

Projection of Actual Evapotranspiration Changes in the Western Sub-basins of the Lake Urmia Basin Based on Thornthwaite Water Balance Model and Budyko Framework

F. Nasiri¹, K. Zeinalzadeh², and S. Hejabi^{3*}

Abstract

The present study aimed to project the effects of climate change (under RCP8.5 scenario) on actual evapotranspiration (ET) in sub-basins of Nazlou Chay, Rozeh Chay, Shahr Chay, and Barandouz Chay in the west of the Lake Urmia basin, based on CORDEX data; precipitation and the temperature outputs of the two atmospheric general circulation models NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M and ICHEC-EC-EARTH downscaled by RCA4 model. After comparing with observational data, historical and future CORDEX temperature and precipitation data were bias-corrected by linear scaling method and used as input for the Thornthwaite water balance model. Then, the changes of ET in the three periods of near (2011-2040), middle (2041-2070), and far future (2071-2100) compared to the historical period (1976-2005) were evaluated using the Budyko method by separating the shifts caused by the regime and partitioning. The results showed that, on an annual scale, the changes in ET in Nazlou Chay (-1-5.1 mm) and Rozeh Chay (-3.8-10 mm) sub-basins are not significant in any of the future periods. In Shahr Chay (2.4-15.3 mm) and Barandouz Chay (1.2-8.8 mm) sub-basins the significant increase in ET is limited to the middle or far future periods. In all sub-basins, the regime shifts are more severe than the partitioning shifts. Also, in all sub-basins the regime shifts are often positive and the partitioning shifts are often negative. However, the total shifts are different for different sub-basins and different future periods. In general, when the regime shifts are more than twice the partitioning shifts, the total changes in ET are significant.

Keywords: Water Balance, Climate Change, Global Climatic Data, Fu's Equation.

Received: June 22, 2024

Accepted: January 22, 2025

1- M.Sc. Student of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: temefa.nasiri74@gmail.com

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.hejabi@urmia.ac.ir

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/IWRR.2025.464224.2767](https://doi.org/10.22034/IWRR.2025.464224.2767)

پیش‌نگری تغییرات تبخیر-تعرق واقعی بر اساس مدل بیلان آب تورنت وایت و چارچوب بادیکو در زیرحوضه‌های غرب حوضه دریاچه ارومیه

فاطمه نصیری^۱، کامران زینال زاده^۲، سمیه حجایی^{۳*}

چکیده

هدف از مطالعه حاضر، پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم (تحت سناریوی RCP8.5) بر تبخیر-تعرق واقعی (ET) در چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای در غرب حوضه دریاچه ارومیه، بر اساس داده‌های CORDEX (بروندادهای بارش و دمای دو مدل گردش عمومی جو NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M و ICHEC-EC-EARTH ریزمقیاس‌نمایی شده به وسیله مدل اقلیم منطقه‌ای RCA4) است. داده‌های تاریخی و آینده دما و بارش CORDEX پس از مقایسه با داده‌های مشاهداتی، به روش مقیاس‌گذاری خطی تصحیح‌اریبی شدند و به عنوان ورودی مدل بیلان آب تورنت وایت استفاده شدند. سپس، تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) نسبت به دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۷۶) به تفکیک تغییرات ناشی از رژیم و تغییرات ناشی از افراز با استفاده از روش بادیکو بررسی شدند. نتایج نشان داد که در مقیاس سالانه، تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در دو زیرحوضه نازلوچای (۱-۵/۱ تا ۳/۸-۱۰) و روضه‌چای (۳/۸-۱۰ تا ۱۰) در هیچ یک از دوره‌های آینده معنی‌دار نیستند و در زیرحوضه‌های شهرچای (۲/۴ تا ۱۵/۳) و باراندوزچای (۱/۲ تا ۸/۸) افزایش معنی‌دار تبخیر-تعرق واقعی محدود به دوره‌های آینده میانی یا دور است. در همه زیرحوضه‌ها تغییرات ناشی از رژیم شدیدتر از تغییرات ناشی از افراز است و تغییرات ناشی از رژیم در همه زیرحوضه‌ها اغلب مثبت و تغییرات ناشی از افراز اغلب منفی است. اما تغییرات کل، در زیرحوضه‌های مختلف و دوره‌های آینده مختلف، متفاوت است. به طور کلی زمانی که تغییرات ناشی از رژیم بیش از دو برابر تغییرات ناشی از افراز باشد، تغییرات کل تبخیر-تعرق واقعی معنی‌دار هستند.

کلمات کلیدی: بیلان آب، تغییر اقلیم، داده‌های اقلیمی جهانی، معادله فو.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۴/۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱/۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

نیمه خشک این حوضه به نظر می‌رسد اثر تغییر اقلیم بر حوضه دریاچه ارومیه در دهه‌های پیش رو به مراتب مخرب‌تر باشد. چراکه بر اساس گزارش IPCC (Douville et al., 2021) افزایش دما در آینده سبب افزایش تبخیر-تعرق و بنابراین کاهش موجودی آب خواهد شد. کاهش بارش و افزایش شدت تبخیر-تعرق هم سبب کاهش جریان‌های ورودی به دریاچه‌ها شده و هم میزان هدررفت آب از سطح دریاچه‌ها را افزایش می‌دهد. لذا پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب در آینده، برای برنامه‌ریزی و اتخاذ تصمیمات بلندمدت مدیریتی در راستای تعدیل اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌ها ضروری است.

شبیه‌سازی‌های شرایط حال و پیش‌نگری آینده اقلیم به‌وسیله مدل‌های گردش عمومی^۳ (GCMs) انجام می‌شود و استفاده از این مدل‌ها برای مدل‌سازی بلندمدت اقلیم در اغلب مطالعات تغییر اقلیم متداول شده است. با این وجود، قدرت تفکیک مکانی ضعیف شبیه‌سازی‌های مدل‌های GCM، قابلیت این مدل‌ها را در نمایش عارضه‌های میان‌مقیاس^۴، که نقشی اساسی در پویایی جو در مقیاس منطقه‌ای دارد، محدود می‌سازد (Giorgi and Mearns, 1991). پیش‌بینی‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا برای مطالعات ارزیابی اثرات تغییر اقلیم ضروری است. لذا برای حل این مسئله، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی^۵ به‌منظور پس‌پردازش و واسنجی مجدد پیش‌نگری‌های مدل‌های GCM توسط محققان استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها، روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی است که از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای^۶ (RCMs) برای ریزمقیاس‌نمایی شبیه‌سازی‌های مدل‌های GCM استفاده می‌شود. پروژه آزمایش هماهنگ ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای^۷ (CORDEX; Giorgi et al., 2009) که توسط برنامه پژوهش‌های اقلیم جهان^۸ (WCRP) بنا نهاده شده است، با استفاده از انواع مدل‌های RCM موجود، در ۱۴ محدوده مختلف که کل کره زمین را پوشش می‌دهند، به ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی خروجی‌های مدل‌های GCM موجود می‌پردازد. بر اساس پروژه CORDEX، ایران در محدوده شماره ۶: جنوب آسیا^۹ و محدوده شماره ۱۳: خاورمیانه و شمال آفریقا^{۱۰} (MENA) قرار دارد.

پیش‌نگری متغیرهای جوی بارش و دما توسط مدل‌های RCM پروژه CORDEX می‌تواند در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی استفاده شود و پیش‌نگری تغییرات مؤلفه‌های بیلان آب از جمله تبخیر-تعرق واقعی را تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در مقیاس منطقه‌ای امکان‌پذیر نماید. یکی از روش‌های برآورد تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از متغیرهای اقلیمی، روش بیلان آب تورنت وایت (Thorntwaite, 1948) است که برای مناطق مختلف کره زمین قابل استفاده است. تورنت وایت دریافت که تبخیر-تعرق پتانسیل به عنوان تابعی از طول روز با استفاده از اطلاعات میانگین دمای ماهانه و عرض جغرافیایی

گزارش ارزیابی ششم^۱ (AR6) هیات بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ (IPCC) نگرانی در خصوص کاهش منابع آب برخی از مناطق کره زمین از جمله خاورمیانه را تأیید می‌کند (Douville et al., 2021). منابع آب تجدیدپذیر برای بقای اکوسیستم‌های زمینی و آبی و نیازهای بشر در زمینه مصارف خانگی، کشاورزی و صنعت ضروری است. گرمایش جهانی فشار بر منابع آب تجدیدپذیر را در مناطق دارای تنش آبی زمین تشدید نموده و سبب افزایش رقابت بشر و سیستم‌های طبیعی بر سر آب می‌شود. از آنجا که انتظار می‌رود که در اتمسفر گرم‌تر، تراکم بخار آب بیشتر شود، تغییر اقلیم، چرخه هیدرولوژیکی و در نتیجه، منابع آب مناطق را تغییر خواهد داد. به‌طور کلی، علی‌رغم برخی استثنائات، مناطق مرطوب، مرطوب‌تر خواهند شد و مناطق خشک، خشک‌تر خواهند شد. پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم به‌طور منطقه‌ای تغییر می‌کند و در مناطقی مانند اقلیم‌های خشک جنب حاره و اقلیم مدیترانه‌ای که پیش‌بینی می‌شود در آینده بارش کمتر شود، کاهش در منابع آب مورد انتظار است. در این مناطق افزایش دما و کاهش بارش، منابع آب سطحی و زیرزمینی را کاهش و شدت تبخیر-تعرق گیاهان و تبخیر از پهنه‌های آبی (مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و تالاب‌ها) و زیرساخت‌های تأمین آب (کانال‌ها و مخازن) را افزایش خواهد داد (Jia et al., 2019).

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز در شمال غربی ایران است. دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین پهنه آبی درون مرزی ایران و دومین دریاچه فوق شور در جهان است که در سال‌های اخیر با کاهش شدید تراز آب مواجه بوده است. عوامل انسانی مانند توسعه کشاورزی، ساخت سدها و مدیریت ناپایدار منابع آب در کاهش تراز آب دریاچه نقش داشته‌اند. علاوه بر این، عوامل اقلیمی مانند افزایش دمای هوا، کاهش بارش و افزایش تبخیر موجب تشدید وضعیت دریاچه شده‌اند. این عوامل روی هم رفته سبب افزایش اراضی شور اطراف دریاچه و پیامدهای متعدد محیط زیستی و اقتصادی شده‌اند. در نتیجه، این بحران تبدیل به چالش بزرگی در سطح ملی شده است (Parsinejad et al., 2022). Fathian et al. (2015) نشان دادند که کاهش سطح آب دریاچه ارومیه با روند افزایشی دمای هوا در ارتباط است. Alizadeh-Choobari et al. (2016) عامل خشک‌سالی هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه را افزایش دمای هوا، کاهش بارش و روند افزایشی تبخیر در چند دهه اخیر عنوان کردند. Hejabi et al. (2022) با بررسی متغیرهای هواشناسی مؤثر در روند تبخیر-تعرق مرجع (ET₀) در حوضه دریاچه ارومیه نشان دادند که روند افزایشی معنی‌دار دمای بیشینه هوا پس از سرعت باد بیش‌ترین سهم را در روند افزایشی تبخیر-تعرق مرجع داشته است. با توجه به اقلیم خشک و

منطقه قابل محاسبه است. با داشتن اطلاعات تبخیر-تعرق پتانسیل و بارش ماهانه، بیلان آب از طریق محاسبه ماهانه ذخیره آب در خاک، تغییر ذخیره، مازاد و کمبود، رواناب و تبخیر-تعرق واقعی قابل برآورد است. بنابراین، با استفاده از اطلاعات بارش و دمای حاصل از پیش‌نگری‌های پروژه CORDEX به عنوان ورودی مدل بیلان آب تورنت وایت، امکان برآورد مؤلفه‌های بیلان آب برای دوره‌های تاریخی و آینده فراهم شده و پیش‌نگری اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر وضعیت هیدرولوژیکی حوضه امکان‌پذیر می‌شود.

Riyahi et al. (2018) با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت، مازاد و کمبود آب در دسترس حوضه آبریز سد گلستان ۲ را برای دو دوره پایه (۱۳۹۰-۱۳۵۰) و آینده (۱۴۲۸-۱۳۹۱) با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی GISS و دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش حاکی از این بود که میانگین کمبود آب، تحت سناریوهای تغییر اقلیم نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد یافت و شدت آن در مورد سناریوی RCP8.5 بیشتر از سناریوی RCP4.5 خواهد بود. Mohebzadeh & Fallah (2019) از طریق ترکیب فناوری سنجش از دور و مدل بیلان آب تورنت وایت به برآورد مؤلفه‌های بیلان آب دریاچه ارومیه در سال ۲۰۰۵ پرداختند. نتایج بیان‌گر این بود که دریاچه ارومیه با بیلان منفی سالانه ($-3443 \text{ MCM yr}^{-1}$) همراه است. Anayah & Kaluarachchi (2019) با ارائه یک روش تعدیل شده برای برآورد تبخیر-تعرق منطقه‌ای تحت شرایط مختلف اقلیمی و با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت، نقشه‌های جهانی مازاد/کمبود آب (بارش منهای تبخیر-تعرق) ماهانه را تولید نمودند. نتایج نشان داد مدل تعدیل شده قادر است تبخیر-تعرق منطقه‌ای را شبیه‌سازی نماید و در نتیجه پتانسیل زیادی برای پیش‌نگری بیلان آب تحت تغییرات اقلیمی آینده دارد. de Oliveira Aparecido et al. (2021) اثر تغییر اقلیم بر بیلان آب اقلیمی مناطق Pantanal در برزیل را با استفاده از نسخه تعدیل شده مدل بیلان آب تورنت وایت-ماتر ارزیابی نمودند. نتایج این مطالعه حاکی از این بود که در برخی سناریوها اقلیم منطقه دستخوش تغییرات شدید خواهد شد که کشت محصولات زیادی را غیر ممکن خواهد ساخت.

با توجه به اهمیت پیش‌آگاهی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت بیلان آب حوضه دریاچه ارومیه، هدف کلی از این مطالعه استفاده از داده‌های بارش و دمای بلندمدت تاریخی و آینده CORDEX، به عنوان ورودی مدل بیلان آب تورنت وایت، به منظور شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای در غرب حوضه دریاچه ارومیه، با تاکید بر مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی، تحت سناریوی تغییر اقلیم است. شایان ذکر است که میزان و جهت تغییرات تبخیر-تعرق، هم حاصل تغییرات ناشی از رژیم^{۱۱} و هم تغییرات ناشی

از نحوه افراز (تقسیم‌بندی)^{۱۲} بارش به تبخیر-تعرق و رواناب است. به دلیل سازوکارهای پیچیده تعامل پوشش گیاهی و ذخیره آب زیرسطحی، تغییرات ناشی از افراز، حاصل بازخورد غیرخطی حوضه به تغییر اقلیم است. لذا، هدف فرعی این پژوهش، بررسی میزان تغییرات تبخیر-تعرق واقعی به تفکیک تغییرات ناشی از تغییر رژیم و تغییرات ناشی از افراز است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دشت ارومیه واقع در غرب دریاچه ارومیه، فعال ترین قطب کشاورزی آذربایجان غربی به شمار می‌رود که از رسوبات غنی رودهای اصلی این منطقه شامل باراندوزچای، شهرچای، روضه‌چای و نازلوچای پوشیده شده‌است. چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای حدود ۲۰ درصد حقبه دریاچه ارومیه را تأمین می‌کنند. میانگین بلندمدت بارش سالانه در زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به ترتیب برابر $450/8$ ، $381/1$ ، $424/5$ و $420/1$ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه زیرحوضه‌های مذکور به ترتیب $5/6$ ، $9/4$ ، $7/0$ و $7/3$ درجه سلسیوس است. همچنین، میانگین بلندمدت تبخیر سالانه در ایستگاه‌های تبخیرسنجی این چهار زیرحوضه، بین ۱۱۱۵ تا ۲۱۶۴ میلی‌متر است (Montaseri et al., 2020). محصولات تحت کشت این چهار زیرحوضه شامل گندم و جو دیم (36735 هکتار)، گندم و جو آبی (12150 هکتار)، ذرت (1680 هکتار)، یونجه (20470 هکتار)، کلزا (20 هکتار)، چغندر قند (1185 هکتار)، لوبیا و نخود (18600 هکتار)، سیب و گلابی (20015 هکتار)، انگور (10900 هکتار)، بادام و گردو (3465 هکتار) است. توسعه کشاورزی و تغییر الگوی کشت و بهره‌برداری بی‌رویه از آب جهت مصارف کشاورزی، از مهمترین عوامل کاهش جریانات ورودی به دریاچه ارومیه تشخیص داده شده است. در این راستا در سال‌های اخیر، بر مدیریت مصرف آب کشاورزی در دشت ارومیه تمرکز شده است. از آنجا که سناریوهای تغییر اقلیم می‌تواند بر تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مصرف آب کشاورزی تأثیرگذار باشد، در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب در چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی این چهار زیرحوضه را نشان می‌دهد. با توجه به روندنمای اجرای پژوهش در شکل (۲)، مراحل اصلی این مطالعه، شامل تهیه و تصحیح اربیی داده‌های جهانی بارش و دما برای دوره‌های تاریخی و آینده، اجرای مدل بیلان آب تورنت وایت و برآورد مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی، بررسی تغییرات تبخیر-تعرق واقعی نسبت به دوره تاریخی و بررسی تغییرات ناشی از افراز و تغییرات ناشی از رژیم این مؤلفه است. جزئیات مربوط به مراحل پژوهش در بخش‌های بعد تشریح شده‌اند.

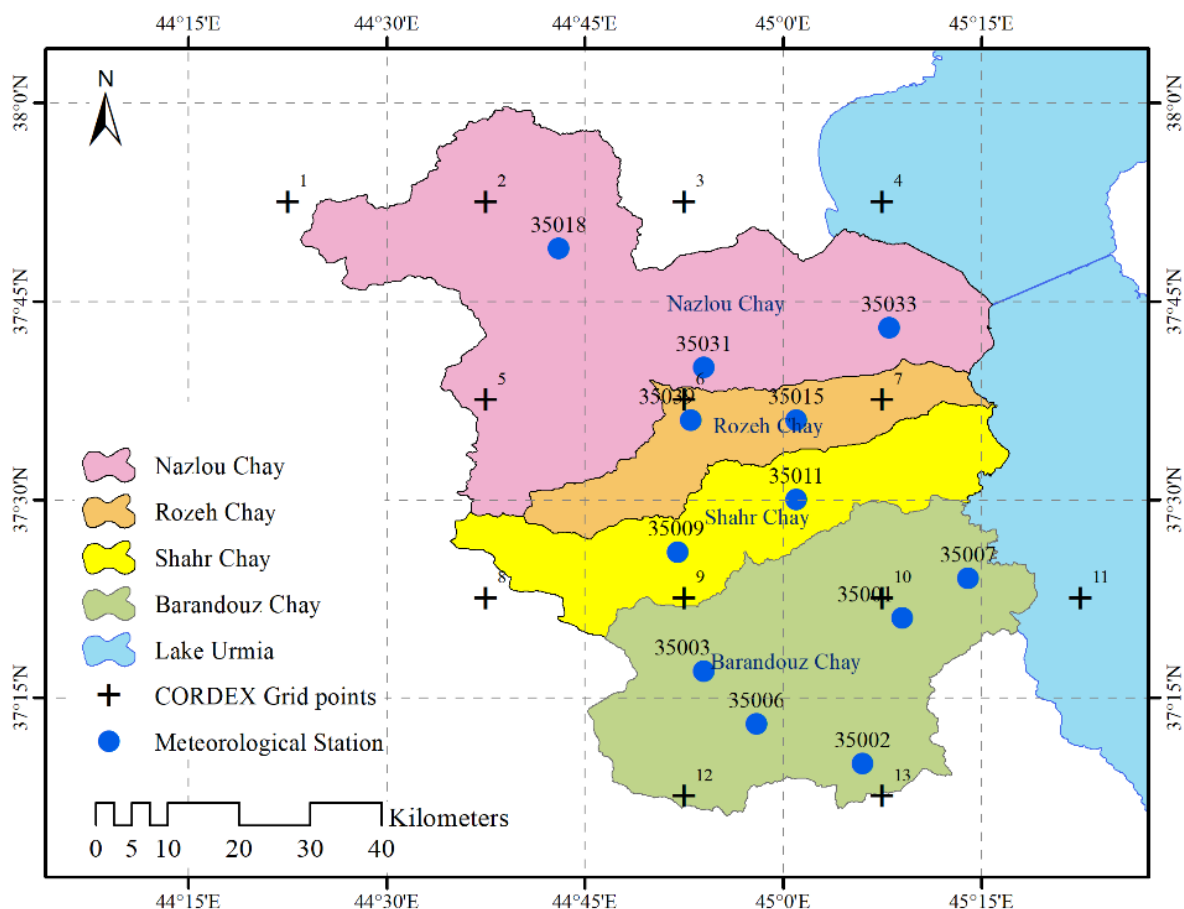


Fig. 1- Geographical location of the studied sub-basins, meteorological stations and CORDEX grid points
 شکل ۱- موقعیت جغرافیایی زیرحوضه‌های مورد مطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی و نقاط شبکه CORDEX

تبخیر-تعرق واقعی از تبخیر-تعرق پتانسیل، بارش، ذخیره رطوبت خاک و آب قابل برداشت از ذخیره رطوبت خاک به دست می‌آید. وقتی بارش برای یک ماه کمتر از PET باشد، ET برابر با بارش به اضافه مقداری از رطوبت خاک خواهد بود که می‌تواند از رطوبت ذخیره شده در خاک برداشت شود. آب قابل برداشت از ذخیره رطوبت خاک به طور خطی با کاهش ذخیره رطوبت خاک کاهش می‌یابد. به طوری که هرچه خاک خشک‌تر می‌شود، خروج آب از خاک دشوارتر می‌شود و کمتر برای ET موجود خواهد بود. اگر بارش از PET بیشتر باشد، ET برابر PET در نظر گرفته می‌شود و آب مازاد بر PET به صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود. وقتی رطوبت خاک بیشتر از ظرفیت ذخیره رطوبت خاک شود، آب مازاد تبدیل به رواناب می‌شود. برای جزئیات بیشتر به (McCabe and Markstrom, 2007) مراجعه شود.

۲-۲- مدل بیلان آب تورنت وایت

در مدل بیلان آب تورنت وایت بر اساس روشی که در ابتدا توسط Thornthwaite, 1948; Mather, 1978,) تورنت وایت ارائه شد (McCabe and Wolock, 1999; Wolock and McCabe, 1999)، از یک روش محاسباتی در مقیاس زمانی ماهانه برای برآورد مؤلفه‌های مختلف بیلان آب استفاده می‌شود. ورودی‌های مدل، میانگین ماهانه دما (T)، بر حسب درجه سلسیوس)، مجموع بارش ماهانه (P، بر حسب میلی‌متر) و عرض جغرافیایی (بر حسب درجه اعشاری) به صورت متوسط هر زیرحوضه است. تبخیر-تعرق پتانسیل^{۱۳} (PET) ماهانه از میانگین دمای ماهانه (T) و عرض جغرافیایی به دست می‌آید و به عنوان هدررفت آب از یک ناحیه بزرگ پوشیده از گیاه همگن که کمبود آب ندارد، تعریف می‌شود (Thornthwaite, 1948; Mather, 1978).

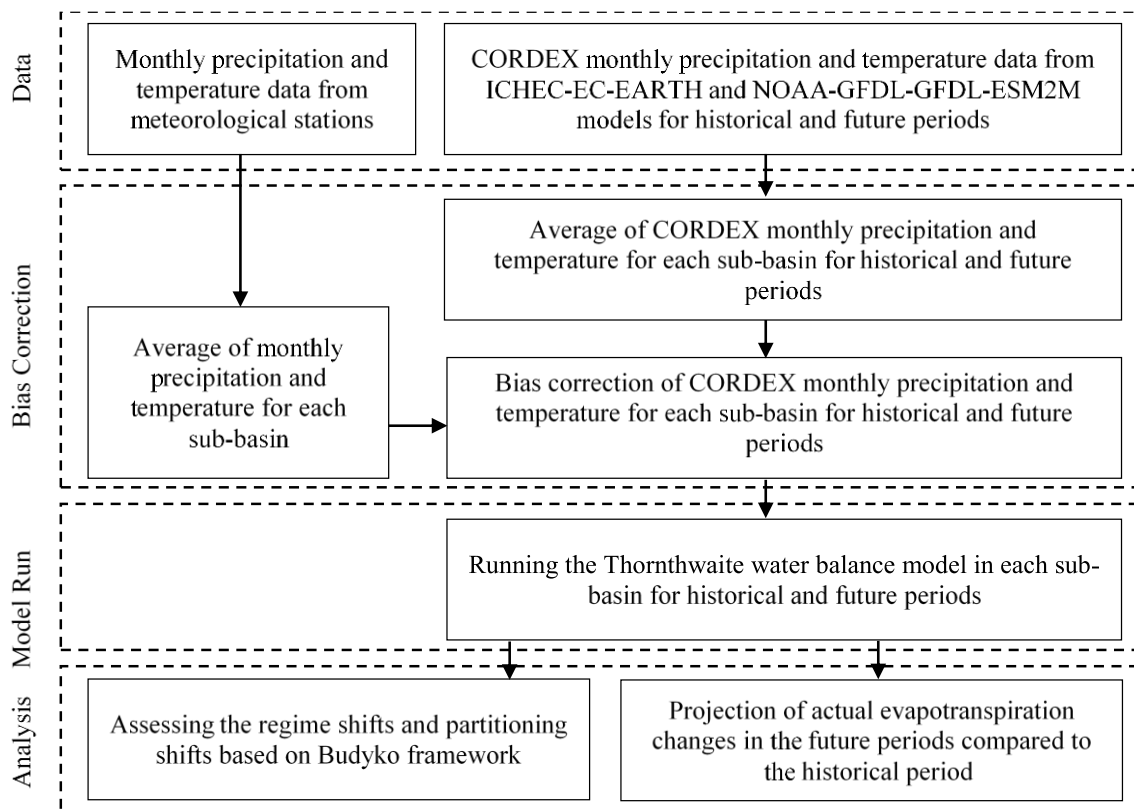


Fig. 2- Flowchart of research

شکل ۲- روندنمای اجرای تحقیق

برای برآورد مؤلفه ET در مطالعه حاضر استفاده می‌شود. با این تفاوت که به جای داده‌های مشاهداتی، از برودادهای دمای هوا و بارش مدل‌های اقلیمی برای دوره تاریخی (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و دوره آینده (۲۰۱۱-۲۱۰۰) به عنوان متغیرهای واداشتی استفاده می‌شود.

۲-۳- داده‌های CORDEX

به‌منظور پیش‌نگری تغییرات تبخیر-تعرق واقعی تحت سناریوی تغییر اقلیم، از داده‌های شبکه‌ای دمای هوا و بارش پایگاه آزمایش هماهنگ ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای (CORDEX; Giorgi et al., 2009) به عنوان متغیرهای واداشت مدل بیلان آب استفاده شد. پروژه CORDEX با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای مختلف و خروجی‌های چندین مدل گردش عمومی جو، پیش‌بینی‌های اقلیمی با مقیاس‌های مکانی بهتر را تولید می‌کند که مورد نیاز پژوهش‌های ارزیابی تأثیر و همچنین سازگاری با تغییر اقلیم است. در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محدوده MENA استفاده شد. محدوده MENA در فاصله عرض‌های جغرافیایی 6°S تا 44°N و طول‌های جغرافیایی 4°W تا 75°E قرار دارد. داده‌های خروجی پروژه CORDEX-MENA شامل خروجی‌های مدل اقلیم

Nasiri et al. (2024) بر اساس داده‌های مشاهداتی جریان رودخانه، دمای هوا و بارش حاصل از ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی، به واسنجی و صحت‌سنجی مدل بیلان آب تورنت وایت در چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای برای دوره آماری ۱۹۷۶-۲۰۰۵ پرداختند و نشان دادند که روی هم رفته عملکرد مدل بیلان آب تورنت وایت مطلوب بوده و مدل در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای، از عملکرد بهتری در شبیه‌سازی رواناب برخوردار است و علی‌رغم یک اریبی خشک، عملکرد مدل بیلان آب تورنت وایت در شبیه‌سازی رواناب سالانه و فصول پرآب سال مطلوب بوده و می‌تواند به عنوان روشی قابل قبول برای مطالعات هیدرواقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. از آنجا که جریان رودخانه یک پاسخ جمعی به فرایندهای هیدرولوژیکی درون حوضه است، یک مدل بیلان آب واسنجی‌شده بر اساس داده‌های جریان رودخانه می‌تواند برای برآورد سایر مؤلفه‌های بیلان آب از جمله ET استفاده شود (Nasiri et al., 2024). با توجه به مشابه بودن منطقه مورد مطالعه و دوره تاریخی مطالعه حاضر (۱۹۷۶-۲۰۰۵) با مطالعه Nasiri et al. (2024)، از تشریح مجدد نتایج مربوط به واسنجی مدل بیلان آب تورنت وایت خودداری نموده و از مدل بیلان آب واسنجی‌شده در مطالعه مذکور،

منطقه‌ای RCA4 است که از دو مدل گردش عمومی جو NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M (NO) و ICHEC-EC-EARTH (IC) به عنوان مدل پیش‌بینی استفاده می‌کند. تفکیک مکانی این دو مجموعه داده 0.25° و دارای مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۵۰ و دوره آینده ۲۰۱۰-۲۰۰۶ تحت سناریوی RCP8.5 است. سناریوی RCP8.5 بیانگر یک سناریوی با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای است که بر اساس آن فرض می‌شود روندهای کنونی انتشار گازهای گلخانه‌ای بدون کنترل ادامه می‌یابد. افزایش پیش‌بینی شده غلظت‌های گازهای گلخانه‌ای در جو، منجر به واداشت تابشی به میزان $8/5 \text{ W m}^{-2}$ تا سال ۲۱۰۰ می‌شود و به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که دماهای متوسط جهانی تا انتهای قرن ۲۱ به میزان $2/3$ تا $5/4$ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد.

در این مطالعه، متغیرهای ماهانه دمای هوا در ارتفاع ۲ متری (tas، بر حسب K) و شدت بارش (pr، بر حسب $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) برای دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) از سایت <https://esgf-data.dkrz.de/search/cordex-dkrz/> تهیه شد و تبدیل واحدهای لازم بر داده‌ها اعمال شد. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی نقاط شبکه CORDEX را در محدوده زیرحوضه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. هر یک از ۱۳ نقطه شبکه که با نماد (+) نمایش داده شده‌اند، سهم متفاوتی در میزان بارش (یا دمای هوا) هر زیرحوضه دارند. لذا برای محاسبه میانگین بارش (یا دمای هوا) در سطح هر زیرحوضه در هر ماه، از روش میانگین‌گیری وزنی (معادله ۱) استفاده شد:

$$\bar{P}_t = \frac{\sum_{i=1}^k A_i P_{i,t}}{\sum_{i=1}^k A_i} \quad (1)$$

که \bar{P}_t مقدار بارش متوسط زیرحوضه در زمان t ($t=1 \dots 360$)، i شماره نقطه شبکه، k تعداد نقاط شبکه در زیرحوضه، A_i مساحت متناظر با هر نقطه شبکه i در بارش هر زیرحوضه و $P_{i,t}$ بارش زمان t در ایستگاه i است.

سری‌های زمانی ماهانه مقادیر بارش و دما برای متوسط هر زیرحوضه در دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) بدست آمد.

۲-۴- تصحیح اریبی داده‌های CORDEX

وجود اریبی نظام‌مند^{۱۵} در مدل‌های اقلیمی مانع استفاده مستقیم خروجی‌های آنها در مطالعات هیدرومتئورولوژیکی می‌شود. روش متداول برای رفع این اریبی‌ها، مقایسه داده‌های شبکه‌ای تاریخی با داده‌های مشاهداتی متناظر در ایستگاه‌های هواشناسی و استفاده از روش‌های تصحیح اریبی برای تولید داده‌های اقلیمی تصحیح‌شده

است. برای این منظور، از میان ایستگاه‌های هواشناسی موجود، ایستگاه‌هایی که دوره تاریخی ۲۰۰۵-۱۹۷۶ را پوشش می‌دهند، مورد استفاده قرار گرفتند. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی را به صورت نقاط آبی رنگ نشان می‌دهد. همچنین، مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول (۱) نشان داده شده است. برای محاسبه متوسط بارش و متوسط دمای مشاهداتی در سطح هر زیرحوضه نیز از روش میانگین‌گیری وزنی (رابطه ۱) استفاده شد؛ چراکه تغییرات ارتفاع در زیرحوضه‌ها زیاد بوده و استفاده از روش‌هایی مانند چندضلعی‌های تیسن مناسب نبود (John, 1971). در اینجا برای بدست آوردن وزن‌ها، میانگین ارتفاع هر دو ایستگاه هم‌جوار محاسبه شده و خط تراز متناظر با آن رسم شد. محدوده بین هر دو خط تراز بیانگر محدوده متناظر با هر ایستگاه هواشناسی است. لذا مقدار بارش متوسط (یا دمای متوسط) هر زیرحوضه در هر ماه با استفاده از مساحت محدوده متناظر با هر ایستگاه به عنوان وزن، به روش میانگین‌گیری وزنی، از رابطه (۱) بدست آمد.

پس از اینکه در مورد هر دو سری داده‌های مشاهداتی و داده‌های مدل اقلیمی، مقادیر بارش و دمای هوا برای متوسط هر زیرحوضه محاسبه شد، از روش تصحیح اریبی مقیاس‌گذاری خطی^{۱۶} (Izumi et al., 2017) برای تصحیح اریبی سری زمانی ماهانه مقادیر بارش و دمای متوسط هر زیرحوضه در دوره تاریخی و دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور استفاده شد. بدین منظور در مورد هر زیرحوضه، برای هر یک از ماه‌های سال، نسبت میانگین بلندمدت بارش مشاهداتی به میانگین بلندمدت بارش حاصل از هر مدل اقلیمی محاسبه شد و ۱۲ مقدار بدست آمده، به عنوان پارامترهای تصحیح اریبی هر ماه، در مقادیر متناظر ماهانه سری زمانی بارش زیرحوضه در دوره تاریخی و دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور ضرب شد. در مورد متغیر دما، به جای محاسبه نسبت میانگین بلندمدت مشاهداتی به میانگین بلندمدت حاصل از هر مدل اقلیمی، تفاضل میانگین بلندمدت دمای مشاهداتی و میانگین بلندمدت دمای حاصل از مدل اقلیمی محاسبه شد و ۱۲ مقدار بدست آمده، به عنوان پارامترهای تصحیح اریبی هر ماه، با مقادیر متناظر ماهانه سری زمانی دمای زیرحوضه در دوره تاریخی و دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور جمع شد.

برای هر زیرحوضه، سری‌های زمانی بارش و دمای تصحیح اریبی‌شده برای دوره تاریخی و دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور برای دو مدل اقلیمی NO و IC به عنوان ورودی‌های مدل بیلان آب تورنت وایت استفاده شدند و مدل‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب برای هر یک از زیرحوضه‌ها برای دوره تاریخی و دوره‌های آینده نزدیک، میانی و دور صورت گرفت. سپس، میزان تفاوت مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی در دوره‌های آینده نسبت به دوره تاریخی بررسی شد.

Table 1- Characteristics of meteorological stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی

Sub-basin	Station code	Latitude	Longitude	Elevation (m asl)
Nazlou Chay	35033	37°43'	45°08'	1290
	35031	37°40'	44°54'	1600
	35018	37°49'	44°43'	1900
Roze Chay	35015	37°36'	45°01'	1400
	35039	37°36'	44°53'	1500
Shahr Chay	35011	37°30'	45°01'	1450
	35009	37°26'	44°50'	1630
Barandouz Chay	35007	37°24'	45°14'	1280
	35006	37°13'	44°58'	1590
	35003	37°17'	44°54'	1490
	35002	37°10'	45°06'	1420
	35001	37°21'	45°09'	1340

$$\frac{ET}{P} = 1 + \frac{PET}{P} - \left[1 + \left(\frac{PET}{P} \right)^{\frac{1}{\omega}} \right] \quad (5)$$

که ω ($\in [1, \infty)$) پارامتر تجربی مدل است که شکل منحنی بادیکو را کنترل می‌کند و منعکس‌کننده اثرات مشخصه‌های حوضه (مانند نوع و تراکم پوشش گیاهی، مشخصات زمین‌شناسی و ویژگی‌های خاک) است. با افزایش ω نسبت ET/P افزایش می‌یابد.

(Du et al. 2016) نشان دادند که در مقیاس زمانی سالانه، معادلات ارائه شده برای شرایط ناپایدار هیدرولوژیکی نتایج مشابهی با معادله فو دارد و اثر تغییرات ذخیره رطوبت خاک بر ترازمندی سالانه آب معنی‌دار نبوده و قابل چشم‌پوشی است. لذا در مطالعه حاضر، با فرض شرایط پایدار هیدرولوژیکی از اثر تغییرات رطوبت خاک سالانه صرف‌نظر شد و از معادله فو برای تحلیل چارچوب بادیکو استفاده شد. برای ارزیابی عملکرد معادله فو در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی (ET) سالانه از معیارهای ضریب همبستگی (r) و معیار کارایی نش-ساتکلیف^{۱۸} (NSE) استفاده شد:

۵-۲- بررسی میزان تغییرات ناشی از رژیم و میزان تغییرات ناشی از افراز بر اساس فرضیه بادیکو

فرضیه بادیکو^{۱۷} رابطه بین شاخص تبخیری (ET/P) و شاخص خشکی ($\phi = PET/P$) را در مقیاس زمانی سالانه به صورت ریاضی بیان نموده و معادله عمومی آن به صورت زیر است (Arora, 2002):

$$\frac{ET}{P} = \frac{\phi}{1 + F(\phi)} \quad (2)$$

که این رابطه عملی، تابع دو شرط محدودکننده است:

$$ET \rightarrow PET \quad \text{as} \quad P \rightarrow \infty \quad (3)$$

$$ET \rightarrow P \quad \text{as} \quad PET \rightarrow \infty \quad (4)$$

بنابراین، تحت شرایط مرطوب، عامل محدودکننده ET (تبخیر و تعرق واقعی)، موجودی انرژی (از طریق تبخیر و تعرق پتانسیل PET) و تحت شرایط خشک، عامل محدودکننده ET ، موجودی آب (از طریق بارش P) است. یکی از پرکاربردترین معادلات ارائه شده بر مبنای فرضیه بادیکو، معادله فو (Fu, 1981) است که مطابق آن، رابطه بین میانگین سالانه ET ، PET و P به صورت زیر قابل بیان است:

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق واقعی

پس از تصحیح اریبی بارش و دمای CORDEX برای مدل‌های اقلیمی IC و NO، برای هر زیرحوضه در دوره‌های تاریخی و آینده، سری‌های زمانی فصلی و سالانه از روی سری‌های تصحیح اریبی شده ماهانه محاسبه شدند و سری‌های زمانی دوره‌های آینده با سری‌های متناظر خود در دوره تاریخی با استفاده از آزمون t در سطح معنی‌داری پنج درصد مقایسه شدند. شکل (۳) نمودارهای دمای فصلی و سالانه زیرحوضه‌های مورد مطالعه را برای دوره‌های تاریخی و آینده نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳)، در همه زیرحوضه‌ها و در هر دو مقیاس فصلی و سالانه، هر دو مدل IC و NO، افزایش میانگین دمای هوا را برای آینده پیش‌نگری می‌کنند؛ به طوری که نرخ افزایش دما برای آینده میانی بیشتر از آینده نزدیک و برای آینده دور بیشتر از آینده میانی است. در همه زیرحوضه‌ها، میزان افزایش دمای هوا در آینده نزدیک نسبت به دوره تاریخی، بر اساس مدل IC حدود $1/6^{\circ}\text{C}$ و بر اساس مدل NO، با اندکی تفاوت، $1/5^{\circ}\text{C}$ پیش‌نگری شده است. در مورد آینده میانی، افزایش دما برای نازل‌چای و روضه‌چای بر اساس هر دو مدل $3/1^{\circ}\text{C}$ و برای شهرچای و باراندوزچای بر اساس هر دو مدل $3/2^{\circ}\text{C}$ پیش‌نگری شده است. در مورد آینده دور، میزان افزایش دما در نازل‌چای و روضه‌چای بر اساس مدل IC حدود $5/5^{\circ}\text{C}$ و بر اساس مدل NO، $4/6^{\circ}\text{C}$ پیش‌نگری شده است. در حالی که در مورد شهرچای و باراندوزچای میزان افزایش دما بر اساس مدل IC حدود $5/7^{\circ}\text{C}$ و بر اساس مدل NO، $4/8^{\circ}\text{C}$ پیش‌نگری شده است. از آنجا که یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر تقاضای تبخیر جو، دمای هوا است، افزایش دمای هوا در آینده می‌تواند سبب افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل شود. با این وجود، نحوه تغییر تبخیر-تعرق واقعی بسته به اقلیم منطقه متفاوت بوده و در اقلیم‌های انرژی‌محدود که عامل محدودکننده تبخیر-تعرق، موجودی انرژی است، با افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل، تبخیر-تعرق واقعی نیز افزایش می‌یابد؛ در حالی که در اقلیم‌های آب‌محدود، به شرط افزایش بارش، تبخیر-تعرق واقعی نیز افزایش می‌یابد؛ در غیر اینصورت، تبخیر-تعرق واقعی تغییر محسوسی نخواهد داشت. چون در این اقلیم‌ها عامل محدودکننده تبخیر-تعرق، موجودی آب است.

شکل (۴) نمودارهای بارش فصلی و سالانه زیرحوضه‌های مورد مطالعه را برای دوره‌های تاریخی و آینده نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۴) در همه زیرحوضه‌ها و در هر دو مقیاس فصلی و سالانه تغییرات پیش‌نگری شده توسط هر دو مدل IC و NO، برای هر سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور از نظر آماری غیرمعنی‌دار است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 (S_i - \bar{S})^2}} \quad (6)$$

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

که O_i و S_i به ترتیب معرف مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر مشاهده شده و \bar{O} و \bar{S} به ترتیب میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و میانگین مقادیر مشاهده شده است.

برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق واقعی از روش Maurer et al. (2021) استفاده شد. ابتدا در مورد هر یک از زیرحوضه‌های مطالعاتی، توزیع‌های احتمال تجربی هر یک از دو شاخص خشکی (PET/P) و شاخص تبخیری (ET/P) برای دوره تاریخی و دوره‌های آینده با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف دو نمونه‌ای مورد مقایسه گرفتند. فرض صفر این آزمون این است که دو نمونه دارای توزیع‌های احتمال تجربی یکسان هستند. چنانچه p -value متناظر با آماره آزمون کمتر از سطح معنی‌داری باشد، فرض صفر رد می‌شود؛ بدین معنی که توزیع‌های احتمال تجربی شاخص در دوره‌های تاریخی و آینده متفاوت هستند. در شرایط تغییر اقلیم، تغییر ترازمندی آب می‌تواند به دو صورت رخ دهد: (۱) داده‌ها در امتداد همان منحنی بادیکو جابه‌جا شوند؛ که در این صورت تغییر مؤلفه‌های ترازمندی آب ناشی از تغییر در محدودیت‌های آب و انرژی (شاخص خشکی) است و (۲) داده‌ها به یک منحنی جدید بادیکو با مقدار متفاوت پارامتر جابه‌جا شوند و لذا سبب تغییر روابط بین تقاضای تبخیر (PET) و بارش (P) و تبخیر-تعرق واقعی (ET) شود؛ چرا که پارامتر ω نحوه افزایش آب موجود به تبخیر-تعرق واقعی و رواناب را نشان می‌دهد. تغییر نوع اول را جابه‌جایی ناشی از رژیم و تغییر نوع دوم را جابه‌جایی ناشی از افزایش می‌نامیم. برای ارزیابی تغییرات ناشی از دو عامل رژیم و افزایش، در مورد هر یک از زیرحوضه‌های مطالعاتی، معادله فو چهار بار واسنجی شد، یک بار برای دوره تاریخی و سه بار برای هر یک از دوره‌های آینده. در مورد مؤلفه‌های ET، اختلاف میانگین مقادیر دوره آینده و دوره تاریخی بیانگر مقدار کل اثرات تغییر اقلیم هستند. برای درک اثر دو نوع جابه‌جایی روی ET، ابتدا شاخص‌های تبخیری فرضی (ET/P) برای حالتی که تنها جابه‌جایی ناشی از رژیم رخ دهد، محاسبه شدند. این امر با کاربست معادله (۵) بر مقادیر مشاهداتی PET/P دوره آینده و پارامتر ω دوره تاریخی صورت گرفت. در ادامه، این مقادیر فرضی با مقادیر شاخص‌های تبخیری دوره تاریخی مقایسه شدند. سپس، این دو گروه داده با استفاده از مقادیر بارش سالانه به مقادیر مطلق ET تبدیل شدند. اختلاف بین میانگین مقادیر این دو گروه بیانگر اثر جابه‌جایی ناشی از رژیم است. برای محاسبه اثر جابه‌جایی ناشی از افزایش، مقادیر اثر جابه‌جایی ناشی از رژیم از مقدار کل اثرات کسر شدند (Maurer et al., 2021).

(به ترتیب $0/10$ و $0/15$) و بر اساس مدل NO در آینده دور ($0/11$ mm day⁻¹) افزایش معنی داری در تبخیر-تعرق واقعی رخ خواهد داد. در فصل زمستان، بر اساس مدل IC در دوره های آینده میانی و دور (به ترتیب $0/19$ و $0/33$) و بر اساس مدل NO در هر سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور (به ترتیب $0/07$ ، $0/14$ و $0/24$) تبخیر-تعرق افزایش معنی دار خواهد داشت که ناشی از افزایش دمای معنی دار در این فصل است. در زیرحوضه شهرچای بر خلاف سایر زیرحوضه ها، در فصل بهار، در هر سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور (به ترتیب $0/15$ mm day⁻¹، $0/20$ و $0/32$ بر اساس مدل IC و $0/12$ ، $0/23$ و $0/28$ بر اساس مدل NO) افزایش معنی دار در تبخیر-تعرق واقعی پیش نگری می شود. افزایش تبخیر-تعرق واقعی در زمستان و بهار و کاهش رطوبت خاک از یک سو و کاهش بارش در تابستان از سوی دیگر، سبب کاهش معنی دار تبخیر-تعرق واقعی هر سه دوره (به ترتیب $0/12$ ، $0/18$ و $0/29$ بر اساس مدل IC و $0/14$ ، $0/22$ و $0/20$ بر اساس مدل NO) شده است. همچنین، افزایش بارش و دمای پاییز سبب افزایش تبخیر-تعرق واقعی (به ترتیب $0/19$ و $0/18$) در دوره میانی و آینده بر اساس مدل IC و افزایش تبخیر-تعرق واقعی ($0/12$ mm day⁻¹) در دوره آینده بر اساس مدل NO می شود.

در زیرحوضه شهرچای، بر اساس مدل IC، کاهش به میزان $2/2$ درصد در مورد بارش آینده نزدیک پیش نگری شده است؛ در حالی که مدل NO برای آینده نزدیک افزایشی به میزان $7/5$ درصد پیش نگری می کند. هر دو مدل، برای آینده میانی و دور، افزایش بارش و با بیش ترین مقدار افزایش برای آینده میانی به ترتیب به میزان $12/2$ و 7 درصد برای مدل IC و NO پیش نگری می کنند. در زیرحوضه باراندوزچای مشابه شهرچای، مدل IC برای آینده نزدیک کاهش بارش ($2/4$ - درصد) را پیش نگری می کند در حالی که مدل NO افزایشی به میزان 9 درصد برای دوره آینده نزدیک پیش نگری می کند. در مورد آینده میانی و دور، مشابه سایر زیرحوضه ها افزایش بارش پیش نگری شده که بیش ترین درصد افزایش مربوط به آینده میانی به میزان $10/9$ و $8/4$ برای مدل IC و NO است. به دلیل بازخوردهای غیرخطی تبخیر-تعرق واقعی به تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل و بارش و رطوبت خاک، علی رغم غیر معنی دار بودن تغییرات بارش، تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در آینده می تواند معنی دار یا غیر معنی دار باشد. برای بررسی این موضوع، با استفاده از مدل بیلان آب تورنت وایت، مؤلفه های بیلان آب بر اساس داده های بارش و دمای تصحیح آریبی شده دو مدل اقلیمی IC و NO برای دوره های تاریخی و آینده بدست آمد و تغییرات تبخیر-تعرق واقعی بررسی شد. شکل (۵) نمودارهای تبخیر-تعرق واقعی را در دو مقیاس فصلی و سالانه، برای دوره های تاریخی و آینده، بر اساس اجرای مدل بیلان آب تورنت وایت، با استفاده از پیش نگری های بارش و دمای حاصل از دو مدل اقلیمی IC و NO نشان می دهد. در زیرحوضه شهرچای در هر دو مقیاس سالانه و فصلی، تغییرات معنی داری در اغلب دوره های آینده و بر اساس هر دو مدل اقلیمی شناسایی شد. به طوری که در مقیاس سالانه بر اساس مدل IC در آینده میانی و دور

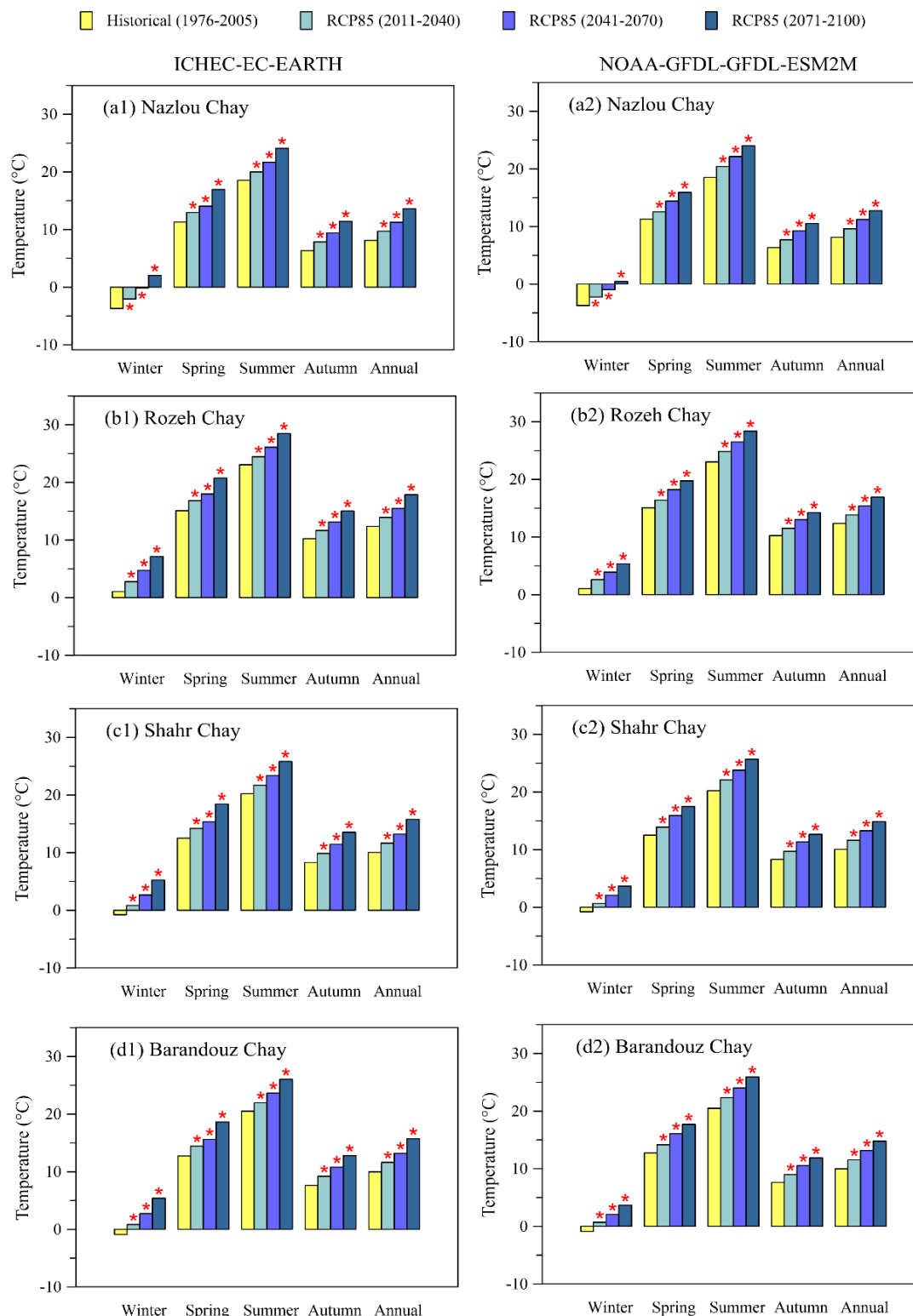


Fig. 3- Diagram of the seasonal and annual temperature, based on the CORDEX historical and future bias-corrected data for IC (1) and NO (2) models in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d). *: Significant difference with historical period

شکل ۳- نمودار میانگین دمای فصلی و سالانه بر اساس داده‌های تصحیح‌شده دوره‌های تاریخی و آینده CORDEX برای مدل IC (1) و مدل NO (2) در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روزه‌چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d). *: اختلاف معنی‌دار با دوره تاریخی

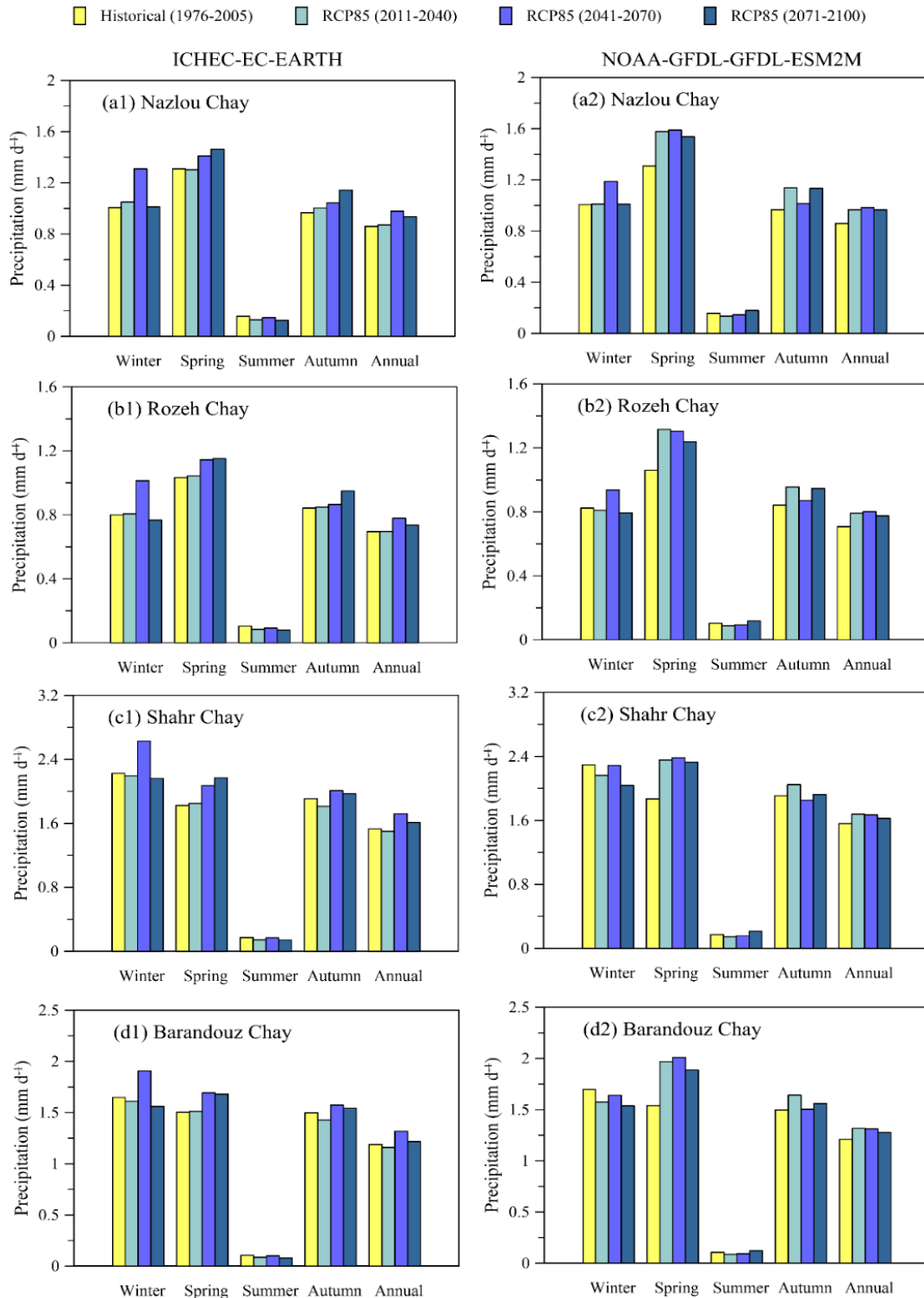


Fig. 4- Diagram of the seasonal and annual precipitation, based on the CORDEX historical and future bias-corrected data for IC (1) and NO (2) models in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d). *: Significant difference with historical period

شکل ۴- نمودار میانگین بارش فصلی و سالانه بر اساس داده‌های تصحیح‌شده دوره‌های تاریخی و آینده CORDEX برای مدل IC (1) و مدل NO (2) در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روزه‌چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d). *: اختلاف معنی‌دار با دوره تاریخی

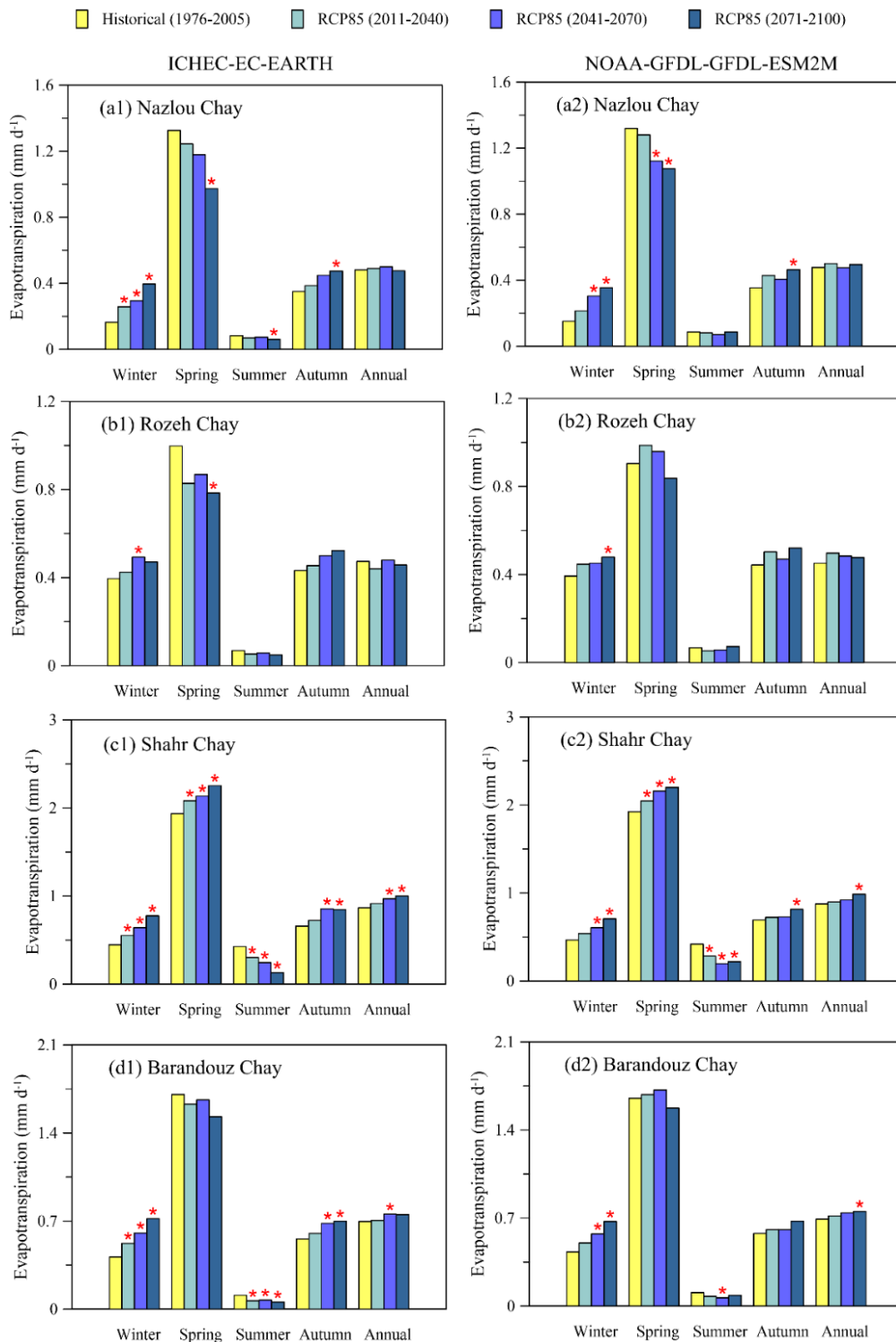


Fig. 5- Diagram of the seasonal and annual actual evapotranspiration, based on the CORDEX historical and future bias-corrected data for IC (1) and NO (2) models in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d). *: Significant difference with historical period

شکل ۵- نمودار میانگین تبخیر-تعرق واقعی فصلی و سالانه بر اساس داده‌های تصحیح‌اریبی شده دوره‌های تاریخی و آینده CORDEX برای مدل IC (1) و مدل NO (2) در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روضه‌چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d). *: اختلاف معنی‌دار با دوره تاریخی

دوره‌های تاریخی و آینده در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲)، در زیرحوضه نازلوچای، در مورد مدل IC معیارهای r و NSE برای دوره آینده نزدیک و دور در محدوده قابل قبولی قرار ندارند. اما در مورد مدل NO عملکرد معادله فو در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی همه دوره‌های تاریخی و آینده نسبتاً خوب است. در زیرحوضه روضه‌چای، در مورد هر دو مدل IC و NO، معادله فو عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق ندارد. یکی از دلایل این مسئله عملکرد ضعیف مدل بیلان آب تورنت وایت در زیرحوضه‌های نازلوچای و روضه‌چای (Nasiri et al., 2024) است که منجر به خطای زیاد در شبیه‌سازی مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی و در نتیجه سبب خطای زیاد در برآزش معادله فو شده است. اما در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای معادله فو دارای عملکرد خوبی در مورد هر دو مدل اقلیمی و همه دوره‌های تاریخی و آینده است. همه مقادیر واسنجی شده پارامتر ω برای دوره‌های تاریخی و آینده در محدوده گزارش شده در مطالعات پیشین قرار دارد (Zhang et al, 2001; Milly, 1993). مقایسه مقادیر پارامتر ω نشان می‌دهد که در همه زیرحوضه‌ها مقدار پارامتر ω در دوره تاریخی بیشتر از دوره‌های آینده است و این اختلاف‌ها در مورد زیرحوضه‌های نازلوچای و روضه‌چای بیشتر مشهود است.

در زیرحوضه باراندوزچای، در مقیاس زمانی سالانه، بر اساس مدل IC برای دوره آینده میانی ($0/06 \text{ mm day}^{-1}$) و بر اساس مدل NO برای دوره آینده دور ($0/06 \text{ mm day}^{-1}$) افزایش تبخیر-تعرق واقعی پیش‌نگری می‌شود. بر اساس مدل IC در فصل بهار در هیچ یک از دوره‌های آینده تغییر معنی‌داری در تبخیر-تعرق واقعی پیش‌نگری نمی‌شود؛ در حالی که در سایر فصول، تقریباً در همه دوره‌ها (غیر از دوره آینده نزدیک در فصل پاییز) تغییرات افزایشی (زمستان و پاییز) یا کاهش (تابستان) معنی‌دار پیش‌نگری شده است. اما بر اساس مدل NO، تنها در مورد زمستان آینده میانی و دور (به ترتیب $0/14$ و $0/24$) و تابستان آینده میانی ($-0/04 \text{ mm day}^{-1}$) شاهد تغییرات معنی‌دار در تبخیر-تعرق واقعی هستیم. روی هم رفته، در مقیاس سالانه تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در دو زیرحوضه نازلوچای و روضه‌چای در هیچ یک از دوره‌های آینده معنی‌دار نیست و در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای تغییرات معنی‌دار تبخیر-تعرق واقعی محدود به دوره‌های آینده میانی یا دور است.

۳-۲- تغییرات ناشی از رژیم و تغییرات ناشی از افراز

شکل (۶) نتایج واسنجی معادله فو را برای هر یک از زیرحوضه‌ها نشان می‌دهد. معیارهای عملکرد معادله فو در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی

Table 2- Performance evaluation criteria of the Fu's equation (Correlation coefficient and Nash-Sutcliffe efficiency criteria) in simulating the actual evapotranspiration (ET) for the historical and future periods
جدول ۲- معیارهای ارزیابی عملکرد معادله فو (ضریب همبستگی و معیار کارایی نش - ساتکلیف) در شبیه‌سازی تبخیر-تعرق واقعی (ET) در دوره‌های تاریخی و آینده

Sub-basin	Model	r				NSE			
		Historical Period	Near Future	Middle Future	Far Future	Historical Period	Near Future	Middle Future	Far Future
Nazlou Chay	IC	0.63	0.27	0.71	0.37	0.39	-0.08	0.46	0.05
	NO	0.76	0.60	0.75	0.69	0.54	0.33	0.56	0.46
Rozeh Chay	IC	0.26	-0.02	0.56	0.33	-0.19	-0.87	-0.97	-0.04
	NO	0.13	0.27	0.62	0.46	-0.52	0.00	0.19	0.05
Shahr Chay	IC	0.93	0.88	0.92	0.85	0.77	0.65	0.68	0.56
	NO	0.89	0.89	0.90	0.85	0.71	0.64	0.62	0.60
Barandouz Chay	IC	0.81	0.85	0.90	0.72	0.62	0.66	0.67	0.50
	NO	0.85	0.86	0.84	0.83	0.66	0.62	0.57	0.61

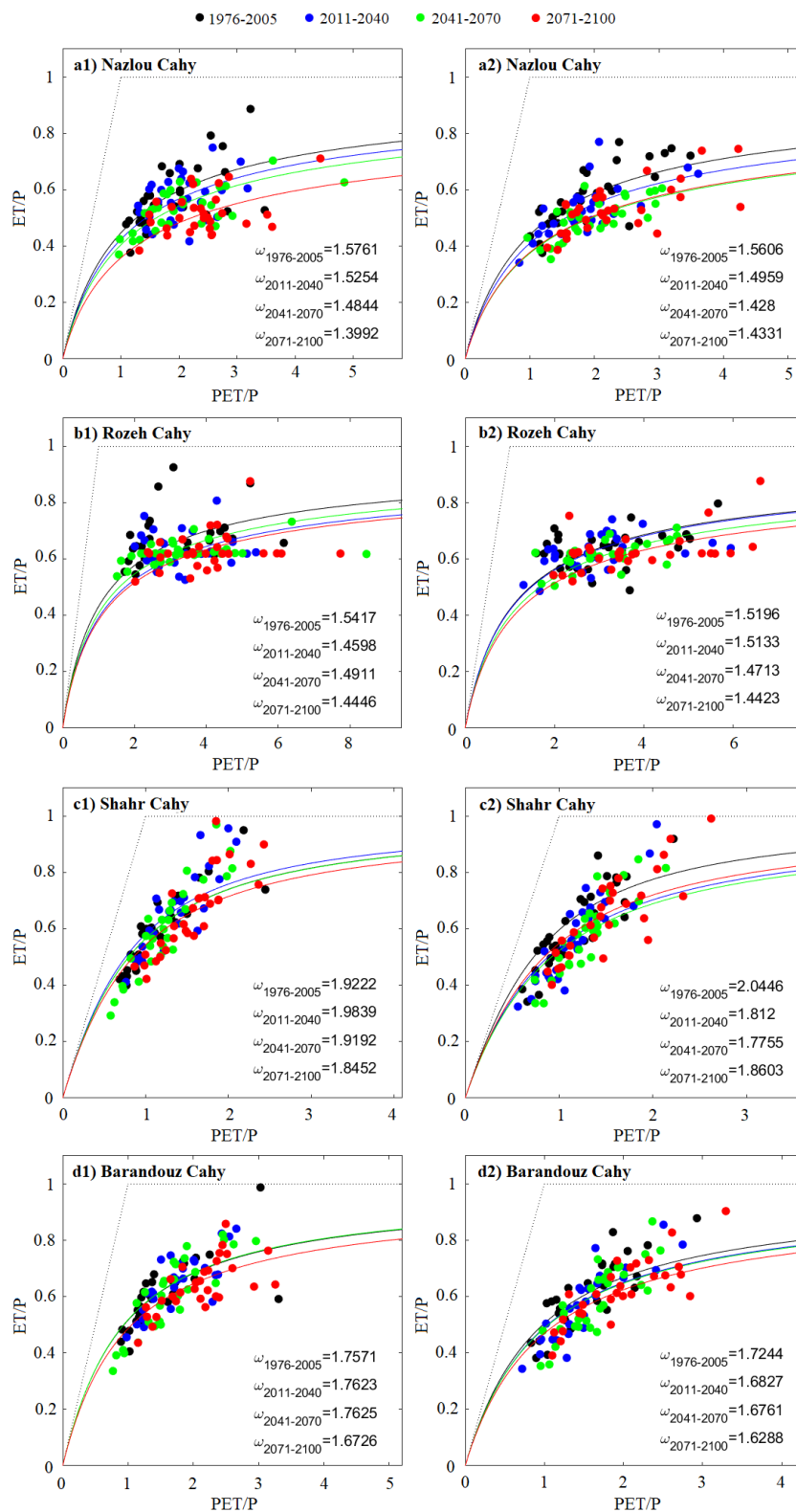


Fig. 6- Budyko diagram of historical and future periods based on the CORDEX data for IC (1) and NO (2) models in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d)
 شکل ۶- نمودار بادیکو در دوره‌های تاریخی و آینده بر اساس داده‌های CORDEX برای مدل (1) و مدل (2) در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روضه‌چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d)

تبخیری (ET/P) دوره‌های آینده با دوره تاریخی در زیرحوضه‌های مطالعاتی در جدول (۳) نشان داده شده است.

تغییر در راستای هر دو محور بادیکو (شاخص خشکی (PET/P) و شاخص تبخیری (ET/P)) بین دوره تاریخی و دوره‌های آینده به روش آزمون کلموگروف-اسمیرنوف دو نمونه‌ای بررسی شد. نتایج مقایسه توزیع‌های احتمال تجربی شاخص خشکی (PET/P) و شاخص

Table 3- The p-values of Kolmogorov-Smirnov two-sample test for comparison of probability distribution of aridity index (PET/P) and Evaporative index (ET/P) in the future periods compared to the historical period in the studied sub-basins

جدول ۳- مقادیر p-value آزمون کلموگروف-اسمیرنوف دو نمونه‌ای برای مقایسه توزیع‌های احتمال شاخص خشکی (PET/P) و شاخص تبخیری (ET/P) دوره‌های آینده نسبت به دوره تاریخی در زیرحوضه‌های مطالعاتی

Sub-basin	Index	ICHEC-EC-EARTH			NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M		
		Near Future	Middle Future	Far Future	Near Future	Middle Future	Far Future
Nazlou Chay	PET/P	0.342	0.537	0.005*	0.760	0.537	0.109
	ET/P	0.760	0.200	0.055	0.200	0.011*	0.109
Rozeh Chay	PET/P	0.109	0.200	0.005*	0.537	0.342	0.109
	ET/P	0.109	0.005*	0.026*	0.537	0.109	0.026*
Shahr Chay	PET/P	0.109	0.109	0.002*	0.760	0.109	0.026*
	ET/P	0.342	0.936	0.342	0.342	0.936	0.537
Barandouz Chay	PET/P	0.109	0.026*	0.001*	0.537	0.109	0.026*
	ET/P	0.200	0.760	0.342	0.342	0.760	0.342

* Significant difference in 5 % significance level

در زیرحوضه شهرچای، در مورد هر دو مدل اقلیمی، توزیع احتمال شاخص خشکی دوره آینده دور تفاوت معنی‌داری با دوره تاریخی دارد و در زیرحوضه باراندوزچای نیز توزیع احتمال شاخص خشکی آینده میانی و دور در مورد مدل IC و توزیع احتمال شاخص خشکی آینده دور در مورد مدل NO دارای اختلاف معنی‌داری با دوره تاریخی هستند. به طور کلی معنی‌دار بودن اختلاف توزیع احتمال هر یک از شاخص‌های خشکی و تبخیری تعیین می‌کند که تفاوت پارامتر ω دوره آینده با دوره تاریخی ناشی از کدام یک از عوامل است. مثلاً در زیرحوضه شهرچای تغییر معنی‌دار در شاخص خشکی آینده دور سبب کاهش معنی‌دار پارامتر ω شده است. کاهش پارامتر ω بیانگر کاهش نسبت ET/P است؛ یعنی در آینده نسبت آب تخصیص یافته به تبخیر-تعرق واقعی کاهش می‌یابد. اما کاهش نسبت ET/P در آینده لزوماً به معنای کاهش مقدار مطلق ET نیست. چون موجودی آب (P) در آینده ممکن است افزایش یابد. به طور مشابه، حرکت به سمت چپ روی یک منحنی بادیکو نیز باعث کاهش نسبت ET/P می‌شود که لزوماً بیانگر کاهش مقدار مطلق ET نیست. در مورد مقادیر مطلق تبخیر-تعرق واقعی (ET)، درصد تغییر کل، تغییر ناشی از رژیم و تغییر ناشی از افزایش در شکل (۷) نشان داده شده است.

در زیرحوضه شهرچای، بر اساس مدل IC، تغییر معنی‌داری از نظر تغییرات ناشی از رژیم یا افزایش در دوره آینده نزدیک مشاهده نمی‌شود. اما بر اساس مدل NO تغییرات ناشی از رژیم (۱۵/۵ درصد) مثبت و معنی‌دار و تغییرات ناشی از افزایش (۱۳/۱- درصد) منفی و معنی‌دار هستند. با این وجود تغییرات کل (۲/۴ درصد) غیر معنی‌دار است. همچنین، در دوره آینده میانی، تغییرات ناشی از رژیم و افزایش (به ترتیب ۲۲/۱ و ۱۶/۹- درصد) شدیدتر از دوره آینده نزدیک بوده اما تغییر کل (۵/۲ درصد) غیرمعنی‌دار است. اما بر اساس مدل IC، تغییرات ناشی از رژیم (۱۵/۷ درصد) مثبت و معنی‌دار بوده؛ در حالی که تغییرات ناشی از افزایش (۴/۱- درصد) غیرمعنی‌دار است. لذا تغییر کل (۱۱/۶ درصد) مثبت و معنی‌دار است و افزایش تبخیر-تعرق واقعی برای آینده میانی پیش‌نگری می‌شود. در مورد آینده دور، بر اساس هر دو مدل، تغییرات ناشی از رژیم (به ترتیب ۲۰/۷ و ۲۴/۷ درصد) بیشتر از تغییرات ناشی از افزایش (۵/۴- و ۱۲/۳- درصد) بوده و تغییرات کل (به ترتیب ۱۵/۳ و ۱۲/۴ درصد) مثبت و معنی‌دار است.

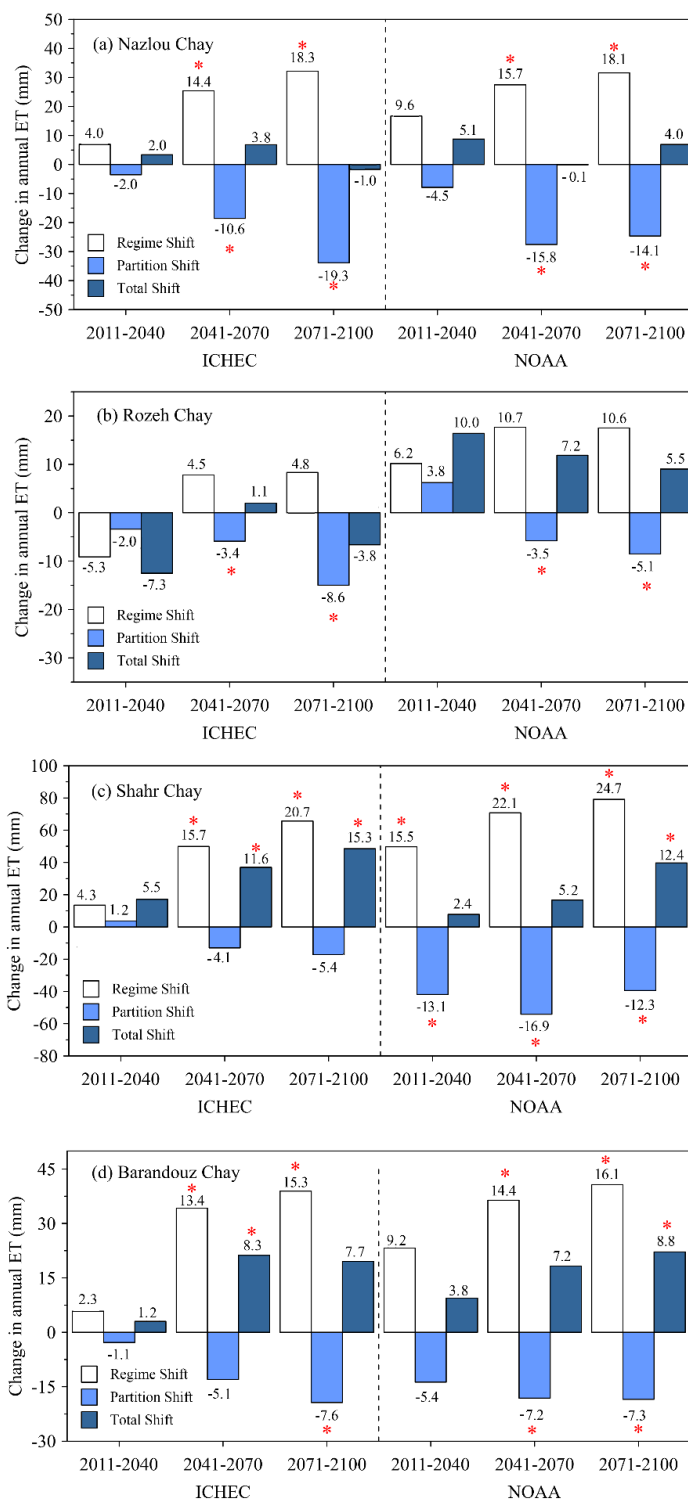


Fig. 7- The regime shifts, partitioning shift and total shifts of annual actual evapotranspiration in three future periods compared to historical period based on the CORDEX data for IC (1) and NO (2) models in the sub-basins of Nazlou Chay (a), Rozeh Chay (b), Shahr Chay (c), and Barandouz Chay (d). *: Significant difference with historical period. Numbers on top of the bars shows the percentage of changes compared to long-term average of historical actual evapotranspiration.

شکل ۷- تغییرات ناشی از رژیم، تغییرات ناشی از افراز و تغییرات کل تبخیر-تعرق واقعی سالانه در سه دوره آینده نسبت به دوره تاریخی بر اساس داده‌های CORDEX برای مدل IC (1) و مدل NO (2) در زیرحوضه‌های نازلوچای (a)، روزه‌چای (b)، شهرچای (c) و باراندوزچای (d). *: اختلاف معنی‌دار با دوره تاریخی. اعداد انتهای ستون‌ها درصد تغییرات را نسبت به میانگین بلندمدت تبخیر-تعرق واقعی دوره تاریخی نشان می‌دهند.

در زیرحوضه باراندوزچای، در دوره آینده نزدیک تغییرات ناشی از رژیم، افراز و تغییرات کل غیرمعنی دار هستند. در دوره آینده میانی، تغییرات ناشی از رژیم برای دو مدل اقلیمی IC و NO (۱۳/۴ و ۱۴/۴ درصد) مثبت و معنی دار است؛ اما در مورد مدل IC تغییرات منفی و غیرمعنی دار ناشی از افراز (۵/۱- درصد) سبب شده که تغییرات کل (۸/۳ درصد) مثبت و معنی دار شوند. اما در مورد مدل NO چون تغییرات منفی ناشی از افراز (۷/۲- درصد) نیز معنی دار است، تغییرات کل (۷/۲ درصد) غیرمعنی دار شده است. در دوره آینده دور، بر اساس هر دو مدل IC و NO، تغییرات معنی دار ناشی از رژیم (به ترتیب ۱۵/۳ و ۱۶/۱ درصد) بیشتر از تغییرات معنی دار ناشی از افراز (۷/۶- و ۷/۳- درصد) بوده و اما تغییرات کل در مورد مدل IC (۷/۷ درصد) غیرمعنی دار، ولی تغییرات کل در مورد NO (۸/۸ درصد) مثبت و معنی دار است.

به طور کلی در همه زیرحوضه‌ها تغییرات ناشی از رژیم شدیدتر از تغییرات ناشی از افراز است و تغییرات ناشی از رژیم در همه زیرحوضه‌ها اغلب مثبت و تغییرات ناشی از افراز اغلب منفی است. اما تغییرات کل، در زیرحوضه‌های مختلف و دوره‌های آینده مختلف، متفاوت است. به طور کلی زمانی که تغییرات ناشی از رژیم بیش از دو برابر تغییرات ناشی از افراز باشد، تغییرات کل تبخیر-تعرق واقعی معنی دار هستند.

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه با هدف پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق واقعی، بر مبنای برون‌دادهای بارش و دمای ریزمقیاس‌نمایی شده دو مدل گردش عمومی جو NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M و ICHEC-EC-EARTH توسط مدل اقلیم منطقه‌ای RCA4، تحت سناریوی RCP8.5، از مدل بیلان آب تورنت وایت برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی چهار زیرحوضه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای در غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه به شرح زیر است:

پیش‌نگری دما و بارش بر اساس مقادیر تصحیح‌اریبی شده داده‌های CORDEX نشان داد که در همه زیرحوضه‌ها و در هر دو مقیاس فصلی و سالانه، هر دو مدل IC و NO، تحت سناریوی RCP8.5، افزایش میانگین دمای هوا را برای آینده پیش‌نگری می‌کنند؛ به طوری که نرخ افزایش دما برای آینده میانی بیشتر از آینده نزدیک و برای آینده دور بیشتر از آینده میانی است. اما در مورد بارش، در همه زیرحوضه‌ها و در هر دو مقیاس فصلی و سالانه تغییرات پیش‌نگری شده توسط هر دو مدل IC و NO، برای هر سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور از نظر آماری غیرمعنی دار است. (Hejabi (2021) نیز با بررسی پیش‌نگری‌های دمای کمینه و بیشینه مبتنی بر سناریوی

RCP8.5 پروژه CORDEX توسط دو مدل IC و NO، افزایش معنی‌داری را برای دمای سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد. (Abbasian et al. (2021) ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های بارش و دمای ۹ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان دادند که در آینده، اقلیم منطقه به سمت شرایط خشک‌تر/گرم‌تر تغییر می‌کند؛ به طوری که میانگین خروجی‌های مدل‌های مورد بررسی، افزایشی در حدود ۴ °C برای دما و کاهش به میزان ۸ درصد در بارش میانگین حوضه در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۰ بر اساس سناریوی RCP8.5 نشان دادند و شدت تغییرات برای سناریوی RCP4.5 کمتر بود. (Ghazi et al. (2023) با استفاده از خروجی‌های هشت مدل گردش عمومی جو پروژه CMIP6، تغییرات آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) بارش را در حوضه دریاچه ارومیه بررسی نمودند. نتایج نشان داد که تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP8.5 بارش حوضه تا ۳/۲۱ و ۷/۱۸ درصد کاهش خواهد یافت. تفاوت در نتایج مطالعات مختلف، ناشی از تفاوت مدل‌های گردش عمومی جو استفاده‌شده، سناریوهای تغییر اقلیم و روش‌های ریزمقیاس‌نمایی است. با توجه به اینکه در مطالعه حاضر، تنها از سناریوی RCP8.5 (سناریوی بدبینانه) استفاده شد، بررسی سایر سناریوها در مطالعات آینده ضرورت می‌یابد. همچنین، با توجه به تفاوت نتایج دو مدل اقلیمی در این مطالعه و عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های اقلیمی، استفاده از تعداد بیشتری از این مدل‌ها به صورت میانگین‌هنگرد^{۱۹} به عنوان ورودی مدل بیلان آب پیشنهاد می‌شود.

- در مقیاس سالانه تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در دو زیرحوضه نازلوچای و روضه‌چای در هیچ یک از دوره‌های آینده معنی‌دار نیست و در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای افزایش معنی‌دار تبخیر-تعرق واقعی محدود به دوره‌های آینده میانی یا دور است.
- در مقیاس فصلی، پاسخ تبخیر-تعرق واقعی به تغییر اقلیم در فصل‌های مختلف، زیرحوضه‌های مختلف و دوره‌های آینده مختلف متفاوت است و بیشترین تغییرات معنی‌دار تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس فصلی مربوط به زیرحوضه شهرچای است. مطالعات پیشین در مورد اثر تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق در منطقه مورد مطالعه، محدود به مؤلفه تبخیر-تعرق پتانسیل بوده و به مؤلفه تبخیر-تعرق واقعی پرداخته نشده است.
- در زیرحوضه‌های شهرچای و باراندوزچای، که بر اساس مطالعه Nasiri et al. (2024) مدل بیلان آب تورنت وایت دارای عملکرد بهتری، نسبت به زیرحوضه‌های نازلوچای و

است. همچنین، با توجه به اینکه در مطالعه حاضر، بر اساس سناریوی تغییر اقلیم RCP8.5، تغییر در مؤلفه‌های بیلان آب پیش‌نگری می‌شود، تمهیدات لازم برای کاهش اثرات تغییر اقلیم از جمله بهینه‌سازی الگوی کشت، افزایش راندمان مصرف آب و مدیریت بهینه منابع آب ضرورت می‌یابد. با توجه به اینکه سطح زیادی از منطقه مورد مطالعه، تحت کشت محصولات آب‌بر از جمله گندم، یونجه و سیب است، تغییر الگوی کشت به سمت محصولات با نیاز آبی کم باید در اولویت قرار گیرد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- The Sixth Assessment Report
- 2- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 3- General Circulation Models
- 4- Mesoscale Features
- 5- Downscaling
- 6- Regional Climate Models
- 7- Coordinated Regional Downscaling Experiment
- 8- World Climate Research Program
- 9- South Asia
- 10- Middle East and North Africa
- 11- Regime Shift
- 12- Partitioning Shift
- 13- Potential Evapotranspiration
- 14- Driving Model
- 15- Systematic Bias
- 16- Linear Scaling
- 17- Budyko
- 18- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 19- Ensemble Mean

روضه‌چای، است، معادله فو دارای عملکرد خوبی در مورد هر دو مدل اقلیمی و همه دوره‌های تاریخی و آینده است.

• در همه زیرحوضه‌ها تغییرات ناشی از رژیم شدیدتر از تغییرات ناشی از افراز است و تغییرات ناشی از رژیم در همه زیرحوضه‌ها اغلب مثبت و تغییرات ناشی از افراز اغلب منفی است. اما تغییرات کل، در زیرحوضه‌های مختلف و دوره‌های آینده مختلف، متفاوت است. به طور کلی، زمانی که تغییرات ناشی از رژیم بیش از دو برابر تغییرات ناشی از افراز باشد، تغییرات کل تبخیر-تعرق واقعی معنی‌دار هستند. در تأیید یافته‌های Maurer et al. (2021) و Hejabi (2021)، به دلیل رابطه غیرخطی شاخص خشکی و شاخص تبخیری، سهم جابه‌جایی ناشی از رژیم و جابه‌جایی ناشی از افراز در تغییرات تبخیر-تعرق واقعی برابر نیستند.

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق واقعی به درک ارتباط متقابل بین اقلیم، پوشش گیاهی و فرایندهای هیدرولوژیکی کمک می‌کند و گزینه‌های مدیریتی منطقی برای حفظ یکپارچگی هیدرولوژیکی سامانه فراهم می‌کند (Liu and Yang, 2010). (Zou et al. (2017). با بررسی تبخیر و تعرق واقعی در دوره تاریخی ۱۹۸۴-۲۰۱۴ در منطقه زراعی Heihe در شمال غربی چین نشان دادند که فعالیت‌های انسانی (شامل کشاورزی و آبیاری) و اقلیم (شامل عوامل بارش و رطوبت نسبی) به ترتیب با نرخ ۶۰/۹۳ درصد و ۲۸/۰۱ درصد سبب افزایش تبخیر-تعرق واقعی در واحد سطح می‌شوند و به طور کلی سهم فعالیت‌های انسانی در افزایش تبخیر-تعرق واقعی به طور معنی‌داری بیشتر از تغییر اقلیم است. همچنین، Yang et al. (2022) نشان دادند که اگرچه بارش بیشترین سهم را در تغییرات تبخیر-تعرق واقعی در شمال غربی چین دارد، سهم این عامل در کاربری‌های اراضی مختلف متفاوت است و بین ۳۱ درصد در مناطق آبیاری شده تا ۸۱ درصد در مناطق استپ تغییر می‌کند. از آنجا که تبخیر-تعرق واقعی هم متأثر از عوامل اقلیمی و هم متأثر از عوامل انسانی است، انجام مطالعات بیشتر در مورد سهم هر یک از این عوامل در تغییرات تبخیر-تعرق واقعی ضرورت دارد. از دیدگاه اقلیمی، افزایش دما منجر به افزایش تقاضای تبخیر جو و در نتیجه سبب افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل می‌شود. اما پاسخ تبخیر-تعرق واقعی به تغییر اقلیم نه تنها به تبخیر-تعرق پتانسیل بلکه به موجودی آب نیز وابسته است. لذا تغییر تبخیر-تعرق واقعی در یک منطقه با محدودیت انرژی اثرات متفاوتی با یک منطقه با محدودیت آب خواهد داشت. در مناطق بررسی شده در این مطالعه که از نظر اقلیمی در گروه مناطق با محدودیت آب قرار دارند، افزایش تبخیر-تعرق نشان‌دهنده نیاز آبی بالاتر گیاهان بوده و این امر از دیدگاه کشاورزی نشان‌دهنده اهمیت بهبود سیستم‌های ذخیره و انتقال آب و سامانه‌های آبیاری، جهت مدیریت مصرف آب در بخش کشاورزی

۵- مراجع

- Abbasian MS, Najafi MR, Abrishamchi A (2021) Increasing risk of meteorological drought in the Lake Urmia basin under climate change: Introducing the precipitation-temperature deciles index. *Journal of Hydrology* 592:125586
- Alizadeh-Choobari O, Ahmadi-Givi F, Mirzaei N, Owlad E (2016) Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. *International Journal of Climatology* 36(13):4276-4286
- Anayah FM, Kaluarachchi JJ (2019) Estimating global distribution of evapotranspiration and water balance using complementary methods. *Atmosphere-Ocean* 57(4):279-294
- Arora VK (2002) The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology* 265(1-4):164-177
- de Oliveira Aparecido LE, Lorençone PA, Lorençone JA, de Meneses KC, da Silva Cabral de Moraes J (2021) Climate changes and their influences in water balance of Pantanal biome. *Theoretical and Applied Climatology* 143(1):659-674
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, Allan RP, Arias PA, Barlow M, ..., Zolina O (2021) Water cycle changes climate change 2021: The physical science basis contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1055-1210
- Du C, Sun F, Yu J, Liu X, Chen Y (2016) New interpretation of the role of water balance in an extended Budyko hypothesis in arid regions. *Hydrology and Earth System Sciences* 20:393-409
- Fathian F, Morid S, Kahya E (2015) Identification of trends in hydrological and climatic variables in Urmia Lake basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 119(3-4):443-464
- Fu B (1981) On the calculation of the evaporation from land surface. *Scientia Atmospherica Sinica* 5:23-31
- Ghazi B, Dutt S, Torabi Haghghi A (2023) Projection of future meteorological droughts in lake Urmia Basin, Iran. *Water* 15(8):1558
- Giorgi F, Jones C, Asrar GR (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin* 58(3):175
- Giorgi F, Mearns LO (1991) Approaches to regional climate change simulation: a review. *Reviews of Geophysics* 29:191-216
- Hejabi S (2021) Estimation of the reference evapotranspiration using the projections of CORDEX Project and investigation of the meteorological variable's contribution in its changes (Case Study: Lake Urmia Basin). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 14(6):1920-1938 (In Persian)
- Hejabi S (2021) Investigation of droughts impacts on water balance components using the Budyko Framework (Case Study: Lake Urmia Basin). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage* 15(5):1118-1130 (In Persian)
- Hejabi S, Rezaeian H, Vazifekhh MA (2022) Evaluation of effective meteorological variables on reference evapotranspiration trend in Lake Urmia Basin. *Irrigation and Water Engineering* 12(4):310-333 (In Persian)
- Iizumi T, Takikawa H, Hirabayashi Y, Hanasaki N, Nishimori M (2017) Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(15):7800-7819
- Jia G, Shevliakova E, Artaxo P, De Noblet-Ducoudré N, Houghton R, House J, Kitajima K, Lennard C, Popp A, Sirin A, Sukumar R, Verchot L (2019) Land-climate interactions. In PR Shukla, J Skea, E Calvo Buendia, V Masson-Delmotte, H-O. Pörtner, DC Roberts, P Zhai, R Slade, S Connors, R van Diemen, M Ferrat, E Haughey, S Luz, S Neogi, M Pathak, J Petzold, J Portugal Pereira, P Vyas, E Huntley, K Kissick, M Belkacemi, J Malley (eds.) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Germany
- John CT (1971) The Thornthwaite water balance model as an estimator of runoff in Southern Ontario. M.Sc. Thesis, University of Windsor, Ontario.
- Liu Q, Yang Z (2010) Quantitative estimation of the impact of climate change on actual evapotranspiration in the Yellow River Basin, China. *Journal of Hydrology* 395(3-4):226-234
- Mather JR (1978) *The climatic water balance in environmental analysis*. DC Heath and Company, Lexington, Massachusetts 239

- Montaseri M, Amirataei, B, Rasouli Majd, N (2020) Studies on implementing the resolution to reduce agricultural water consumption by 40% in the Nazlou, Rozeh Chay, Shahr Chay and Barandooz basins in 2016: Meteorology and Climatology Report. Urmia Lake Restoration Program. Sharif University, Tehran (In Persian)
- Maurer T, Avanzi F, Glaser SD, Bales RC (2021) Drivers of drought-induced shifts in the water balance through a Budyko approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 1-24
- McCabe GJ, Markstrom SL (2007) A monthly water-balance model driven by a graphical user interface (Open-File Report 2007-1088). US Geological Survey
- McCabe GJ, Wolock DM (1999) Future snowpack conditions in the western United States derived from general circulation model climate simulations. *Journal of the American Water Resources Association* 35(6):1473-1484
- Milly PCD (1993) An analytic solution of the stochastic storage problem applicable to soil water. *Water Resources Research* 29:3755-3758
- Mohebzadeh H, Fallah M (2019) Quantitative analysis of water balance components in Lake Urmia, Iran using remote sensing technology. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 13:389-400
- Nasiri F, Zeinalzadeh K, Hejabi S (2024) Application of the Thornthwaite Water Balance Model to evaluate the accuracy of actual evapotranspiration data of GLEAM and GLDAS Databases in the Western Sub-basins of Lake Urmia, Iran. *Water Resources Research* 20(1):37-51 (In Persian)
- Parsinejad M, Rosenberg DE, Ghale YAG, Khazaei B, Null SE, Raja O, Safaie A, Sima S, Sorooshian A, Wurtsbaugh WA (2022) 40-years of Lake Urmia restoration research: Review, synthesis and next steps. *Science of The Total Environment* 832:155055
- Riyahi M, Rooshan G, Ghanghermeh 7A (2018) Monitoring and prediction effect of climate change on alteration of water catchment balance on Golestan Dam 2. *Quantitative Geomorphological Researches* 6(4):32-52 (In Persian)
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94
- Wolock DM, McCabe GJ (1999) Effects of potential climatic change on annual runoff in the conterminous United States. *Journal of the American Water Resources Association* 35(1):341-341
- Yang L, Feng Q, Zhu M, Wang L, Alizadeh MR, Adamowski JF, Wen X, Yin Z (2022) Variation in actual evapotranspiration and its ties to climate change and vegetation dynamics in northwest China. *Journal of Hydrology* 607:127533
- Zhang L, Dawes WR, Walker GR (2001) Response of Mean Annual Evapotranspiration to Vegetation changes at Catchment Scale. *Water Resources* 37:701-708
- Zou M, Niu J, Kang S, Li X, Lu H (2017) The contribution of human agricultural activities to increasing evapotranspiration is significantly greater than climate change effect over Heihe agricultural region. *Scientific Reports* 7(1):8805