19 (53): 157-176.
- [36]. Jalalkamali N, Rajabi M, Naghizade M. Evaluation of Climate Change Effect on Estimation of Reference Evapotranspiration and Comparison with Lysimetric Data (case study, Bardsir plain), 2020; 14 (2): 605-615.