نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال نوزدهم، شماره ۵۳، تابستان ۹۸

تصویرسازی و پیش‌بینی تغییرات آتی تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های فصلی و سالانه در غرب ایران بر اساس سناریوهای انتشار RCP

دریافت مقاله: ۹۶/۱۲/۱۰ **پذیرش نهایی:** ۹۷/۵/۱۵

صفحات: ۱۷۶-۱۵۷

شادیه حیدری تاشه کبود: دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.
Email: shadiheydari21@gmail.com
یونس خوشخو: استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران.[۱]
Email: y.khoshkho@uok.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق، بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه در چند ایستگاه منتخب در غرب ایران است. برای این منظور چهار ایستگاه سینوپتیک سنندج، سقز، خرم آباد و کرمانشاه که واجد آمار کافی در یک دوره طولانی‌مدت بودند انتخاب شدند و اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق مرجع این ایستگاه‌ها تحت دو سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 و در سه دوره زمانی آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ در مقایسه با دوره پایه ۱۹۹۹-۱۹۷۰ مورد بررسی قرار گرفت. جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع از روش فائو- پنمن- مانتیث و برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده تحت سناریوهای اقلیمی از مدل گردش عمومی جو CanESM2 و برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های این مدل از روش SDSM استفاده شد. نتایج نشان داد که در تمامی دوره‌های آتی و تحت تمامی سناریوها و برای کل ایستگاه‌ها، میانگین تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس‌های سالانه و برای فصول پاییز و زمستان در مقایسه با دوره پایه افزایش معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ خواهد داشت. برای فصل بهار، تنها تغییر معنی‌دار در میانگین تبخیر و تعرق مرجع دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه در کل منطقه مورد مطالعه، وجود یک افزایش معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 و برای فصل تابستان نیز این افزایش معنی‌دار برای کل منطقه در دو دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 داشت. نتایج کلی این تحقیق نشان داد که بیشترین نرخ افزایشی تبخیر و تعرق مرجع دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه در تمامی مقیاس‌های فصلی و سالانه و در کل منطقه تحت سناریوی RCP8.5 و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ است. مقایسه نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع بین مقیاس-های مختلف فصلی و سالانه نیز نشان داد که نرخ افزایش تبخیر و تعرق مرجع در غرب ایران در فصول پاییز و زمستان بسیار چشمگیرتر از سایر مقیاس‌های زمانی بوده است.

کلید واژگان: تبخیر و تعرق مرجع، تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی جو، مدل SDSM، غرب ایران.

---

۱. **نویسنده مسئول:** کردستان، سنندج، دانشگاه کردستان، گروه علوم و مهندسی آب ۰۹۱۸۱۷۳۸۱۰

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

مقدمه

محدودیت منابع آب و استفاد بی‌رویه از آن یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکنندهٔ توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی است و این امر سبب مطرح شدن بحث مدیریت منابع آب به عنوان یکی از مباحث مهم در محافل علمی و تخصصی شده است. یکی از روش‌هایی که باعث بهبود مدیریت بهره‌برداری و افزایش راندمان مصرف آب می‌شود برآورد دقیق میزان تبخیر و تعرق است که به مفهوم مقدار آب انتقال یافته از سطح زمین به آتمسفر در اثر تبخیر از سطح آب‌های آزاد، سطح خاک، سطح گیاه و بطور کلی هر سطح دارای رطوبت است (لی[۲] و همکاران، ۲۰۰۹). تبخیر و تعرق بعد از بارش اصلی‌ترین جزء چرخه آب‌شناسی به حساب می‌آید و نقش قابل ملاحظه‌ای در اقلیم‌های جهانی از طریق سیکل هیدرولوژیکی ایفا می‌کند (لیو[۳] و همکاران، ۲۰۱۴) و تخمین آن کاربردهای مهمی در اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی، انجام مطالعات اقلیمی، طراحی کانال‌های آبیاری و ابنیهٔ تقسیم آب، بهبود مصرف و کنترل تلفات آن در بخش کشاورزی، پیش‌بینی عملکرد محصول، طراحی کاربری اراضی و پایش خشکسالی دارد و نیاز آبی گیاهان نیز مستقیماً بر اساس آن مشخص می‌گردد. بطور معمول جهت برآورد تبخیر و تعرق واقعی هر گیاه، ابتدا تبخیر و تعرق گیاه مرجع برآورد می‌شود سپس با محاسبه حاصل‌ضرب آن در ضریب گیاهی، مقدار تبخیر و تعرق واقعی گیاه مورد نظر برآورد می‌گردد (آلن[۴] و همکاران، ۱۹۹۸). تبخیر و تعرق گیاه مرجع به میزان تبخیر و تعرق صورت گرفته از سطحی پوشیده از چمن به ارتفاع ۰/۱۲ متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و آلبیدوی ۰/۲۳ است که سطح وسیعی را بطور کامل و یکنواخت و بدون کمبود آب پوشش داده باشد به گونه‌ای که تبخیر و تعرق بدون هیچ‌گونه محدودیتی در آن صورت گیرد (آلن[۵] و همکاران، ۱۹۹۸) که در حقیقت بیانگر توان تبخیرکنندگی آتمسفر بوده و صرفاً تابع متغیرهای هواشناسی نظیر دما، شدت تابش، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد است. بر این اساس، هر گونه تغییر در متغیرهای اقلیمی مذکور، سبب ایجاد تغییر در میزان تبخیر و تعرق مرجع می‌شود و چنین انتظار می‌رود که در اثر گرمایش جهانی ناشی از انتشار بی‌رویه گازهای گلخانه‌ای، تبخیر و تعرق گیاه مرجع و در پی آن نیاز آبی گیاهان به طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گیرد. بر این اساس، بررسی و ارزیابی تغییرات تبخیر و تعرق گیاه مرجع و نحوه اثرپذیری آن از شرایط تغییر اقلیم احتمالی آتی از اهمیتی اساسی برخوردار است.

پس از وقوع انقلاب صنعتی، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای (شامل بخار آب، دی اکسید کربن، متان و ...) بطور فزاینده‌ای افزایش یافته است و این افزایش در غلظت گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های انسانی با تأثیرگذاری بر روی درجه حرارت آتمسفر کرهٔ زمین، سبب بهم‌خوردن ترازمندی انرژی در سطح جهانی و گرمایش جهانی و وقوع تغییر اقلیم شده است. تغییر اقلیم یک پدیده‌ی پیچیده در مقیاس جهانی است و به مفهوم تغییر در پارامترهای اقلیمی یک منطقه نسبت به رفتار قابل انتظار از اطلاعات مشاهده شده آن منطقه در یک افق زمانی بلندمدت است (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۸:۱۳۹۳). جهت کسب آگاهی در مورد اثرات تغییر اقلیم بطور معمول از

[2] Li
[3] Liu
[4] Allen
[5] Allen

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود. مدل‌های اقلیمی شامل مجموعه معادلاتی هستند که قوانین فیزیکی حاکم بر دستگاه اقلیم را تبیین و با بهره‌گیری از برخی تکنیک‌های ساده‌سازی، به بیان روابط متقابل فرآیندهای پیچیده حاکم بر دستگاه اقلیم می‌پردازند (کمال و مساح بوانی، ۱۳۹۱: ۱۷۷). از بین مدل‌های اقلیمی مختلف ارائه شده، مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) از کاربرد گسترده‌تری برخوردار هستند. این مدل‌ها سه بعدی بوده و قادر به پیش‌بینی تحولات زمانی و مکانی جو می‌باشند (هوردین[۶] و همکاران، ۲۰۰۶) و سامانه اقلیم را بر اساس قوانین ترمودینامیک و با در نظر گرفتن مقیاس‌های زمانی و مکانی خاص برای حل معادلات حاکم در مقیاس قاره‌ای یا جهانی شبیه‌سازی می‌کنند. با توجه به اینکه توان تفکیک مکانی خروجی‌های این مدل‌ها، بسیار بزرگ است برای قابل استفاده کردن این خروجی‌ها نیاز به استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمائی است. تصویرسازی‌ها و پیش‌بینی‌های اقلیم آینده توسط مدل‌های اقلیمی مبتنی بر این است که در آینده چه مقدار گازهای گلخانه‌ای توسط عوامل انسانی وارد آتمسفر زمین خواهد شد و در پی آن چه تغییراتی در سیستم اقلیمی کرۀ زمین به وجود خواهد آمد. بر این اساس برای بررسی این تغییرات سناریوهای مختلفی در ارتباط با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده است. IPCC در گزارش پنجم خود در سال ۲۰۱۰ سناریوهای جدیدی تحت عنوان RCP را بر اساس میزان واداشت تابشی ارائه کرد. این سناریوهای پیشنهادی معرف مسیرهای جدیدی از سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و دارای چهار حالت مختلف شامل RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 هستند (مارنگو[۷] و همکاران، ۲۰۱۴؛ خارین[۸] و همکاران، ۲۰۱۳). به دنبال توسعه سناریوهای RCP برخی محققین به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حوزه‌های مختلف مرتبط با منابع آب بر اساس این سناریوها پرداخته‌اند (دریانگ[۹] و همکاران، ۲۰۱۴؛ باسو[۱۰] و همکاران، ۲۰۱۴). ارزیابی‌های صورت گرفته توسط محققان مختلف حاکی از آن است که وقوع تغییر اقلیم، میزان تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان را دستخوش تغییراتی جدی خواهد کرد و به دنبال آن، مدیریت منابع آب در درازمدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد (گویال[۱۱]، ۲۰۰۴). در این زمینه مطالعات زیادی در داخل و خارج از کشور انجام شده است. از جمله وانگ[۱۲] و همکاران (۲۰۱۳) افزایش تبخیر و تعرق مرجع را در فلات تبت چین برای دهه‌های آتی پیش‌بینی کردند. تائو[۱۳] و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در حوزه رودخانه خیانگ جیانگ چین تحت سناریوهای RCP و با بکارگیری مدل SDSM جهت ریزمقیاس‌نمایی نتیجه گرفتند که در دوره‌های آتی، میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع تحت تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت و نرخ این افزایش، بسته به منطقه و نوع سناریو متفاوت خواهد بود و بیشترین نرخ افزایشی تحت سناریوی RCP8.5 مشاهده شد. ابراهیم پور[۱۴] و همکاران (۲۰۱۴) طی مطالعه‌ای که با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم در ۵

[6] Hourdin
[7] Marengo
[8] Kharin
[9] Deryng
[10] Bassu
[11] Goyal
[12] Wang
[13] Tao
[14] Ebrahimpour

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

ایستگاه سینوپتیک ایران با اقلیم‌های مختلف تحت سناریوهای A2 و B2 انجام دادند نشان دادند که در اکثر ماه‌ها و در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، تبخیر و تعرق مرجع در اقلیم آینده افزایش خواهد داشت و این امر می‌تواند منجر به خشک‌تر شدن شرایط کشور و افزایش مصرف آب در گیاهان و در نهایت بحران آبی در ایران شود. قهرمان و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق پتانسیل در دشت مشهد طی دوره ۲۰۷۰-۲۰۲۱ تحت سناریوهای RCP و با بکارگیری یک مدل دینامیکی جهت ریزمقیاس‌نمایی پرداختند و نتیجه گرفتند که میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه در ماهای گرم سال کاهش و در ماه‌های سرد سال افزایش خواهد یافت.

بطور کلی مطالعات صورت گرفته در ارتباط با اثر تغییر اقلیم بر حوزه‌های مختلف منابع آب از جمله تبخیر و تعرق در مناطق مختلف از ماهیت و شدت متفاوتی برخوردار بوده است و منابع آب و خاک را به شیوه‌های گوناگون تحت تأثیر قرار داده است (دریانگ[15] و همکاران، ۲۰۱۴). لذا ضروری است که در مناطق مختلف، این اثرات به ویژه بر اساس سناریوهای جدید RCP مورد بررسی قرار گیرد. بر این اساس، هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در غرب ایران با بکارگیری مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت دو سناریوی تغییر اقلیم RCP2.6 و RCP8.5 طی دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ است.

روش تحقیق

برای انجام این تحقیق منطقه غرب ایران انتخاب شده است. از بین ایستگاه های موجود در این منطقه چهار ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، سنندج، خرم‌آباد و سقز که دارای آمار نسبتاً طولانی مدت بودند انتخاب شدند. مشخصات جغرافیایی و موقعیت مکانی این ایستگاه‌ها در جدول ۱ و شکل ۱ منعکس شده است. برای این ایستگاه‌ها داده‌های هواشناسی شامل دمای حداکثر، دمای حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد، طول ساعات آفتابی و ابرناکی در مقیاس روزانه در طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۰ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند و از این داده‌ها برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع روزانه با بکارگیری روش فائو- پنمن- مانتیث به شرح رابطه (۱) استفاده شد (آلن[16] و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_O = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)}$$ رابطه (۱)

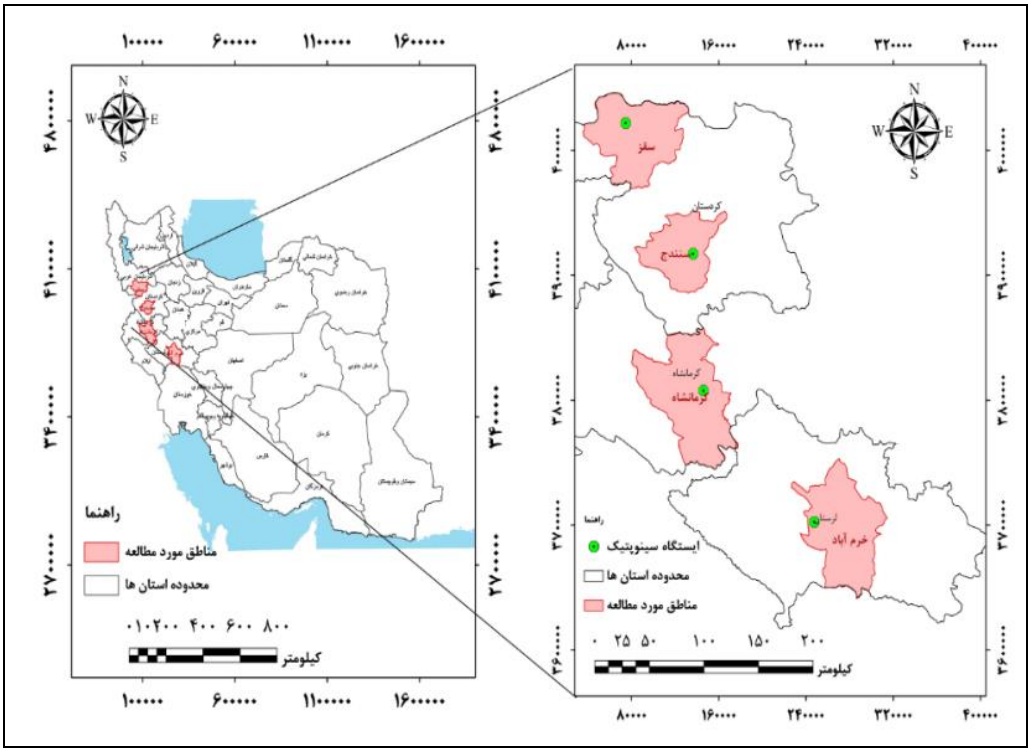
که در آن ET_O تبخیر و تعرق مرجع، R_n تابش خالص، G_s چگالی شار گرمایی خاک، T میانگین دمای هوا، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، e_a و e_s به ترتیب فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع، Δ شیب منحنی فشاربخار در مقابل درجه حرارت و γ ثابت سایکرومتری است. مقادیر روزانه تبخیر و تعرق مرجع برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۵- ۱۹۷۰ با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد و سری‌های فصلی و سالانه تبخیر و تعرق مرجع بر اساس مقادیر روزانه محاسبه شدند و مبنای انجام بررسی‌های بعدی قرار گرفتند.

[15] Deryng
[16] Allen

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

جدول (۱). مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
خرم آباد	۴۸°۱۷'	۳۳°۲۶'	۱۱۴۷
سنندج	۴۷°۰۰'	۳۵°۲۰'	۱۳۷۳
سقز	۴۶°۱۶'	۳۶°۱۵'	۱۵۲۲
کرمانشاه	۴۷°۰۹'	۳۴°۲۱'	۱۳۱۸



شکل (۱). موقعیت مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

جهت بررسی اثر تغییر اقلیم آتی بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه مورد مطالعه از مدل گردش عمومی جو CanESM2 که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیم کانادا (CCCMA) ارائه شده است استفاده شد. داده‌های قابل استخراج از پایگاه داده فوق شامل سری‌های زمانی از مقادیر روزانه استانداردشده داده‌های تاریخچه‌ای و داده‌های بازتحلیل شده NCEP/NCER در بازه زمانی ۲۰۰۵- ۱۹۶۱ و همچنین داده‌های مربوط به شرایط تغییر اقلیم دهه‌های آتی در بازه زمانی ۲۱۰۰- ۲۰۰۶ تحت سناریوهای مختلف انتشار RCP می‌باشد. داده‌های این پایگاه شامل ۲۶ متغیر اقلیمی روزانه بزرگ مقیاس شامل متغیرهای (میانگین فشار سطح دریا، سرعت باد ژئوستروفیک، مؤلفه سرعت مداری، مؤلفه سرعت نصف‌النهاری، تاوایی، واگرایی، رطوبت ویژه، میانگین دما، رطوبت نسبی، جهت باد) در نزدیک سطح زمین، متغیرهای (سرعت باد ژئوستروفیک، مؤلفه سرعت مداری، مؤلفه سرعت تصف‌النهاری، تاوایی، ارتفاع ژئوپتانسیل، جهت باد، واگرایی، رطوبت نسبی) در تراز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

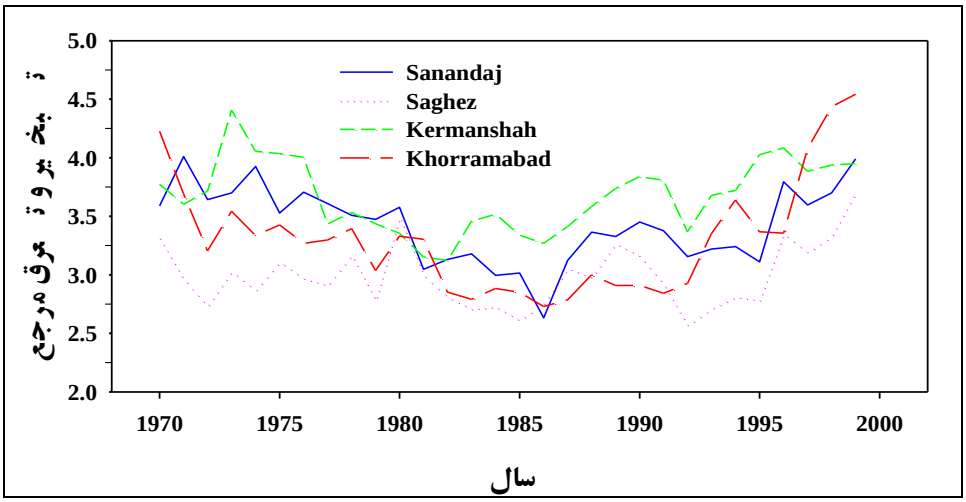
۵۰۰ هکتوپاسکال و متغیرهای (سرعت باد ژئوستروفیک، مؤلفه سرعت مداری، مؤلفه سرعت نصف‌النهاری، تاوایی، ارتفاع ژئوپتانسیل، جهت باد، واگرایی، رطوبت نسبی) در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال هستند. با توجه به اینکه این داده‌ها بصورت بزرگ مقیاس در دسترس هستند بر اساس طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه، پس از شناسایی سلول دربرگیرنده برای هر ایستگاه، داده‌های ۲۶ متغیر فوق در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۷۰ برای سلول‌های مربوطه استخراج شدند و جهت ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها از مدل SDSM که یک مدل آماری مبتنی بر یافتن یک رابطه رگرسیونی بین متغیرهای پیش‌بینی شونده (در این تحقیق تبخیر و تعرق مرجع) و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (۲۶ متغیر جوی بزرگ مقیاس حاصل از داده‌های بازکاوی شده NCEP) استوار است بهره گرفته شد. بازه زمانی ۱۹۹۹- ۱۹۷۰ جهت واسنجی مدل و بازه زمانی ۲۰۰۵- ۲۰۰۰ جهت اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شد. در صورت معتبر بودن مدل در مرحله اعتبارسنجی، با تعمیم این مدل به شرایط اقلیم آینده می‌توان بر اساس متغیرهای بزرگ مقیاس حاصل از برونداد مدل‌های گردش عمومی جو تحت شرایط تغییر اقلیم آینده که با در نظر گرفتن سناریوهای انتشار حاصل آمده‌اند نحوه تغییرات متغیر پیش‌شونده (در این تحقیق تبخیر و تعرق مرجع) تحت شرایط اقلیمی آینده را مورد تصویرسازی و پیش‌بینی قرار داد.

مدل SDSM بر پایه داده‌های روزانه بنا نهاده شده است و در این تحقیق، از این مدل در شش مرحلهٔ کلی شامل کنترل کیفی داده‌ها و اختصاص دادن بخشی از داده‌ها برای انجام واسنجی (دوره ۱۹۹۹-۱۹۷۰) و بخشی دیگر برای انجام اعتبارسنجی مدل (دوره ۲۰۰۵ - ۲۰۰۰)، انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مناسب از بین کل ۲۶ متغیر موجود حاصل از داده‌های بازکاوی شده NCEP و دارای همبستگی بالا با متغیر پیش-بینی شونده (تبخیر و تعرق مرجع)، ساخت و واسنجی مدل رگرسیون چندگانه خطی بر اساس متغیرهای پیش‌بینی شونده انتخاب شده در مرحله قبل، استفاده از مدل واسنجی‌شده در مرحله قبل جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع در بازه اعتبارسنجی مدل و سنجش میزان عملکرد مدل بر اساس چند شاخص‌های آماری، تولید داده‌های روزانه تبخیر و تعرق مرجع در دهه‌های آتی تحت سناریوهای انتشار RCP2.6 و RCP8.5 و در نهایت تجزیه و تحلیل نتایج و تصویرسازی تبخیر و تعرق مرجع تحت شرایط تغییر اقلیم در دهه‌های آتی (شامل ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱) و مقایسه آن با دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) جهت ریزمقیاس‌نمایی مقادیر تبخیر و تعرق مرجع روزانه تحت شرایط تغییر اقلیم آتی برای تک‌تک ایستگاه‌های مورد مطالعه به تفکیک استفاده شد:

نتایج

در شکل(۲) مقادیر میانگین تبخیر و تعرق مرجع سالانه محاسبه شده به روش فائو- پنمن- مانتیث (رابطه ۱) در دوره پایه (بازه زمانی ۱۹۹۹-۱۹۷۰) برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه (سنندج، سقز، خرم‌آباد و کرمانشاه) نشان داده شده است. جهت استخراج میانگین تبخیر و تعرق مرجع در یک سال خاص، ابتدا مقادیر تبخیر و تعرق مرجع روزانه در آن سال محاسبه شدند سپس از این مقادیر روزانه میانگین‌گیری شد. دیده می-شود که در مجموع می‌توان گفت که ایستگاه‌های سقز و کرمانشاه به ترتیب کمترین و بیشترین مقادیر تبخیر و تعرق و تعرق مرجع را دارا هستند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]



شکل (۲). مقادیر تبخیر و تعرق گیاه مرجع سالانه بر حسب میلیمتر برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در بازه زمانی ۱۹۹۹-۱۹۷۰

جهت واسنجی مدل SDSM در دوره پایه ۱۹۹۹-۱۹۷۰و بکارگیری آن برای تصویرسازی مقادیر تبخیر و تعرق مرجع این ایستگاه‌ها در دوره‌های آتی (۲۱۰۰-۲۰۷۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱، ۲۰۴۰-۲۰۱۱) تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5، از بین ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس حاصل از داده‌های بازکاوی شده NCEP/NCAR، برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه چند متغیر توسط مدل بعنوان متغیرهای پیش-بینی‌کننده مؤثر شناسایی شدند که لیست این متغیرها همراه با ضریب تعیین مربوط به معادله رگرسیون خطی چندگانه آنها برای تک تک ایستگاه‌های مورد مطالعه به تفکیک در جدول(۲) منعکس شده است. دیده می‌شود که ضریب تعیین بدست آمده برای ایستگاه‌های سنندج، سقز، خرم‌آباد و کرمانشاه نیز به ترتیب ۰/۷۲، ۰/۷۳، ۰/۶ و ۰/۷۸ بدست آمده است که بیانگر درجه قوت مناسب مدل رگرسیونی بین این متغیرهای پیش‌بینی کننده با تبخیر و تعرق مرجع است.

نتایج حاصل از اعتبارسنجی مدل که در دوره ۲۰۰۵- ۲۰۰۰ و با بکارگیری دو شاخص ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NSE) انجام شد در جدول(۳) منعکس شده است و دیده می‌شود که از لحاظ هر دو شاخص بکار گرفته‌شده، مدل از درجه اعتبار بالا و مناسبی برای کلیه ایستگاه‌های مورد مطالعه برخوردار بوده است جدول (۲).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

جدول (۲). متغیرهای پیش بینی کننده مؤثر انتخاب شده توسط مدل SDSM در مرحله واسنجی مدل

ایستگاه	متغیرهای بزرگ مقیاس پیش بینی کننده مؤثر و دارای همبستگی قوی با تبخیر و تعرق مرجع	ضریب تعیین در مرحله واسنجی
سنندج	میانگین فشار سطح دریا در نزدیک سطح، میانگین دما در نزدیک سطح، رطوبت نسبی در نزدیک سطح، جهت باد در نزدیک سطح، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، مؤلفه سرعت تصف‌النهاری در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال	۰/۷۲
سقز	مؤلفه سرعت نصف‌النهاری در نزدیک سطح، رطوبت ویژه در نزدیک سطح، جهت باد در نزدیک سطح	۰/۷۳
کرمانشاه	میانگین فشار سطح دریا در نزدیک سطح، رطوبت ویژه در نزدیک سطح، میانگین دما در نزدیک سطح، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال	۰/۷۸
خرم آباد	مؤلفه سرعت نصف النهاری نزدیک سطح، جهت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال، رطوبت ویژه در نزدیکی سطح، میانگین دما در ارتفاع ۲ متری، جهت باد در نزدیک سطح	۰/۶

جدول (۳). نتایج اعتبارسنجی مدل SDSM در ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های R^2 و NSE

شاخص	سنندج	سقز	کرمانشاه	خرم آباد
R^2	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۷۶
NSE	۰/۷۶	۰/۴۸	۰/۸۱	۰/۶۱

بر اساس مقادیر روزانه ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس حاصل از داده‌های بازکاوی شده NCEP/NCAR تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم برای دوره‌های آتی (تا سال ۲۱۰۰) توسط مدل گردش عمومی جو CanESM2 و با پذیرش فرض قابل تعمیم بودن روابط حاصله در دوره پایه برای دوره‌های آتی، مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های آتی، برآورد و با دوره پایه مورد مقایسه قرار گرفتند.

جهت انجام این مقایسه، از آزمون مقایسه میانگین t-استودنت در سطح معنی‌دار $\alpha = 0.01$ استفاده شد. برای محاسبه نرخ تغییرات (β) میانگین تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱، ۲۱۰۰-۲۰۷۱) در مقایسه با میانگین تبخیر و تعرق مرجع در دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) نیز تفاضل بین تبخیر و تعرق مرجع دوره آتی از تبخیر و تعرق مرجع دوره پایه محاسبه و بر تبخیر و تعرق مرجع دوره پایه تقسیم شد. نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین در جدول(۳) برای مقیاس سالانه و جدول (۴) برای مقیاس فصلی و نتایج حاصل از محاسبه نرخ تغییرات (β) در جدول(۵) برای مقیاس سالانه و جدول(۶) برای مقیاس فصلی برای سه دوره آتی تحت دو سناریوی مختلف و برای چهار ایستگاه مورد مطالعه به تفکیک نشان داده شده است. در ادامه نتایج حاصله برای مقیاس‌های سالانه و فصلی به تفکیک ارائه می‌شود.

نتایج حاصل از تصویرسازی آتی میانگین تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس سالانه

بر اساس جداول(۴و ۵) دیده می‌شود که برای تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس سالانه مقدار P-value در تمامی حالات شامل هر دو سناریوی انتشار، هر سه دوره آتی و برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۱ بوده و مقدار β نیز یک عدد مثبت بدست آمده است که به ترتیب حاکی از معنی‌دار بودن تفاوت میانگین تبخیر و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

تعرق مرجع سالانه در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه در سطح معنی‌دار ۰/۰۱و افزایشی بودن نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع سالانه در هر سه دوره آتی برای تمامی سناریوها در مقایسه با دوره پایه در کل منطقه مورد مطالعه است. همچنین برای تمامی سناریوها و ایستگاه‌ها، میانگین تبخیر و تعرق مرجع سالانه در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ بیشتر از دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ و در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ بیشتر از هر دو دوره قبلی بوده است. بر این اساس پیش‌بینی می‌شود که در دوره‌های آتی دورتر، میانگین تبخیر و تعرق مرجع سالانه نرخ افزایشی بیشتری از خود نشان دهد. به لحاظ نحوه اثرگذاری سناریوهای مختلف بر میانگین تبخیر و تعرق سالانه نیز یا نگاهی به جدول(۵) دیده می‌شود که در دوره زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تفاوت چشمگیری بین نرخ افزایشی تبخیر و تعرق مرجع سالانه تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به چشم نمی‌خورد و تغییرپذیری میانگین تبخیر و تعرق مرجع در این دوره نسبت به دوره پایه برای هر دو سناریو در اکثر موارد نزدیک به هم بوده است اما این تفاوت در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ بیشتر شده و در دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۱ به حداکثر مقدار خود رسیده است. بطور کلی در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین مقدار β در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 و کمترین مقدار آن در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تحت سناریوی RCP2.6 رخ داده است جداول (۴ و ۵).

جدول (۴). مقادیر آماره آزمون t- استودنت و P-Value حاصل از آزمون مقایسه میانگین تبخیر و تعرق مرجع سالانه در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) برای سناریوها و ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	سناریوی انتشار	۲۰۴۰-۲۰۱۱		۲۰۷۰-۲۰۴۱		۲۱۰۰-۲۰۷۱	
		آماره t	P-value	آماره t	P-value	آماره t	P-value
سنندج	Rcp2.6	۴/۹۳	۰/۰۰۰	۶/۰۷	۰/۰۰۰	۶/۶۱	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	۴/۸۷	۰/۰۰۰	۹/۵۱	۰/۰۰۰	۱۳/۲۴	۰/۰۰۰
سقز	Rcp2.6	۵/۳۴	۰/۰۰۰	۵/۶۶	۰/۰۰۰	۶/۵۲	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	۴/۳۲	۰/۰۰۰	۱۰/۱۱	۰/۰۰۰	۱۵/۲۲	۰/۰۰۰
کرمانشاه	Rcp2.6	۴/۶۶	۰/۰۰۰	۴/۶۸	۰/۰۰۰	۵/۳۴	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	۳/۷	**۰/۰۰۱**	۹/۴۷	۰/۰۰۰	۱۵/۹۹	۰/۰۰۰
خرم آباد	Rcp2.6	۳/۰۶	**۰/۰۰۵**	۳/۷۶	**۰/۰۰۱**	۳/۵۵	**۰/۰۰۱**
	Rcp8.5	۲/۹۰	**۰/۰۰۷**	۶/۳۷	۰/۰۰۰	۱۰/۶۹	۰/۰۰۰

-مقادیر P-value کوچکتر از ۰/۰۱ (نشان داده شده با فونت برجسته) بیانگر معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۱ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

جدول (۵). نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع (β) در مقیاس سالانه در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه‌های مورد مطالعه

ایستگاه	سناریوی انتشار	۲۰۱۱-۲۰۴۰	۲۰۴۱-۲۰۷۰	۲۰۷۱-۲۱۰۰
سنندج	Rcp2.6	۹/۶	۱۱/۴	۱۱/۶
	Rcp8.5	۹/۳	۱۸/۱	۲۷/۸
سقز	Rcp2.6	۸/۳	۹/۶	۱۰/۳
	Rcp8.5	۷/۶	۱۷/۷	۲۷/۷
کرمانشاه	Rcp2.6	۷/۳	۸/۱	۸/۴
	Rcp8.5	۵/۹	۱۴/۷	۲۳/۹
خرم آباد	Rcp2.6	۸/۴	۱۱/۲	۱۰/۳
	Rcp8.5	۸/۱	۱۷/۵	۲۸/۱

نتایج حاصل از تصویرسازی آتی میانگین تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس فصلی

جدول(۶) نتایج حاصل از آزمون مقایسه میانگین و جدول(۷) نرخ تغییرات (β) میانگین تبخیر و تعرق مرجع برای چهار فصل سال را در مقایسه با دوره پایه در سه دوره آتی تحت دو سناریوی RCP در چهار ایستگاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصله، میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل بهار تحت سناریوی RCP2.6 در هیچ کدام از دوره‌های آتی و در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقایسه با دوره پایه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار نبوده است و مقدار P-value برای کلیه این حالات، عددی بزرگتر از ۰/۰۱ بوده است. در ارتباط با سناریوی RCP8.5 نیز به استثنای دوره ۲۱۰-۲۰۷۱ که در این دوره میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل بهار در کل ایستگاه‌ها در مقایسه با دوره پایه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار بوده و دارای یک نرخ افزایشی (β>۰) بوده است در دو دوره آتی دیگر (۲۰۴۰-۲۰۱۱ و ۲۰۷۰-۲۰۴۱)، علیرغم کاهشی بودن نرخ تغییرات میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل بهار در برخی حالات و افزایشی بودن آن در برخی حالات دیگر، مقدار P-value در این دو دوره عددی بزرگتر از ۰/۰۱ و لذا در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار نبوده است. بر این اساس می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که تنها تغییر معنی‌دار در میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل بهار در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه، وجود یک نرخ افزایشی طی دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 برای کل منطقه مورد مطالعه است. به لحاظ نحوه اثرگذاری سناریوهای مختلف بر میزان تبخیر و تعرق مرجع فصل بهار در دوره‌های آتی نیز، در کل ایستگاه‌های مورد مطالعه بیشترین تفاوت بین دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ رخ داده است و در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱ و ۲۰۷۰-۲۰۴۱ این تفاوت‌ها چندان قابل توجه نبوده است.

در ارتباط با نحوه اثرپذیری میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان از شرایط تغییر اقلیم احتمالی آتی، دو ایستگاه سنندج و کرمانشاه (که میانگین تبخیر و تعرق مرجع آنها در دوره پایه بر اساس شکل(۲) بیشتر از دو ایستگاه دیگر بوده است) دارای رفتاری مشابه و دو ایستگاه سقز و خرم‌آباد نیز رفتار مشابهی داشته‌اند. به این ترتیب که برای دو ایستگاه سنندج و کرمانشاه، در هر سه دوره آتی و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5، میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان در مقایسه با دوره پایه، تفاوتی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

همراه با یک نرخ افزایشی ($\beta>0$) داشته است اما برای دو ایستگاه سقز و خرم آباد، تحت سناریوی RCP2.6، علیرغم افزایشی بودن نرخ تغییرات میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان در مقایسه با دوره پایه، در هر سه دوره آتی مقدار P-value بیشتر از ۰/۰۱ و در نتیجه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار نبوده است. در ارتباط با سناریوی RCP8.5 نیز نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان در هر سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه یک نرخ افزایشی ($\beta>0$) از خود نشان داده است اما مقدار P-value در دو دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ کمتر از ۰/۰۱ (تفاوت معنی‌دار) و در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ بیشتر از ۰/۰۱ (تفاوت غیر معنی‌دار) بوده است. بر این اساس چنین نتیجه گیری می‌شود که ضمن افزایشی بودن نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان در هر سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه تحت هر دو سناریوی RCP و برای کل ایستگاه‌ها این نرخ افزایشی برای دو ایستگاه سقز و سنندج، در تمامی حالات و برای دو ایستگاه خرم آباد و سقز، فقط تحت سناریویRCP8.5 در دو دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ معنی‌دار بوده است. به لحاظ نحوه اثرگذاری سناریوهای مختلف بر میزان تبخیر و تعرق مرجع فصل تابستان در دوره‌های آتی نیز، بیشترین تفاوت بین دو سناریوی مختلف RCP در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ رخ داده و در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ نیز در مقایسه با دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ بیشتر بوده است جدول (۸).

در ارتباط با میانگین تبخیر و تعرق مرجع در فصول پاییز و زمستان نیز، با مراجعه به جداول (۶ و ۷) دیده می‌شود که مقدار P-value برای میانگین تبخیر و تعرق مرجع هر دو فصل پاییز و زمستان تحت هر دو سناریوی انتشار و در هر سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از ۰/۰۱ و دارای یک نرخ افزایشی ($\beta>0$) بوده است که حاکی از معنی‌دار بودن تفاوت میانگین تبخیر و تعرق مرجع فصول پاییز و زمستان در تمامی حالات در مقایسه با دوره پایه در سطح معنی‌دار ۰/۰۱ و همچنین افزایشی بودن نرخ تغییرات آن در تمامی حالات در کل منطقه مورد مطالعه است. بیشترین نرخ افزایشی میانگین تبخیر و تعرق مرجع در هر دو فصل پاییز و زمستان برای کل منطقه مورد مطالعه از بین انواع سناریوها و دوره‌های آتی، در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ و تحت سناریوی RCP8.5 رخ داده است. با مقایسه مقادیر نرخ افزایشی β مربوط به فصول مختلف در جدول ۷ دیده می‌شود که بیشترین نرخ افزایشی میانگین تبخیر و تعرق مرجع دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه، در فصل پاییز رخ داده است و این نرخ در فصول پاییز و زمستان در مقایسه با فصول بهار و تابستان بسیار بیشتر و چشمگیرتر بوده است. به لحاظ نحوه اثرگذاری سناریوهای مختلف بر میزان تبخیر و تعرق مرجع فصول پاییز و زمستان در دوره‌های آتی نیز، بیشترین تفاوت بین دو سناریوی مختلف RCP در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ رخ داده و در دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ نیز در مقایسه با دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ بیشتر بوده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

جدول (۶). مقادیر آماره آزمون t و P-Value حاصل از آزمون مقایسه میانگین تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) برای فصول، سناریوها و ایستگاه‌های مختلف

ایستگاه	سناریو	فصل	۲۰۴۰-۲۰۱۱		۲۰۷۰-۲۰۴۱		۲۱۰۰-۲۰۷۱	
			آماره t	P-value	آماره t	P-value	آماره t	P-value
سنندج	Rcp2.6	بهار	-۰/۶	۰/۵۵۴	-۰/۰۸	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۳۷
		تابستان	۳/۱۳	**۰/۰۰۴**	۳/۵۶	**۰/۰۰۱**	۳/۳۰	**۰/۰۰۳**
		پاییز	۹/۸۹	۰/۰۰۰	۱۱/۳۴	۰/۰۰۰	۱۱/۷۷	۰/۰۰۰
		زمستان	۵/۰۳	۰/۰۰۰	۷/۳۶	۰/۰۰۰	۷/۴۶	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	بهار	-۰/۷۱	۰/۴۸۱	۰/۹۴	۰/۳۵۴	۵/۲۸	۰/۰۰۰
		تابستان	۳	**۰/۰۰۵**	۵/۵۹	۰/۰۰۰	۷/۹۵	۰/۰۰۰
		پاییز	۹/۸۹	۰/۰۰۰	۱۴/۲۸	۰/۰۰۰	۱۸/۶۱	۰/۰۰۰
		زمستان	۵/۲۰	۰/۰۰۰	۱۴/۲	۰/۰۰۰	۲۰/۹۲	۰/۰۰۰
سقز		بهار	-۱/۵۹	۰/۱۲۲	-۰/۷۳	۰/۴۷۴	-۰/۰۱	۰/۹۸۹
		تابستان	۱/۸۱	۰/۰۸	۲/۲۶	۰/۰۳۲	۱/۷	۰/۱
	Rcp2.6	پاییز	۱۲/۵۷	۰/۰۰۰	۱۱/۳۶	۰/۰۰۰	۱۶/۰۴	۰/۰۰۰
		زمستان	۵/۶۷	۰/۰۰۰	۷/۳	۰/۰۰۰	۹/۳۱	۰/۰۰۰
		بهار	-۱/۸۴	۰/۰۷۷	۰/۵۸	۰/۵۶۵	۴/۴۲	۰/۰۰۰
		تابستان	۱/۴۲	۰/۱۶۶	۵/۷	۰/۰۰۰	۹/۱	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	پاییز	۱۱/۶۵	۰/۰۰۰	۱۸/۱	۰/۰۰۰	۲۳/۳۵	۰/۰۰۰
		زمستان	۵/۹۴	۰/۰۰۰	۱۳/۸۳	۰/۰۰۰	۲۲/۵۹	۰/۰۰۰
کرمانشاه		بهار	-۱	۰/۳۲۷	-۰/۴۴	۰/۶۶۵	۰/۰۴	۰/۹۷۱
		تابستان	۳/۵۱	**۰/۰۰۱**	۴/۰۳	۰/۰۰۰	۳/۳۶	**۰/۰۰۲**
	Rcp2.6	پاییز	۹/۵۱	۰/۰۰۰	۱۰/۳۷	۰/۰۰۰	۱۰/۰۲	۰/۰۰۰
		زمستان	۳/۳۹	**۰/۰۰۲**	۴/۱۴	۰/۰۰۰	۵/۵۱	۰/۰۰۰
		بهار	-۱/۴۹	۰/۱۴۸	۰/۷۴	۰/۴۶۸	۵/۸۷	۰/۰۰۰
		تابستان	۲/۹۷	**۰/۰۰۶**	۶/۰۵	۰/۰۰۰	۹/۵۸	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	پاییز	۸/۰۱	۰/۰۰۰	۱۴/۷۱	۰/۰۰۰	۲۰/۴۹	۰/۰۰۰
		زمستان	۳/۸۱	**۰/۰۰۱**	۱۱/۲۹	۰/۰۰۰	۱۸/۱۵	۰/۰۰۰
خرم آباد	Rcp2.6	بهار	-۱/۴۲	۰/۱۶۵	-۰/۷۶	۰/۴۵۵	-۰/۶۶	۰/۵۱۵
		تابستان	۰/۳۸	۰/۷۰۷	۰/۸۷	۰/۳۹۳	۰/۶۷	۰/۵۰۸
		پاییز	۱۱/۸۶	۰/۰۰۰	۱۱/۱۱	۰/۰۰۰	۱۰/۹۶	۰/۰۰۰
		زمستان	۷/۷۹	۰/۰۰۰	۹/۲۴	۰/۰۰۰	۱۰/۷۷	۰/۰۰۰
	Rcp8.5	بهار	-۱/۵۰	۰/۱۴۴	-۰/۱۵	۰/۸۸۵	۳	**۰/۰۰۶**
		تابستان	۰/۲	۰/۸۴۲	۲/۸۴	**۰/۰۰۸**	۵/۷۶	۰/۰۰۰
		پاییز	۹/۴۳	۰/۰۰۰	۱۴/۴۱	۰/۰۰۰	۲۳/۲۷	۰/۰۰۰
		زمستان	۸/۵۸	۰/۰۰۰	۱۳/۲۸	۰/۰۰۰	۱۹/۵۵	۰/۰۰۰

-مقادیر P-value کوچکتر از ۰/۰۱ (نشان داده شده با فونت برجسته) بیانگر معنی‌دار بودن در سطح ۰/۰۱ است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

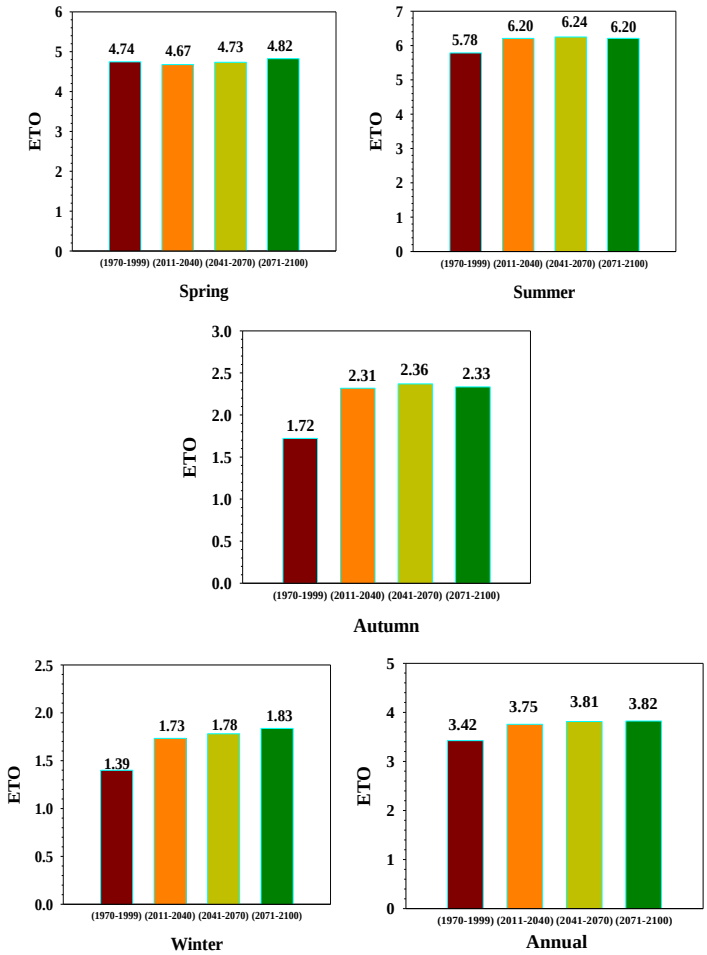
جدول (۷). نرخ تغییرات تبخیر و تعرق مرجع (β) برای فصول، سناریوها و ایستگاه‌های مختلف در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰)

ایستگاه	سناریوی انتشار	فصل	۲۰۴۰-۲۰۱۱	۲۰۷۰-۲۰۴۱	۲۱۰۰-۲۰۷۱
سنندج	Rcp2.6	بهار	-۱/۴۷	-۰/۲۱	۱/۶۸
		تابستان	۷/۲۶	۷/۹۵	۷/۲۶
		پاییز	۳۴/۳۰	۳۷/۲۰	۳۵/۴۶
		زمستان	۲۴/۴۶	۲۸/۰۵	۳۱/۶۵
	Rcp8.5	بهار	-۱/۸۹	۳/۷۹	۱۱/۶۰
		تابستان	۶/۵۷	۱۳/۳۲	۱۹/۵۵
		پاییز	۳۳/۷۲	۴۷/۶۷	۶۶/۸۶
		زمستان	۲۴/۴۶	۴۴/۶۰	۶۶/۱۸
سقز		بهار	-۳/۳۴	-۲/۶۲	۰
		تابستان	۲/۹۵	۳/۷۴	۲/۹۵
	Rcp2.6	پاییز	۴۲/۱۷	۴۴/۲۱	۴۲/۱۷
		زمستان	۲۹/۳۱	۳۳/۶۲	۲۹/۳۷
		بهار	-۴/۷۷	۲/۳۸	۱۰/۵۰
		تابستان	۲/۵۵	۹/۴۴	۱۶/۳۳
	Rcp8.5	پاییز	۴۱/۴۹	۵۷/۱۴	۷۶/۸۷
		زمستان	۳۱/۸۹	۵۵/۱۷	۷۹/۳۱
کرمانشاه		بهار	-۲/۰۱	-۱/۸۱	۰
		تابستان	۶/۴۳	۷/۳۹	۶/۴۳
	Rcp2.6	پاییز	۲۷/۵۱	۲۸/۵۷	۲۸/۰۴
		زمستان	۱۳/۵۴	۱۴/۱۹	۱۸/۰۶
		بهار	-۴/۰۲	۲/۸۱	۱۰/۴۶
		تابستان	۵/۳۰	۱۱/۴۱	۱۷/۳۶
	Rcp8.5	پاییز	۲۶/۴۵	۴۰/۷۴	۶۱/۳۷
		زمستان	۱۲/۹۰	۲۹/۰۳	۴۷/۰۹
خرم آباد	Rcp2.6	بهار	-۴/۸۱	-۳/۷۱	-۱/۹۶
		تابستان	۱/۱۲	۲/۸۰	۲/۲۴
		پاییز	۴۳/۶۰	۴۹/۴۱	۴۵/۳۴
		زمستان	۲۸/۸۴	۳۲/۶۹	۳۳/۳۳
	Rcp8.5	بهار	-۵/۲۵	-۰/۶۵	۸/۳۱
		تابستان	۰/۵۶	۸/۲۳	۱۶/۶۶
		پاییز	۴۳/۰۲	۶۲/۲۰	۸۳/۷۲
		زمستان	۲۸/۸۴	۴۴/۲۳	۶۰/۸۹

به جهت نمایش بهتر و ملموس‌تر نتایج حاصله، در شکل‌های ۳ تا ۱۰ میانگین تبخیر و تعرق مرجع در دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) و میانگین تبخیر و تعرق مرجع سه دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱) در مقیاس‌های زمانی فصلی و سالانه تحت سناریوهای مختلف برای چهار ایستگاه مورد مطالعه نشان داده شده است. به استثنای فصل بهار در دوره ۲۰۴۰- ۲۰۱۱ (که در آن در تمامی سناریوها میانگین تبخیر و

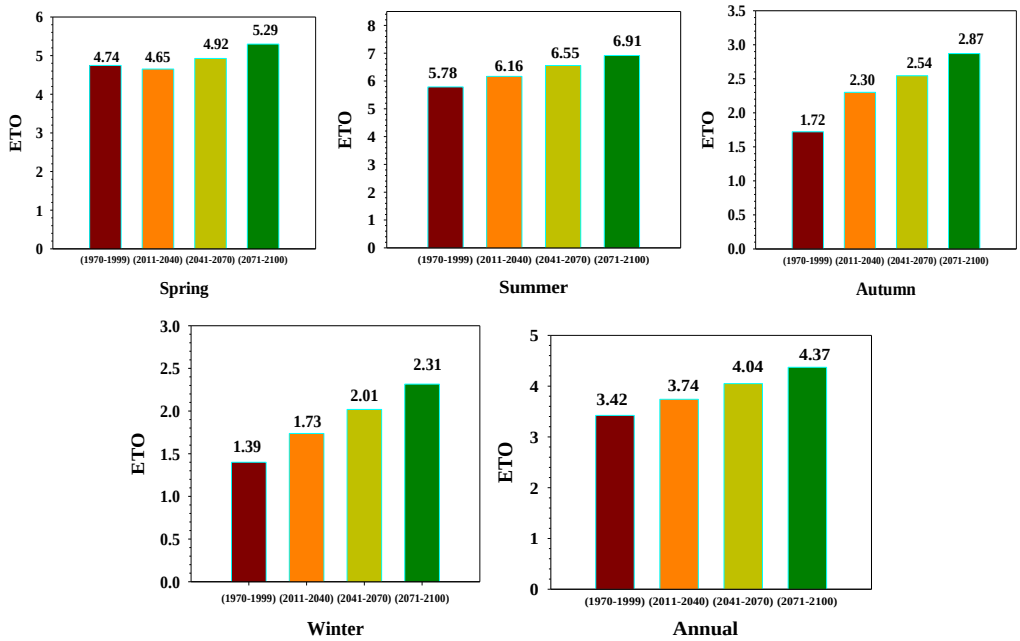
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

تعرق مرجع در مقایسه با دوره پایه به میزان کمی کاهش یافته است) میانگین تبخیر و تعرق مرجع در سایر دوره‌های آتی تحت تمامی سناریوها در کل ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقایسه با دوره پایه افزایش یافته است و دیده می‌شود که بیشترین میزان افزایش در تمامی سری‌های فصلی و سالانه در کل ایستگاه‌ها، در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ و تحت سناریوی RCP8.5 روی داده است.

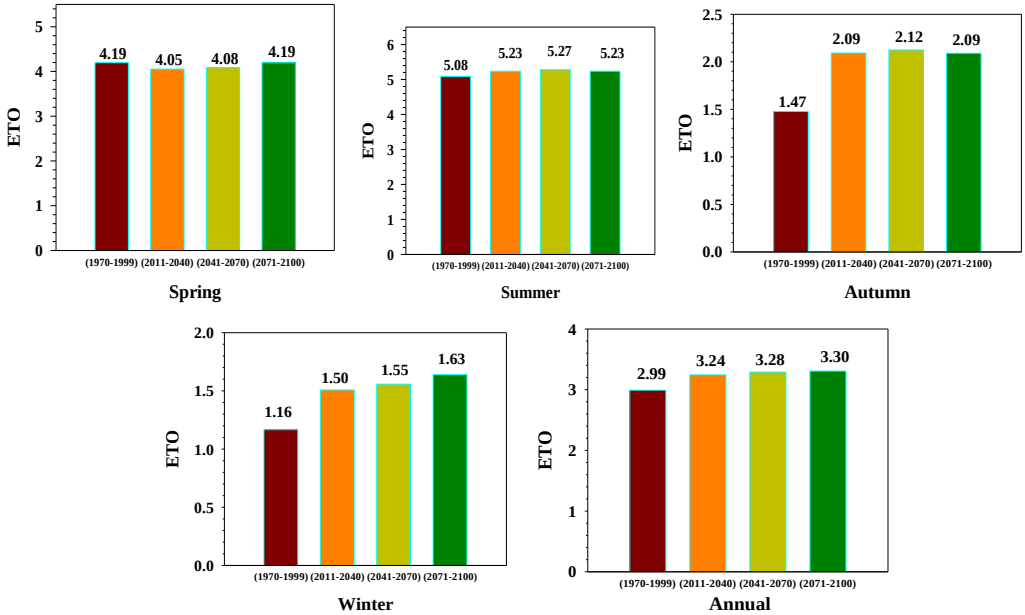


شکل (۳). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP2.6 در ایستگاه سنندج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

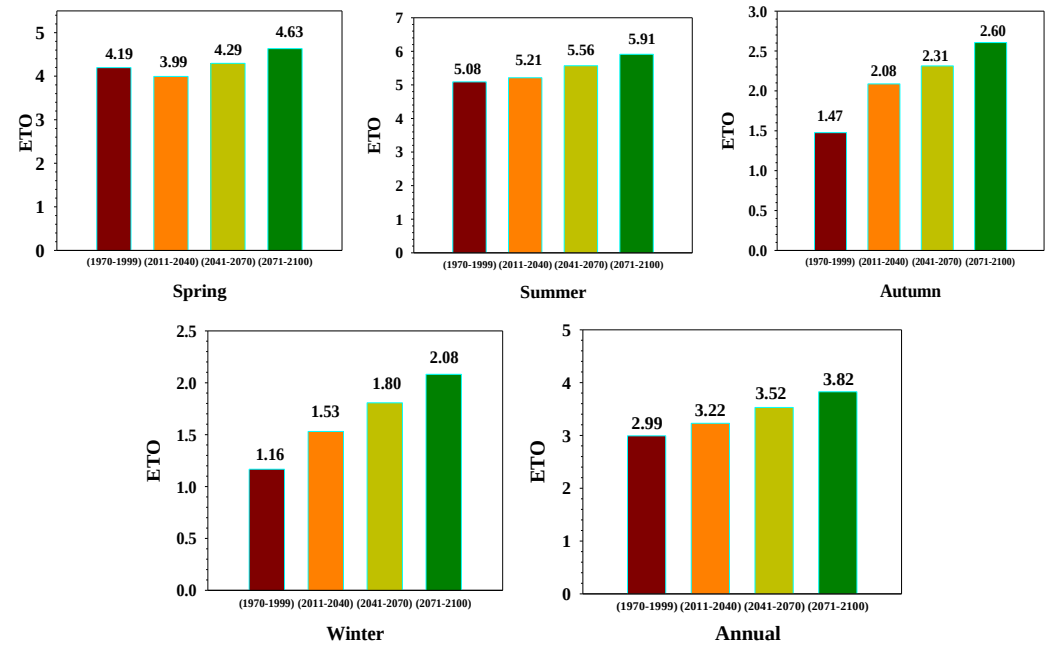


شکل (۴). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP8.5 در ایستگاه سنندج

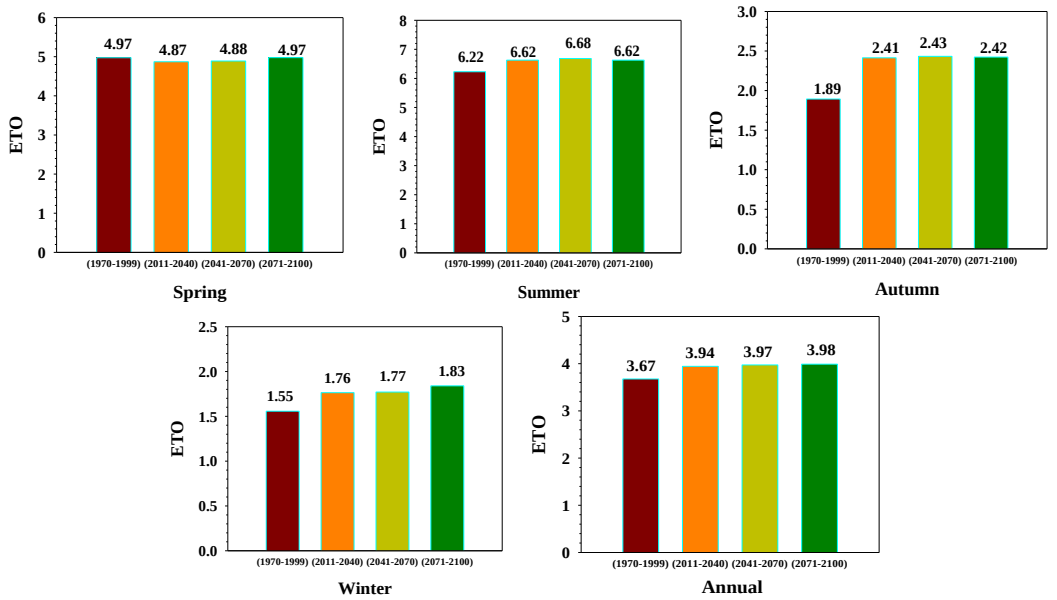


شکل (۵). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP2.6 در ایستگاه سقز

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

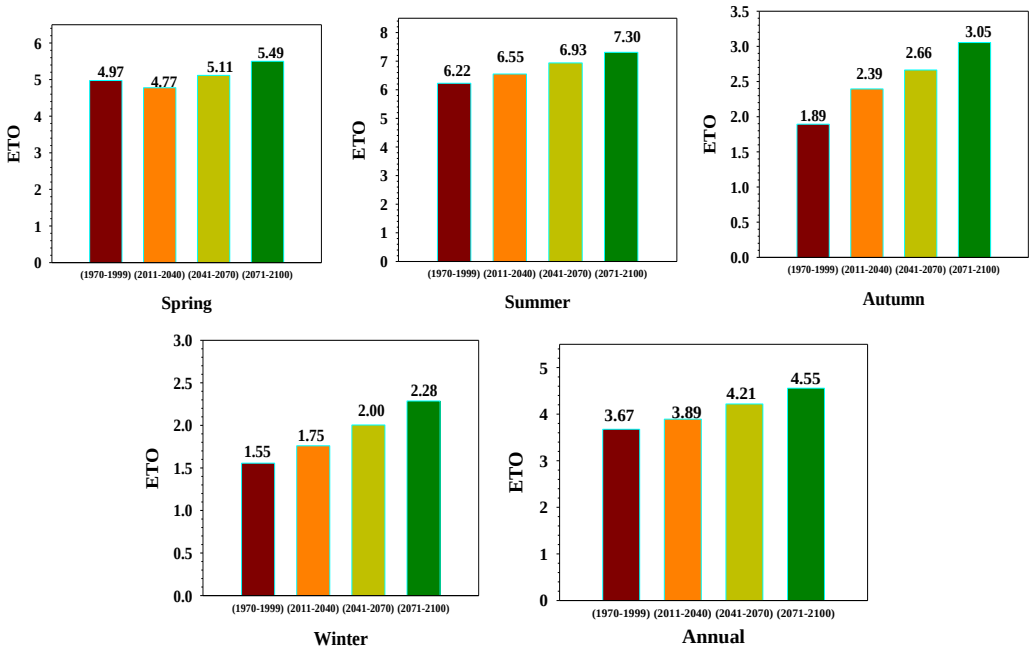


شکل (۶). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP8.5 در ایستگاه سقز

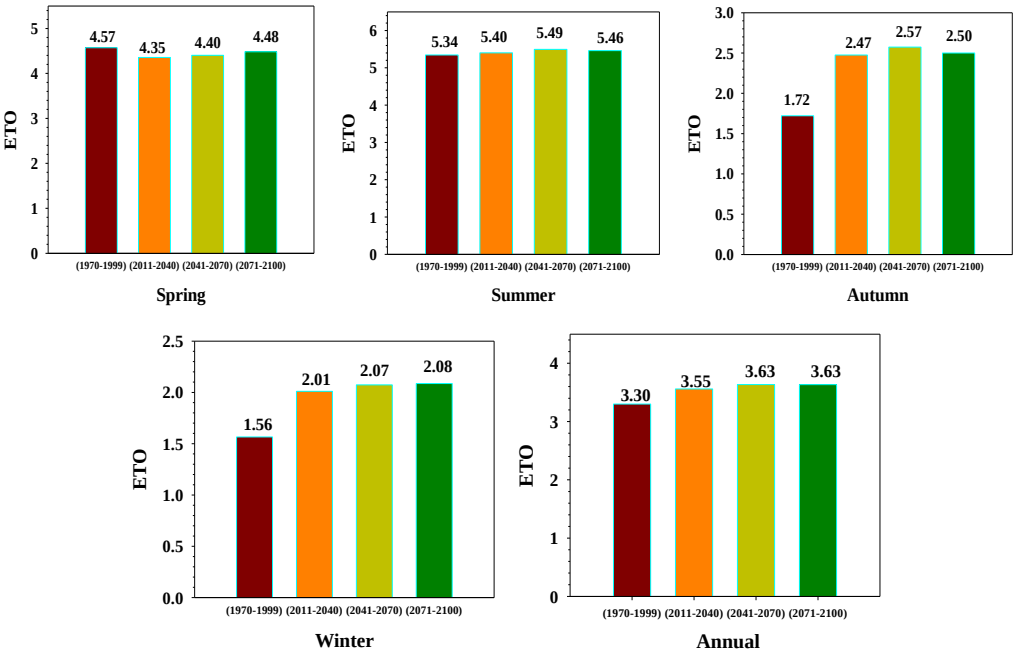


شکل (۷). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP2.6 در ایستگاه کرمانشاه

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

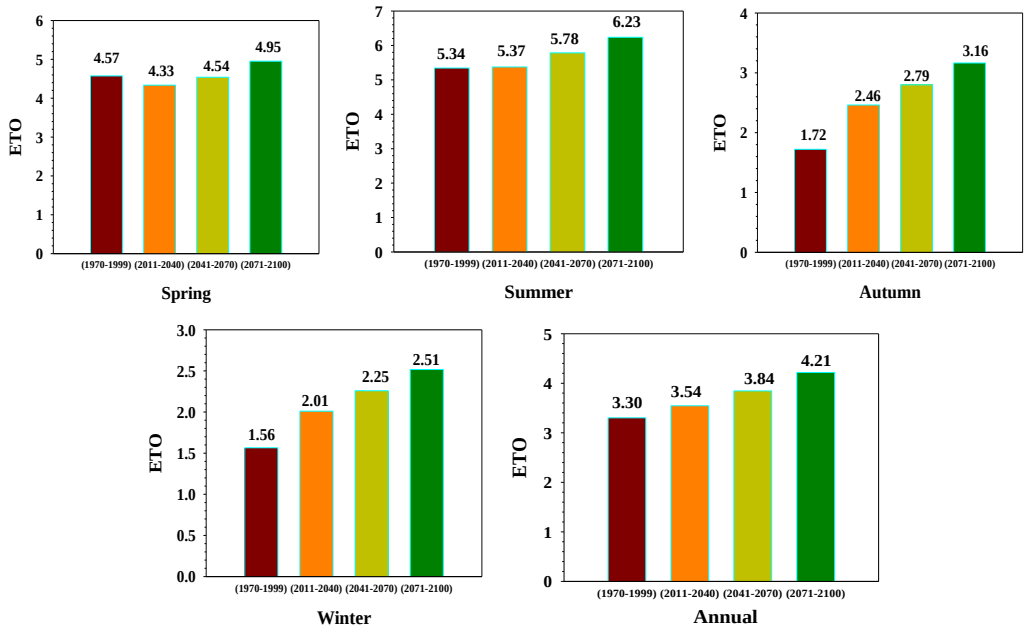


شکل (۸). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP8.5 در ایستگاه کرمانشاه



شکل (۹). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP2.6 در ایستگاه خرم-آباد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]



شکل (۱۰). میانگین سالانه و فصلی تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های مختلف تحت سناریوی RCP8.5 در ایستگاه خرم‌آباد

نتیجه‌گیری

نتایج کلی حاصل از تجزیه و تحلیل‌های آماری در ارتباط با نحوه اثرپذیری میانگین تبخیر و تعرق مرجع از شرایط تغییر اقلیم احتمالی آتی در مقیاس‌های فصلی و سالانه در غرب ایران برای دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱، ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 نشان داد که در کل این منطقه و تحت تمامی دوره‌ها و سناریوها، میانگین تبخیر و تعرق مرجع در سه مقیاس سالانه، فصل پاییز و فصل زمستان در مقایسه با دوره پایه (۱۹۹۹-۱۹۷۰) افزایش معنی‌داری در سطح ۰/۰۱ خواهد یافت. این افزایش معنی‌دار برای کل منطقه، در مقیاس فصل بهار فقط در دوره ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 و در مقیاس فصل تابستان نیز در دو دوره ۲۰۷۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 خواهد بود. در تمامی مقیاس-های فصلی و سالانه، بیشترین نرخ افزایش تبخیر و تعرق مرجع دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه، تحت سناریوی RCP8.5 در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۷۱ رخ خواهد داد. به لحاظ مقایسه رفتار بین فصول مختلف نیز بیشترین نرخ افزایش در رتبه اول در فصل پاییز و در رتبه دوم در فصل زمستان رخ خواهد داد و میزان نرخ افزایش این دو فصل بسیار چشمگیرتر از فصول بهار و تابستان خواهد بود. بر این اساس در مجموع چنین پیش‌بینی می‌شود که در منطقه غرب ایران، با توجه به افزایش معنی‌دار و قابل توجه تبخیر و تعرق مرجع در فصول پاییز و زمستان، نیاز آبی معدود گیاهانی که دوره رشد آنها منطبق بر فصول پاییز و زمستان است بطور چشمگیری افزایش یابد و برای غالب گیاهان دیگر که دوره اصلی رشد آنها و زمان نیاز آنها به آبیاری طی فصول بهار و تابستان است انتظار می‌رود که افزایش نیاز آبی گیاهان چندان چشمگیر نباشد. نتایج حاصل از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]
[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

این تحقیق و شناختی که در ارتباط با نحوه اثرپذیری تبخیر و تعرق مرجع در غرب ایران از شرایط تغییر اقلیم احتمالی آتی بدست داده است می‌تواند ابزاری مناسب برای مدیران بخش منابع آب جهت اتخاذ راهکارهایی جهت مدیریت بهینه و پایدار منابع آب و نیل به سمت توسعه پایدار کشاورزی باشد و پیشنهاد می‌شود جهت تکمیل این تحقیق، تحقیقات مشابهی در ارتباط با سایر مؤلفه‌های بیلان آب در غرب ایران مثل بارش، رواناب و ذخایر آب زیرزمینی نیز به انجام برسد تا یک دیدگاه جامع تری از وضعیت بیلان منابع آب در دهه‌های آتی در غرب ایران حاصل آید. افزایش تبخیر و تعرق مرجع در دهه‌های آتی در غرب ایران می‌تواند زنگ خطری به جهت استفاده بی‌رویه از مخازن آب‌های زیرزمینی نیز باشد که طی سال‌های گذشته به شکل فزاینده‌ای در حال استخراج بوده‌اند و در صورت ادامه این روند از یک سو و افزایش تبخیر و تعرق و نیاز آبی گیاهان از سوی دیگر، بخش کشاورزی در غرب ایران در آینده را می‌تواند با چالش بسیار بزرگی مواجه سازد شکل (۱۰).

منابع

قهرمان، نوذر؛ بابائیان، ایمان؛ طباطبائی، سیدمحمدرضا. (۱۳۹۵)، **بررسی اثرات تغییر اقلیم بر نیاز آبی و طول دوره رشد گیاه نیشکر تحت سناریوهای واداشت تابشی**، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۶ (۱): ۷۵-۶۳.

کارآموز، محمد؛ عراقی نژاد، شهاب. (۱۳۹۳)، **هیدرولوژی پیشرفته**، انتشار دانشگاه امیر کبیر، ۴۶۸ صفحه.

کمال، علیرضا؛ مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۹۱)، **مقایسه عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم AOGCM-TAR و AOGCM-AR4 در تأثیر بر رواناب حوضه در دوره آتی**، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۳): ۱۸۸-۱۷۵.

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. (1998). **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage**, paper 56 FAO Rome, 300(9): D05109.

Bassu S, Brisson N, Durand JL, Boote K, Lizaso J, Jones J, Wand Basso B. (2014). **How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?.** Global Change Biology, 20(7): 2301-2320.

Deryng D, Conway D, Ramankutty N, Price J, Warren R. (2014). **Global crop yield rresponse to extreme heat stress under multiple climate change futures Environmental**, Research Letters, 9(3):034011.

Ebrahimpour M, Ghahreman N, Orang M. (2014). **Assessment of Climate Change Impacts on Reference Evapotranspiration and Simulation of Daily Weather Data Using SIMETAW**, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 140(2): 1-10.

Goyal RK. (2004). **Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India),** Agriculture Water Management, 69(12):1-11.

Hourdin F, Musat I, Bony S, Braconnot P, Codron F, Dufresne J.L, Krinner G. (2006). **The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection**, Climate Dynamics, 27(8):787-813.

Kharin V.V Zwiers F.W Zhang X, Wehner M. (2013). **Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble**, Climatic Change, 119(2):345-357.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]

[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]

Li Z.L, Tang Z.M, Wan Y, Bi C, Zhou B.H, Tang G.J, Zhang X.Y. (2009). **A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data**, Sensors, 9(5):3801–3853.

Liu H, Zhang R, Li Y. (2014). **Sensitivity analysis of reference evapotranspiration (ETo) to climate change in Beijing China**, Journal of Desalination and Water Treatment, 52(13-15):2799-2804.

Marengo JA, Chou SC, Torres RR, Giarolla A, Alves LM, Lyra A. (2014). **Climate change in central and South America: Recent trends future projections and impacts on regional agriculture**. Working Paper No 73

Tao X, Chena H, Xua C, Houa Y, Jiea M .(2015). **Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin China,** Water Science and Engineering, 8(4): 273- 281.

Wang W, Xing W, Shao Q, Yu Z, Peng S, Yang T, Yong B, Taylor J, Singh V.P. (2013). **Changes in reference evapotranspiration across the Tibetan Plateau: Observations and future projections based on statistical downscaling**, J Geophys Res Atmospheres, 118(10):4049-4068.

Wentz FJ, Ricciardulli L, Hilburn K, Mears C. (2007). **How much more rain will global warming bring?** Science, 317:233-235.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1398.19.53.9.7]

[DOI: 10.29252/jgs.19.53.157]