

Application of WEAP model in predicting potential evapotranspiration under climate change SSP scenarios

Mahdi Vaziri¹, Nozar Ghahreman^{2*}

¹ M.Sc Graduate Department of Agrometeorology, University of Tehran, Iran

² Associate Professor of Agro meteorology, Department of Irrigation and Reclamation Engineering University of Tehran, Karaj, Iran, Email: nghahreman@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-11-30
Accepted: 2024-1-2

Keywords:
Climate change
Evapotranspiration
ESGF
Karkheh basin
WEAP

ABSTRACT

Climate change has a significant impact on evapotranspiration (ET) as the one of the main components of the hydrological cycle. The main purpose of this research is to project the amount of potential evapotranspiration (ET_p), under RCP scenario comparing to the baseline period using the WEAP model in the selected stations of Karkhe basin, Iran. The 1999-2019 and 2020-2100 years were considered as the baseline and future periods. The projected climatic variables by KIOST-ESM and MPI-ESM1-2-LR climate models under two climate change scenarios of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 and the observed data of the selected stations in Karkheh basin were used to estimate the ET_p for the future and. According to the outputs of the WEAP model, the potential evapotranspiration will increase by 2100. The highest increase was projected under SSP5-8.5 scenario by the MPI-ESM1-2-LR model, with amount of 89 mm in June and by the KIOST-ESM model, 73 mm in May. The lowest values were equal to 26 and -0.5 mm in the months of December and September, respectively. Correspondingly, these values under SSP2-4.5 scenario were estimated as 85.4, 64.3, 23.3 and -4.6 during June, May, December and September compared to the base period, which the latter indicated a decrease for September comparing to the baseline. Also, the amount of potential evapotranspiration in regions with temperate Mediterranean climates will experience more variations comparing to those with arid temperate climates.

Cite this article: Vaziri, M., Ghahreman, N. (2024). Application of WEAP model in predicting potential evapotranspiration under climate change SSP scenarios. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (15), 95-112.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.427943.1183



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل پانزدهم / زمستان ۱۴۰۲ / صفحات: ۹۵-۱۱۲

کاربست مدل WEAP در پیش‌نگری تبخیرتعلق پتانسیل تحت سناریوهای SSP تغییر اقلیم

مهدی وزیری^۱، نوذر قهرمان^{۲*}

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران، رایانامه: nghahreman@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله چکیده

تبخیرتعلق به عنوان یکی از مولفه‌های اصلی چرخه‌ی آبشناسی، از پدیده تغییر اقلیم اثرات قابل توجهی را می‌پذیرد. هدف اصلی این پژوهش برآورد میزان تبخیرتعلق پتانسیل در دوره زمانی آینده و مقایسه آن با دوره پایه با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی جهت اجرای مدل منابع آب WEAP در ایستگاه‌های منتخب حوضه کرخه می‌باشد. دوره‌های ۱۹۹۹-۲۰۱۹ و ۲۱۰۰-۲۰۲۰ به ترتیب به عنوان دوره پایه و دوره آینده در نظر گرفته شد. برون‌داد دو مدل اقلیمی منتخب بر اساس توصیه‌های پیشین بنام‌های MPI-ESM1-2-LR و KIOST-ESM اخذ شده از پایگاه داده‌های اقلیمی ESGF تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 و همچنین داده‌های ایستگاه‌های همدیدی برای حوضه کرخه در برآورد تبخیرتعلق پتانسیل در دوره‌های آینده و پایه استفاده شده است. با توجه به خروجی‌های مدل WEAP میزان تبخیرتعلق پتانسیل تا سال ۲۱۰۰ میلادی روندی افزایشی خواهد داشت، بیشترین میزان افزایش پیش‌نگری شده در مدل MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۸۹ میلی‌متر در ماه ژوئن و در مدل KIOST-ESM به میزان ۷۳ میلی‌متر در ماه بدست آمد. کمترین مقادیر به ترتیب برابر ۲۶ و ۰/۵- میلی‌متر در ماه‌های دسامبر و سپتامبر می‌باشند. متناظراً این مقادیر تحت سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب برابر با ۸۵/۴، ۶۴/۳، ۲۳/۳ و ۴/۶- در ماه‌های ژوئن، می، دسامبر و سپتامبر نسبت به دوره پایه برآورد شد. همچنین میزان تبخیرتعلق پتانسیل در ایستگاه‌هایی با اقلیم مدیترانه‌ای معتدل نسبت به ایستگاه‌هایی با اقلیم خشک معتدل تغییرات بیشتری را تجربه خواهند کرد.

نوع مقاله:

مقاله کامل علمی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۹/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم

تبخیرتعلق

حوضه کرخه

ESGF
WEAP

استناد: وزیری، مهدی؛ قهرمان، نوذر. (۱۴۰۲). کاربرد مدل WEAP در پیش‌نگری تبخیرتعلق پتانسیل تحت سناریوهای SSP تغییر اقلیم. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۵)، ۹۵-۱۱۲.

Doi: 10.30488/CCR.2024.427943.1183

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.



مقدمه

تبخیر تعرق که مجموع تعرق از طریق کانوپی گیاه و تبخیر از خاک، گیاه و سطح آب آزاد است، می‌تواند بزرگترین جزء چرخه هیدرولوژیکی را تشکیل دهد. ارزیابی تبخیر تعرق پتانسیل (ET_p)^۱ دقیق برای بسیاری از کاربردها از جمله برنامه‌ریزی آبیاری، پایش خشکسالی و درک اثرات تغییرات اقلیمی مفید است. تغییر اقلیم به تغییر معنی‌دار افزایشی و یا کاهش‌ی در میانگین عناصر اقلیمی در یک دوره طولانی بیش از ۳۰ سال گفته می‌شود (سازمان هواشناسی جهانی^۲). امروزه تغییر اقلیم به یکی از دغدغه‌های انسان تبدیل شده و مجامع علمی جهانی در این زمینه به مطالعه و بررسی پیامدهای ناشی از این پدیده می‌پردازند. چنین تغییراتی به دلیل تغییرات در فعالیت‌های خورشیدی یا فوران‌های آتشفشانی می‌توانند طبیعی باشند. سانگ^۳ و همکاران، (۲۰۲۲)، سه روش تورنت ویت، هارگریوز سامانی و پنمن-مانتیث را در برآورد سطوح روزانه ET_p در کره جنوبی با استفاده از متغیرهای اقلیمی از مدل‌های جفت شده مقایسه‌ای پروژ ششم cmip برای دوره‌های آینده نزدیک ۲۰۶۰-۲۰۳۱ و دور ۲۰۷۱-۲۱۰۰ را برای دو مسیر اقتصادی-اجتماعی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برآورد کردند. در تمامی روش‌ها میزان ET_p روندی افزایشی را نشان داد. گارسیا^۴ و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از مدل هیدرولوژیکی ارزیابی و برنامه‌ریزی آب (WEAP)^۵ اثرات پدیده تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی را بر بیلان آبی حوضه‌های کوچک در مکزیک تحت سناریوی SSP5-8.5^۶ با استفاده از مدل MPI-ESM1-2-LR برای افق ۲۰۸۱-۲۱۰۰ میلادی را شبیه‌سازی کردند، نتایج نشان داد در مناطق دارای جنگل‌های معتدل، تغییراتی در بیلان آبی عمدتاً به دلیل افزایش تبخیر تعرق (به دلیل افزایش دما و بارندگی) ایجاد می‌شود. حشمتی و همکاران، ۱۳۹۹، در مطالعه‌ای

ET_p در ایستگاه بندرانزلی را با استفاده از دو روش هارگریوز سامانی و تورنت ویت بر اساس داده‌های دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۵ مورد ارزیابی قرار دادند. این مطالعه تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP4.5 و RCP2.6 و RCP8.5 انجام شد. نتایج نشان داد که ET_p از سال ۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ تحت سه سناریو واداشت تابشی افزایش خواهد یافت به جز در روش تورنت ویت که در دوره زمانی ۲۰۷۵-۲۱۰۰ در ماه مارس کاهش پیدا خواهد کرد. در طول دهه ۱۹۹۰ سناریوهای SRES ارائه شدند که به چهار مسیر احتمالی آینده جمعیت، رشد اقتصادی و انتشار گازهای گلخانه‌ای اشاره داشتند. در طی دو دهه اخیر این سناریوها نیازمند بازنگری بوده‌اند بر این اساس سناریوهای RCP توسعه یافتند. ریاحی و همکاران (۲۰۱۷)، SSP ها همچنین جهان‌های پایه متفاوتی را تعریف می‌کنند که ممکن است در غیاب هر گونه تلاش هماهنگ بین المللی برای رسیدگی به تغییرات اقلیم، فراتر از آنچه قبلاً توسط کشورها اتخاذ شده است رخ دهد. بازی و همکاران (۲۰۲۰)، به بررسی تغییرات تبخیر از سطح چاه نیمه‌های دشت سیستان طی دهه‌هایی با استفاده از مدل WEAP و مولد مدل SDSM طی دهه‌های آتی تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج نشان داد که میزان تبخیر در دوره ۲۰۸۰-۲۱۰۰ افزایشی بیش از ۳۰۰ میلی‌متر در سال را تجربه خواهد کرد. کیم^۷ و همکاران (۲۰۲۲)، چارچوبی را برای پیش‌بینی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی آینده با در نظر گرفتن برداشت آب کشاورزی برای سناریوهای مسیر اجتماعی و اقتصادی مشترک (SPP) با استفاده از مدل‌های اقلیمی جهانی مانند KIOST-ESM پیشنهاد کردند، این مطالعه نشان داد که افزایش ET_p در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۱۰۰ میلادی به دلیل افزایش دما علت اصلی فراوانی و شدت خشکسالی است. تکوین فرآیندهای اقلیمی در آینده، بویژه به دلیل برهمکنش‌های عوامل مؤثر بر آن‌ها دارای عدم قطعیت است و نیازمند آزمون سناریوهای مختلف تغییر اقلیم است. قهرمان و

¹ Potential Evapotranspiration

² World Meteorological Organisation (WMO)

³ Song

⁴ García

⁵ Water Evaluation And Planning system

⁶ Shared Socioeconomic Pathways

⁷ Kim

و اسد آباد در حوضه کرخه با استفاده از مدل WEAP انجام شد.

مواد و روش‌ها

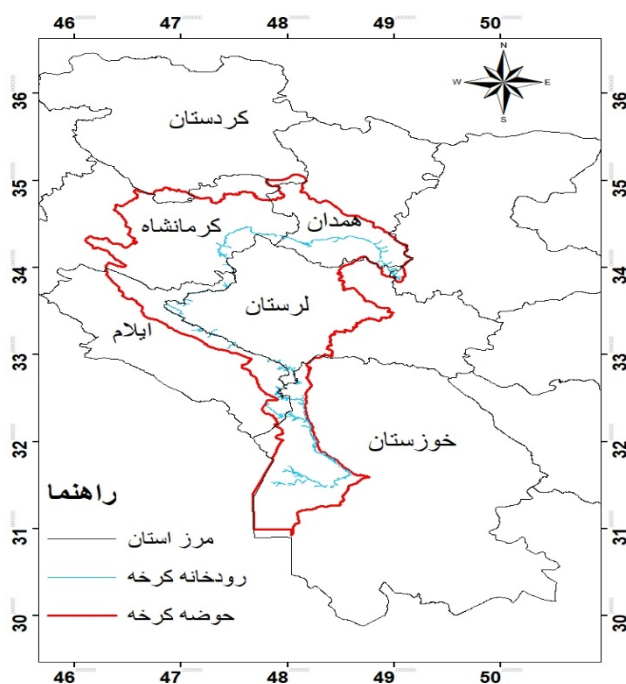
حوضه مطالعاتی: حوضه آبریز رودخانه کرخه با نام اختصاری کرخه بزرگ یکی از حوضه‌های باز ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران، حوضه فرعی به‌شمار می‌رود و زیرمجموعه حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان است. مساحت این حوضه، ۵۱۶۴۳ کیلومتر مربع و رودخانه اصلی آن کرخه است که از نظر مختصات جغرافیایی بین ۴۶°-۰۶' و ۴۹°-۱۰' طول شرقی و ۳۰'-۵۲° و ۳۴°-۵۶' عرض شمالی واقع شده است. این حوضه شامل بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان است. در شکل ۱ موقعیت حوضه کرخه بر روی استان‌ها نشان داده شده است.

سناریوهای SSP: مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) سناریوهایی از تغییرات پیش‌بینی شده اجتماعی-اقتصادی جهانی تا سال ۲۱۰۰ هستند که برای استخراج سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای با سیاست‌های مختلف آب و هوایی استفاده می‌شوند. SSPها دارای چندین جهان پایه هستند زیرا عوامل زمینه‌ای مانند جمعیت، رشد فناوری و اقتصادی می‌توانند منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای گرمایشی در آینده بسیار متفاوتی شوند، حتی بدون سیاست‌های اقلیمی. گزارش ششم ارزیابی IPCC^۱ نتایج دمای پیش‌بینی شده مجموعه‌ای از پنج سناریو را که بر اساس چارچوب SSPs هستند، ارزیابی کرده است. نام این سناریوها شامل کلمه SSP که برگرفته از سناریوهای ۱ تا ۵ SSP هستند و همچنین همراه با سطح مورد انتظار انرژی تابشی در سال ۲۱۰۰ (۹/۱ تا ۵/۸ وات بر مترمربع) می‌باشند (مینشوسن^۲ و همکاران، ۲۰۲۰) که به‌صورت زیر شرح داده شده‌اند:

همکاران (۱۳۹۱)، با استفاده از مدل SIMETAW جهت تولید داده‌های هواشناسی روزانه از روی متوسط‌های بلندمدت ماهانه و نیز برآورد ET_p در دوره پایه ۱۹۶۱-۲۰۰۴ و دو سناریوی اقلیمی انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 و B2 از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 برای دو دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ در ایستگاه مشهد استفاده شد. خروجی‌ها نشان داد ET_p به‌طور متوسط در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و ۲۰۸۰-۲۰۵۰ به ترتیب ۵/۳۵ و ۱۰/۴۹ میلی‌متر در ماه در سناریوی A2 و ۳/۵۴ و ۸/۰۸ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی B2 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت. قهرمان و همکاران (۱۳۹۵)، ET_p را با استفاده از معادله پنمن مانیتث و داده‌های هواشناسی تاریخی دوره پایه ۱۹۹۱-۲۰۰۵ ایستگاه سینوپتیک مشهد را برآورد و با خروجی دو مدل اقلیمی منتخب از مجموعه مدل‌های CMIP5 مقایسه کردند. بر اساس نتایج حاصله، بیشترین افزایش مقدار ET_p در ماه ژانویه تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب با ۱۵/۴٪ و ۱۶/۴٪ افزایش نسبت به دوره پایه و نیز بیشترین مقدار کاهش در ماه اکتبر با ۱۲/۵ و ۱۰ درصد کاهش نسبت به دوره پایه مشاهده شد. از انجایی که دما کمیتی مهم و تاثیرگذار بر ET_p است می‌توان انتظار داشت که در شرایط گرمایش جهانی، ET_p هم افزایش یابد. ضرورت این پژوهش بدان جهت است که با وجود مطالعات صورت گرفته در زمینه تبخیر-تعرق، همچنان تدقیق برآوردهای این کمیت با توجه به عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و توسعه سناریوهای جدید بویژه در حوزه‌های آبریز مهمی نظیر کرخه ضرورت دارد. پدیده تغییر اقلیم می‌تواند با تاثیر بر مولفه‌های کرخه آشناسی کمیت و کیفیت آب در دهه‌های آتی در این حوضه را تحت تاثیر قرار دهد. به‌علاوه کاربری مدل مدیریت آب WEAP تحت سناریوهای جدید تغییر اقلیم در مطالعات بسیار محدودی در ایران مورد بررسی بوده است لذا این تحقیق با هدف پیش‌نگری میزان ET_p تا سال ۲۱۰۰ میلادی و مقایسه آن با دوره پایه در چهار ایستگاه اسلام آباد غرب، بستان، خرم آباد

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Meinshausen



شکل ۱- موقعیت حوضه کرخه بر روی استان‌ها

۸- SSP5-8.5: (توسعه با سوخت فسیلی) این سناریو نشان دهنده پایان مسیرهای قابل قبول در آینده است. SSP5 تنها SSP است که انتشار گازهای گلخانه‌ای به اندازه کافی برای تولید ۸,۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ را دارد.

پایگاه پیش‌نگری اقلیمی ESGF^۱: در این تحقیق از دو سناریوی حد وسط SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 برای پیش‌نگری میزان ET_p در بازه زمانی سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۲۰ میلادی استفاده شد. بدین منظور داده‌های مربوط به بارش، سرعت باد، تابش و رطوبت نسبی از پایگاه داده‌های پیش‌نگری اقلیمی ESGF برای دوره زمانی ۲۱۰۰-۲۰۲۰ میلادی تحت دو سناریوی مذکور با وضوح اسمی ۲۵۰×۲۵۰ کیلومتر، گونه r1ilp1fl و دوره ماهانه مربوط به دو مدل MPI-ESM1-2-LR و KIOST-ESM ایستگاه‌های خرم آباد، اسد آباد، بستان و اسلام آباد دریافت شد. مشخصات ایستگاه‌های استخراج شده از پایگاه پیش‌نگری اقلیمی ESGF در جدول ۱ آورده شده است. تمامی اقلیم‌های تعیین شده در جدول ۱

۱- SSP1-1.9: (پایداری) انتشار بسیار کم گازهای گلخانه‌ای، انتشار گاز CO₂ در حدود سال ۲۰۵۰ به صفر خالص می‌رسد.
۲- SSP1-2.6: (پایداری) انتشار کم گازهای گلخانه‌ای، انتشار گاز CO₂ در حدود سال ۲۰۷۵ به صفر خالص می‌رسد.

۳- SSP2-4.5: (میان‌راه) انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای، انتشار گاز CO₂ تا سال ۲۰۵۰ در حد سطوح فعلی باقی می‌ماند و بعد از آن تا سال ۲۱۰۰ کاهش می‌یابد اما به صفر نمی‌رسد.

۴- SSP3-7.0: (رقابت منطقه‌ای) انتشار بسیار بالای گازهای گلخانه‌ای، انتشار گاز CO₂ تا سال ۲۰۷۵ سه برابر می‌شود.

۵- SSP4-3.4: (نا برابری) واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ به سطح ۳/۴ وات بر متر مربع می‌رسد.

۶- SSP4-6.0: (نا برابری) واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ به سطح ۶ وات بر متر مربع می‌رسد.

۷- SSP5-3.4: (توسعه با سوخت فسیلی) این سناریو از SSP5-8.5 پیروی می‌کند، یک سناریوی پایه افزایشی تا سال ۲۰۴۰ است و پس از آن انتشار خالص به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

^۱ <https://esgf-node.llnl.gov>

بر اساس نقشه تقسیم‌بندی اقلیمی ایران در روش طبقه‌بندی دومازن گسترش داده شده می‌باشند، این نقشه بر اساس تقاطع سه نقشه هم‌بارش سالانه، هم‌دمای سالانه و هم‌دمای میانگین حداقل‌های روزانه در سردترین ماه سال محاسبه و طراحی شده است (خلیلی و همکاران، ۱۴۰۱).

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های استخراج شده از پایگاه پیشنگری اقلیمی ESGF

اقلیم	ارتفاع (متر)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	نام ایستگاه
مدیترانه ای معتدل	۱۱۴۷	۳۳/۴۵۷	۴۸/۳۴۳	خرم آباد
خشک بیابانی معتدل	۱۵	۳۱/۷۱۸	۴۸/۰۲۶	بستان
نیمه خشک معتدل	۱۳۳۵	۳۴/۱۱۳	۴۶/۵۳۳	اسلام آباد
مدیترانه ای معتدل	۱۶۰۷	۳۴/۷۶۴	۴۸/۰۹۸	اسد آباد

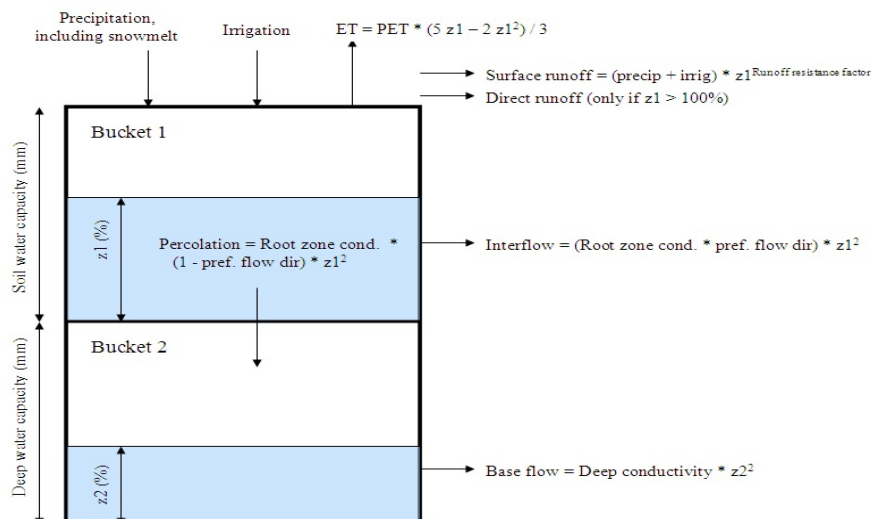
تبخیر تعرق واقعی و پتانسیل، ذخیره آب، حبابه‌ها و اولویت‌های تخصیص، بهره‌برداری از مخازن، تولید برقایی، روندیابی آلودگی و کیفیت آب، ارزیابی آسیب-پذیری و نیازهای اکوسیستم است.

روش رطوبت خاک^۱ در مدل WEAP: این روش حوضه را با دولایه خاک معرفی می‌کند. در لایه خاک بالایی با در نظر گرفتن بارش، رواناب و همچنین تغییر در رطوبت خاک تبخیر تعرق را شبیه‌سازی می‌کند. این روش اجازت توصیف کاربری زمین بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی را می‌دهد. تغییر در رطوبت خاک در لایه پایینی خاک شبیه‌سازی می‌شود. طرح دو لایه‌ای محاسباتی رطوبت خاک بر پایه توابع تجربی است که تبخیر تعرق، رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی و نفوذ عمقی برای یک واحد حوضه را توصیف می‌کند. نفوذ عمقی در داخل واحد حوضه می‌تواند به بدنه‌ی آب سطحی به صورت جریان پایه منتقل شود یا مستقیماً به ذخیره آب زیرزمینی منتقل شود که در شکل ۲ نمای خاک نشان داده شده است (سیبر^۲، ۲۰۱۵).

داده‌های مشاهداتی: داده‌های مشاهداتی مربوط به ایستگاه‌های همدیدی اسلام آباد، بستان، اسد آباد و خرم آباد واقع در حوضه کرخه از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ میلادی شامل: میانگین ماهانه دمای حداقل و حداکثر، تابش، بارش و سرعت باد به عنوان داده‌های ورودی دوره پایه به مدل WEAP از پایگاه سازمان هواشناسی کشور دریافت شد.

نرم افزار مدیریت یکپارچه منابع آب WEAP: WEAP یک برنامه مدیریت منابع آب است که یکی از نیازهای تعریف شده در برنامه تبخیر تعرق می‌باشد. یکی از نرم‌افزارهایی که برای مدلسازی مدیریت یکپارچه منابع آب استفاده میشود، نرم‌افزار سیستم برنامه‌ریزی و ارزیابی آب (WEAP) است که با هدف ارزیابی همگانی و یکپارچه در زمینه‌ی تقاضا، تامین و کیفیت آب بصورت ابزاری علمی برای برنامه‌ریزی منابع آب تدوین شده است. WEAP مدلی است شی‌گرا و قابل برنامه‌ریزی که زمینه مدلسازی مدیریت منابع آب را به صورت یکپارچه فراهم کرده است و می‌توان آن را در سامانه‌های شهری و کشاورزی در یک حوضه آبریز یا در چندین حوضه رودخانه‌ای مورد استفاده قرار داد. این نرم افزار قادر به شبیه‌سازی مولفه‌هایی از جمله رواناب، دبی پایه، تغذیه طبیعی آب‌های زیرزمینی، تحلیل نیازها، برآورد میزان

¹ Soil moisture² Sieber



شکل ۲- نمودار مفهومی و معادلات مورد استفاده در مدل رطوبت خاک (راهنمای مدل WEAP)

در شکل ۲ هر فلش نشانگر ورودی و خروجی‌ها به لایه خاک می‌باشند. در این شکل:

Surface runoff, رواناب سطحی

Direct runoff, رواناب مستقیم

Percolation, نفوذ

Interflow, جریان نشت از لایه ۱

Bucket1, لایه اول خاک

Bucket2, لایه دوم خاک

ET, تبخیر تعرق واقعی

PET, تبخیر تعرق پتانسیل

Base flow, جریان پایه

Irrigation, آبیاری

Precipitation including snow melt

بارش شامل ذوب برف

مقاومت سطحی ۶۹ ثانیه بر متر اصلاح شده است. در این پیاده سازی دو تغییر در معادله انجام شده است: آلپیدو در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ به عنوان تابعی از پوشش برف تغییر می‌کند (اگر چه کاربر می‌تواند این محاسبه را نادیده بگیرد و آلپیدو را مستقیماً مشخص کند)، و کمیت شار گرمایی خاک، G در مقیاس روزانه صرف نظر شده است که فرم نهایی آن به صورت معادله ۱ بیان شده است.

$$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{900}{T + 273} U_2 D \quad (1)$$

که در آن Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa/^\circ C$) است که طبق معادله ۲ محاسبه می‌شود، R_n تابش خالص بر حسب میلی‌متر بر روز، T دما بر حسب درجه سانتی گراد، G شار حرارتی اندازه گیری شده یا تخمین زده شده خاک بر حسب میلی‌متر بر روز، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بر حسب متر بر ثانیه، D کمبود فشار بخار بر حسب کیلو پاسکال و γ ضریب

Deep Conductivity، مقدار هدایت هیدرولیکی (طول بر زمان) مربوط به لایه دوم (عمیق) است. Runoff Resistance Factor، ضریب مقاومت جریان. Root Zone Conductivity، میزان هدایت هیدرولیکی محدوده ریشه در حالت اشباع را بیان می‌کند. Preferred Flow Direction، مسیر جریان را مشخص می‌کند.

$Z1$ ، میزان درصد اشباع عمق لایه اول است.

$Z2$ ، درصدی از ذخیره کل لایه دوم است.

Soil Water Capacity، مقدار ظرفیت نگهداری آب در لایه بالایی خاک را مشخص می‌کند.

Deep Water Capacity، مقدار ظرفیت نگهداری آب در لایه پایینی خاک را نشان می‌دهد.

در محاسبه ET_p در مدل WEAP از فرمول ارائه شده در کتاب Handbook of Hydrology (۱۹۹۳) استفاده شده است. این فرمول همان فرمول پنمن-مانتیت برای گیاه استاندارد چمن با ارتفاع ۰/۱۲ متر با

سایکرومتری بر حسب کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(237.3+T)^2} \quad (2)$$

که در آن، e_s فشار بخار اشباع در دمای T بر حسب کیلو پاسکال است.

$$\gamma^* = \gamma(1+0.33U_2) \quad (3)$$

در این معادله، γ^* ضریب سایکرومتری مخصوص می‌باشد. پس از محاسبه تبخیرتعرق گیاه استاندارد

پنمن-مانتیت که پتانسیل تبخیرتعرق (PET) نامگذاری شده است، مدل WEAP با استفاده از معادله ۴ تبخیرتعرق پتانسیل را محاسبه می‌کند.

$$ET_{potential} = PET \times K_s \quad (4)$$

که در آن $ET_{potential}$ تبخیرتعرق پتانسیل می‌باشد و K_s ضریب سطح محسوب می‌شود که این ضریب برای سطوح با کاربری اراضی متفاوت به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- ضرایب K_s برای سطوح مختلف (آلن و همکاران، ۱۹۹۸)

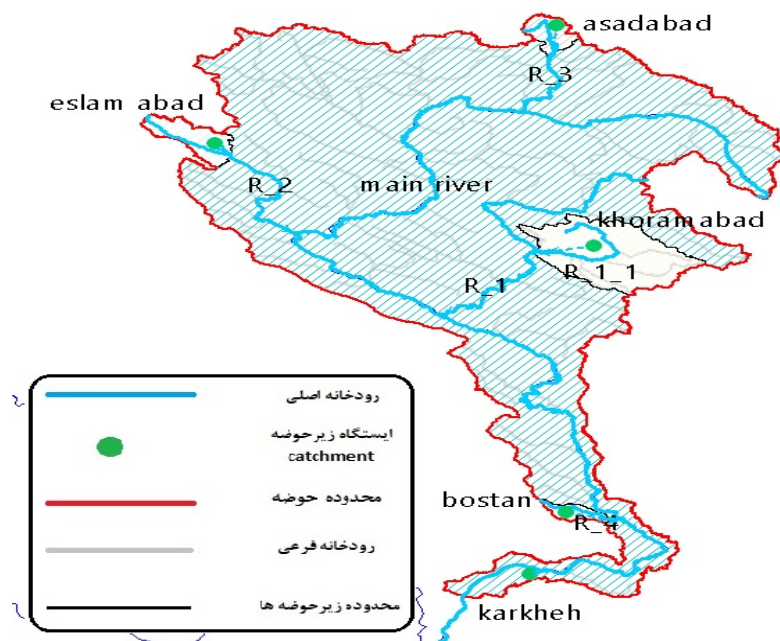
ضریب K_s	عارضه
۰/۸۵	درختچه‌ها (shrubs)
۰/۹۱	جنگل‌های درختان خزان‌دار (deciduous forest)
۰/۷۵	مراعت و چمن‌زارها (grassland)
۰/۹۵	مناطق کشاورزی (agriculture)
۰/۳	مناطق بایر و یا با پوشش گیاهی پراکنده (barren fields)
۰/۱۵	مناطق شهری (urban lands)
۱/۲	زمین‌های باتلاقی و آب‌های آزاد (wet-land)

الگوی ترسیمی حوضه کرخه و زیرحوضه‌ها در مدل WEAP: هنگامی که یک حوضه در مدل WEAP ایجاد می‌شود، WEAP به‌طور خودکار یک شی رودخانه‌ای (خط آبی) را بر اساس مسیر عبور از حوضه با بیشترین مقدار جریان ایجاد می‌کند که مسیر جریان از سمت بالادست به پایین دست (نقطه خروجی حوضه) حوضه است. این حالت می‌تواند نوع پوشش اراضی را هم تعیین کند به گونه‌ای که مدل داده‌های کاربری اراضی را از پایگاه تغییر اقلیم آژانس فضایی اروپا (ESA-CCI-LC)^{۱۳} دریافت می‌کند. این داده‌ها شامل ۲۲ دسته مختلف پوشش اراضی است که می‌توان بنا به نیاز خود نام آن‌ها را تغییر داد. همچنین WEAP دسترسی به مجموعه داده‌های آب و هوایی شبکه‌بندی شده جهانی، شامل داده‌های دما، بارندگی و سرعت باد را در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه برای سال‌های ۲۰۱۰-۱۹۴۸ با وضوح فضایی ۰/۲۵ درجه

(تقریباً ۲۸ کیلومتر) را فراهم می‌کند. این مجموعه داده آب و هوای جهانی توسط گروه هیدرولوژی زمینی در دانشگاه پرینستون^{۱۴} که داده‌های تحلیل مجدد را با مشاهدات ترکیب می‌کند ایجاد شده است. به منظور شبیه‌سازی فرآیندهای حوضه مانند تبخیرتعرق، رواناب، نفوذ و آبیاری، در مدل WEAP پنج روش قابل انتخاب است. این روش‌ها عبارتند از: ۱- روش نیازهای آبیاری ۲- روش بارش-رواناب ۳- روش رطوبت خاک ۴- روش MABIA ۵- روش رشد گیاه که در این تحقیق از روش رطوبت خاک برای برآورد ET_p در سطح حوضه کرخه استفاده شده است. الگوی ترسیمی حوضه کرخه و زیر حوضه‌ها در مدل WEAP به صورت شکل ۳ می‌باشد.

¹³ European Space Agency's Climate Change Initiative Land Cover

¹⁴ Princeton



شکل ۲- الگوی ترسیمی حوضه کرخه در مدل WEAP

ضریب سطوح است. این ضریب با توجه به کاربری اراضی ایستگاه‌های مختلف طبق مدل WEAP حدود ۰/۷۳ در نظر گرفته شده است.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left[\frac{890}{T + 273} \right] U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \times K_c \quad (5)$$

در معادله ۵، e_s فشار بخار اشباع در دمای T بر حسب کیلو پاسکال (kPa) و e_a فشار بخار در دمای T بر حسب کیلو پاسکال، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری، R_n تابش خالص، و G شار گرمای خاک می‌باشد.

آزمون‌های آماری:

R^2 : ضریب تعیین یا ضریب تشخیص، نسبت تغییرات متغیر وابسته را که می‌توان به متغیر مستقل نسبت داد اندازه‌گیری می‌کند. به بیان ساده می‌توان گفت ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد تغییرات متغیرهای وابسته در یک مدل رگرسیونی با متغیر مستقل تبیین می‌شود.

محاسبه تبخیر تعرق پتانسیل با روش فائو-پنمن-مانتیت: برای اعتبارسنجی خروجی‌های مدل WEAP، خروجی‌های مدل برای دوره پایه با مقادیر محاسبه شده توسط رابطه فائو-پنمن-مانتیت مقایسه شد. معادله پنمن-مانتیت فائو به عنوان روشی که تبخیر تعرق سطح مرجع را بدون ابهام تعیین و نیز روشی که مقادیر تبخیر تعرق سطح مرجع در تمامی مناطق و اقلیم‌ها را به‌طور یکنواخت محاسبه می‌کند، انتخاب شده است. با تعریف گیاه مرجع به عنوان یک گیاه فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبدو) ۰/۲۳ که تبخیر آن شباهت بسیار به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و دسترسی به آب کافی دارد، روش پنمن-مانتیت فائو توسعه یافت معادله فائو-پنمن-مانتیت به صورت معادله ۵ ارائه شده است. تبخیر تعرق مرجع همان ET_p برای یک پوشش گیاهی بخصوص است که این پوشش گیاهی چمن یا یونجه است، در اینجا برای تبدیل تبخیر تعرق مرجع به ET_p در سطحی غیر از چمن، تبخیر تعرق مرجع را در ضریب سطوح (K_c) ضرب شده تا به ET_p تبدیل شود. در اینجا K_c ضریب گیاهی نیست و

¹ R-squared correlation

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(p_i - \bar{p})]^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \times \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (6)$$

در معادله ۶، o_i مقادیر اندازه‌گیری شده (مقادیر مشاهداتی)، p_i مقادیر محاسبه شده مدل، n تعداد مشاهدات، $\bar{o}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده (مقادیر مشاهداتی) و $\bar{p}$ میانگین مقادیر محاسبه شده است. NSE: ضریب ناش-ساتکلیف ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. در این مطالعه جهت ارزیابی نتایج شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی در دوره آماری انتخابی از این ضریب نیز استفاده شده است که در معادله ۷ نشان داده شده است.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_i (ET_{o,m,i} - ET_{o,s})^2}{\sum_i (ET_{o,m,i} - \overline{ET_{o,m}})^2} \quad (7)$$

که در آن $\overline{ET_{o,m}}$ میانگین تبخیر تعرق پتانسیل دوره

مشاهداتی، $ET_{o,m,i}$ مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل مشاهداتی، $ET_{o,s}$ مقادیر تبخیر تعرق پتانسیل محاسباتی. اگر میزان این ضریب بین ۰/۷۵ تا ۱ باشد عملکرد بسیار خوب، مابین ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ عملکرد خوب، مابین ۰/۵ تا ۰/۶۵ عملکرد رضایت بخش و کمتر از ۰/۵ عملکرد غیرقابل قبول می‌باشد (Kult و همکاران، ۲۰۱۴).

نتایج و بحث

خروجی‌های مدل WEAP در برآورد میزان ET_p برای چهار ایستگاه مطالعاتی اسلام آباد غرب، بستان، خرم‌آباد و اسد آباد برای دوره پایه ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ میلادی به شرح جدول ۳ بدست آمد. همچنین ET_p محاسباتی از رابطه فائو-پنمن-مانتیت برای دوره پایه (۲۰۱۹-۱۹۹۹) با استفاده از داده‌های مشاهداتی به شرح جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۳- ET_p محاسباتی در مدل WEAP برای دوره پایه بر حسب میلی‌متر در ماه

ماه	بستان	اسلام آباد	اسدآباد	خرم آباد
Jan	۳۸/۴	۱۹/۷	۲۶/۵	۳۰/۳
Feb	۶۳/۲	۲۷/۷	۳۷/۴	۴۱/۵
Mar	۱۰۵/۵	۴۹/۸	۶۹/۴	۷۰/۳
Apr	۱۵۰/۵	۷۳/۷	۹۸/۱	۹۸/۹
May	۲۰۶/۲	۹۹/۵	۱۳۱/۱	۱۴۴/۲
Jun	۲۵۷/۹	۱۳۹/۶	۱۷۰/۸	۱۹۰/۳
Jul	۲۵۱/۷	۱۵۵/۶	۱۸۹/۱	۱۹۸/۹
Aug	۲۱۵/۷	۱۴۲/۳	۱۶۲/۹	۱۸۲/۹
Sep	۱۷۰/۵	۱۰۵/۵	۱۲۴/۰	۱۴۳/۰
Oct	۱۱۶/۲	۶۲/۰	۷۹/۷	۹۳/۱
Nov	۶۸/۰	۳۱/۶	۳۸/۳	۴۹/۴
Dec	۴۵/۶	۲۱/۶	۲۵/۷	۳۳/۶

جدول ۴- ET_p محاسباتی در معادله پنمن-مانتیت برای دوره پایه بر حسب میلی‌متر در روز

ماه	اسلام آباد	خرم آباد	بستان	اسد آباد
Jan	۱/۹	۲/۷	۲/۹	۲/۱
Feb	۱/۸	۲/۷	۳/۵	۲/۱
Mar	۳/۳	۴/۰	۵/۵	۴/۲
Apr	۷/۵	۵/۹	۸/۵	۴/۹
May	۴/۹	۸/۶	۱۱/۸	۶/۶
Jun	۸/۹	۱۲/۳	۱۵/۲	۹/۰
Jul	۱۱/۲	۱۳/۶	۱۴/۹	۱۰/۸

Aug	۱۰/۴	۱۲/۸	۱۲/۹	۹/۸
Sep	۱۰/۳	۱۰/۹	۱۱/۴	۷/۹
Oct	۵/۵	۶/۰	۶/۶	۵/۴
Nov	۲/۷	۳/۶	۴/۲	۲/۶
Dec	۲/۴	۲/۴	۲/۹	۲/۰

با برون‌داد دو مدل KIOST-ESM و MPI-ESM1-2- LR تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 اجرا شد. برای هر یک از ایستگاه‌های منتخب حوضه کرخه در جداول ۵ تا ۸ ارائه شده است.

با توجه به نتایج آزمون‌های آماری اعتبارسنجی مدل WEAP برای دوره پایه با ضریب ناش ساتکلیف (NSE) ۰/۶۶ و همچنین ضریب R^2 برابر با ۰/۹۷ در سطح خوب برآورد شد. مقادیر پیش‌نگری شده ET_p با مدل WEAP برای سال‌های ۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی که

جدول ۵- ET_p خروجی از مدل WEAP با استفاده از مدل KIOST-ESM تحت سناریوی SSP2-4.5 بر حسب میلی‌متر در ماه

ماه	اسد آباد	بستان	خرم آباد	اسلام آباد
Jan	۵۱/۸	۹۳/۰	۵۸/۷	۵۲/۲
Feb	۷۴/۸	۱۲۳/۰	۸۱/۴	۷۳/۲
Mar	۱۱۳/۲	۱۶۸/۴	۱۱۹/۳	۱۰۷/۵
Apr	۱۵۴/۳	۲۱۰/۳	۱۵۸/۰	۱۴۴/۱
May	۱۹۴/۶	۲۶۴/۶	۱۹۵/۸	۱۸۳/۳
Jun	۲۲۰/۸	۲۹۳/۸	۲۲۰/۸	۲۰۹/۵
Jul	۲۰۸/۳	۲۶۵/۹	۲۰۸/۶	۱۹۴/۱
Aug	۱۷۱/۴	۲۲۰/۵	۱۷۳/۴	۱۵۶/۹
Sep	۱۲۱/۱	۱۶۵/۸	۱۲۵/۷	۱۱۲/۲
Oct	۷۴/۱	۱۱۳/۴	۸۰/۱	۷۱/۴
Nov	۴۷/۲	۸۰/۵	۵۳/۶	۴۶/۸
Dec	۴۰/۰	۷۴/۲	۴۶/۷	۴۰/۶

جدول ۶- ET_p خروجی از مدل WEAP با استفاده از مدل MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوی SSP2-4.5 بر حسب میلی‌متر در ماه

ماه	اسد آباد	بستان	خرم آباد	اسلام آباد
Jan	۳۸/۶	۶۸/۲	۵۶/۶	۴۵/۹
Feb	۶۰/۶	۹۲/۶	۸۱/۷	۶۵/۵
Mar	۱۰۵/۳	۱۳۹/۸	۱۲۹/۴	۱۰۲/۹
Apr	۱۶۵/۷	۱۹۶/۹	۱۹۰/۵	۱۴۹/۲
May	۲۲۵/۵	۲۳۷/۴	۲۴۷/۰	۱۹۲/۸
Jun	۲۷۶/۸	۲۸۸/۴	۳۰۱/۷	۲۳۳/۳
Jul	۲۹۲/۲	۲۷۹/۴	۳۱۱/۶	۲۴۲/۳
Aug	۲۷۷/۳	۲۵۵/۵	۲۹۲/۲	۲۱۶/۸
Sep	۲۲۱/۳	۱۹۹/۱	۲۳۲/۸	۱۶۷/۳
Oct	۱۴۶/۰	۱۴۱/۰	۱۵۶/۶	۱۰۸/۶
Nov	۷۵/۲	۹۹/۵	۹۴/۲	۷۳/۳
Dec	۴۲/۷	۶۹/۱	۶۰/۳	۴۷/۸

جدول ۷- ET_p خروجی از مدل WEAP با استفاده از مدل KIOST-ESM تحت سناریوی SSP5-8.5 بر حسب میلی‌متر در ماه

اسلام آباد	خرم آباد	بستان	اسد آباد	ماه
۵۷/۰	۶۱/۳	۹۶/۵	۵۴/۱	Jan
۷۹/۲	۸۶/۰	۱۲۸/۹	۷۹/۱	Feb
۱۱۱/۳	۱۲۲/۳	۱۷۱/۷	۱۱۶/۵	Mar
۱۴۸/۸	۱۶۲/۵	۲۱۴/۸	۱۵۹/۱	Apr
۱۹۱/۰	۲۰۴/۲	۲۷۵/۱	۲۰۳/۳	May
۲۱۳/۱	۲۲۵/۴	۲۹۸/۹	۲۲۵/۸	Jun
۱۹۷/۸	۲۱۲/۶	۲۷۰/۲	۲۱۲/۹	Jul
۱۶۰/۸	۱۷۷/۲	۲۲۴/۴	۱۷۵/۵	Aug
۱۱۷/۴	۱۲۹/۴	۱۶۹/۹	۱۲۴/۲	Sep
۷۵/۶	۸۲/۷	۱۱۵/۶	۷۶/۵	Oct
۵۱/۰	۵۵/۶	۸۲/۷	۴۸/۹	Nov
۴۵/۱	۴۸/۵	۷۷/۲	۴۱/۴	Dec

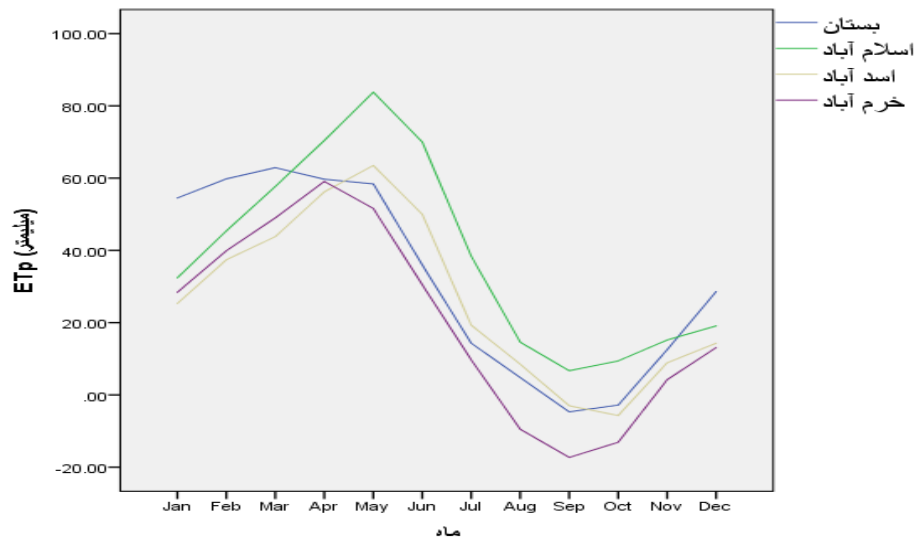
جدول ۸- ET_p خروجی از مدل WEAP با استفاده از مدل MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوی SSP5-8.5 بر حسب میلی‌متر در ماه

اسلام آباد	خرم آباد	بستان	اسد آباد	ماه
۵۰/۲	۶۲/۶	۷۳/۵	۴۴/۰	Jan
۶۸/۳	۸۶/۱	۹۶/۴	۶۴/۹	Feb
۱۰۶/۳	۱۳۶/۵	۱۴۴/۵	۱۱۳/۵	Mar
۱۴۹/۶	۱۹۴/۰	۱۹۶/۶	۱۷۰/۰	Apr
۱۹۵/۱	۲۵۲/۴	۲۳۹/۹	۲۳۱/۹	May
۲۳۴/۶	۳۰۴/۷	۲۹۱/۹	۲۸۳/۱	Jun
۲۴۲/۸	۳۱۸/۵	۲۷۵/۱	۲۹۹/۴	Jul
۲۲۰/۶	۲۹۱/۱	۲۵۵/۷	۲۸۱/۶	Aug
۱۷۰/۸	۲۳۶/۵	۲۰۳/۴	۲۲۵/۶	Sep
۱۰۹/۳	۱۶۰/۸	۱۴۶/۰	۱۴۸/۷	Oct
۷۳/۲	۹۴/۰	۱۰۱/۰	۷۵/۶	Nov
۴۹/۸	۶۲/۹	۷۲/۵	۴۵/۲	Dec

میزان ET_p برای دوره آینده ۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی نسبت به دوره پایه ۱۹۹۹-۲۰۱۹ میلادی تحت سناریوی‌های SSP5-8.5 و SSP5-8.5 در مدل MPI-ESM1-2-LR روندی کاملاً افزایشی را نشان داد که بیشترین میزان افزایش در ماه ژوئن به میزان ۸۹ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی SSP5-8.5 و ۸۵/۴ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه ژوئن برآورد شد همچنین کمترین آن در ماه دسامبر به میزان ۲۶ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی SSP5-8.5 و ۲۳/۳ میلی‌متر در ماه تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه دسامبر پیش‌نگری شد اما میزان ET_p در مدل

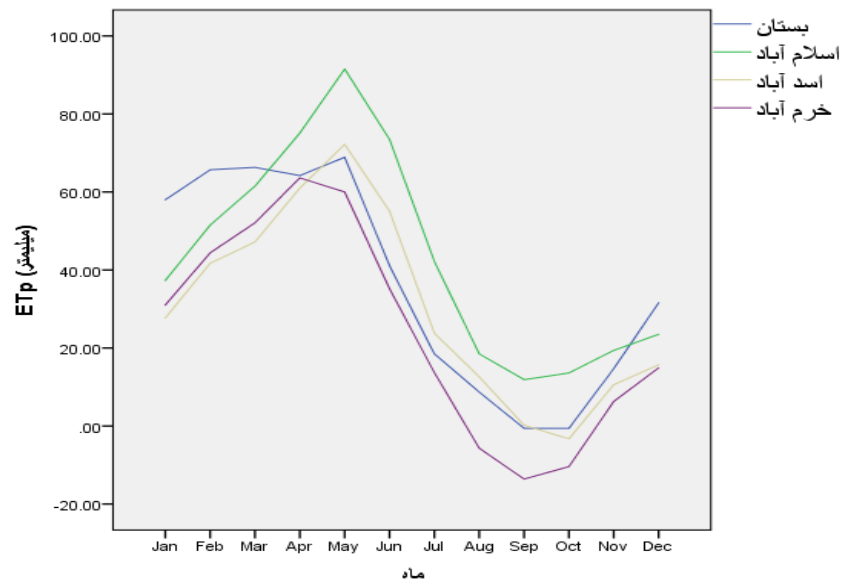
KIOST-ESM برای دوره آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش را در ماه می به میزان ۷۳/۲ میلی‌متر در ماه و تحت سناریوی SSP2-4.5 بیشترین افزایش به میزان ۶۴/۳ میلی‌متر در ماه برای ماه می پیش‌نگری شد. اما میزان ET_p در آینده (تا سال ۲۱۰۰ میلادی) در ماه‌های سپتامبر و اکتبر در مدل KIOST-ESM تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۴/۶، ۳، ۰/۵ و ۰/۲ کاهش را نسبت به دوره پایه خواهند داشت. میزان تغییرات ET_p برای هر ایستگاه برای دوره آینده نسبت به دوره پایه در هریک از مدل‌ها و

تحت سناریوهای مذکور در اشکال ۴ تا ۷ آورده شده است. تمامی مقادیر منفی در اشکال مذکور به معنای کاهش میزان ET_p نسبت به دوره پایه می‌باشد.



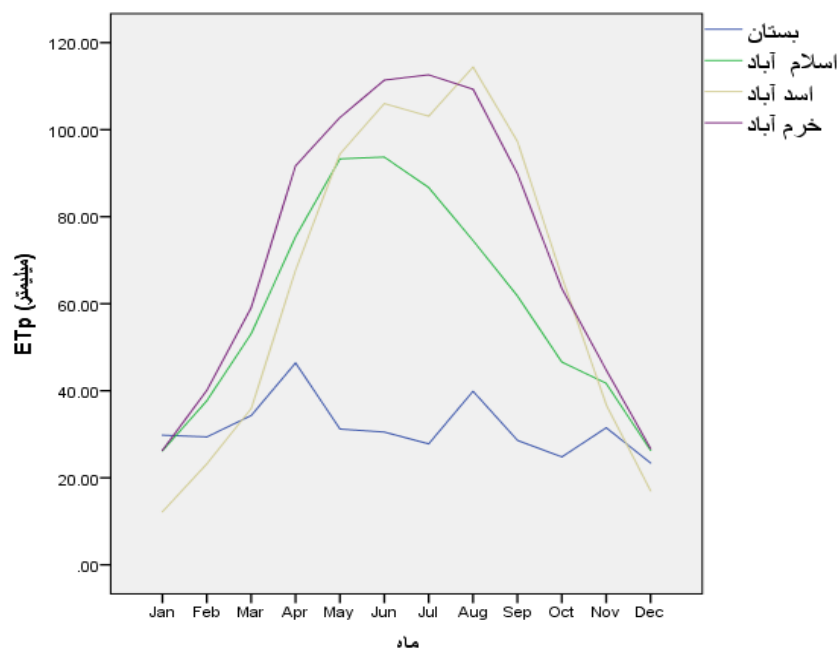
شکل ۴- نمودار تغییرات ET_p برای دوره آینده در مدل KIOST-ESM

تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره پایه بر حسب میلی‌متر در ماه



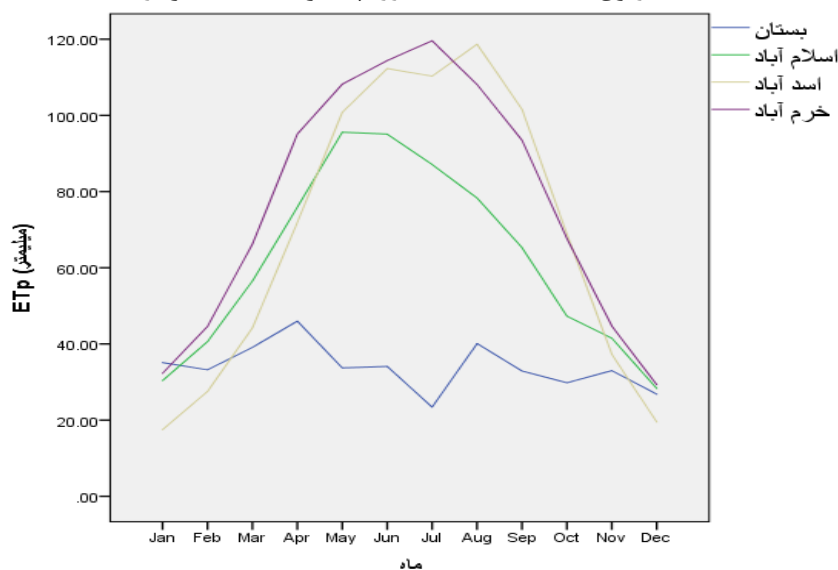
شکل ۵- نمودار تغییرات ET_p برای دوره آینده در مدل KIOST-ESM

تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه بر حسب میلی‌متر در ماه



شکل ۶- نمودار تغییرات ET_p برای دوره آینده در مدل MPI-ESM1-2-LR

تحت سناریوی SSP2-4.5 نسبت به دوره پایه بر حسب میلیمتر در ماه



شکل ۷- نمودار تغییرات ET_p برای دوره آینده در مدل MPI-ESM1-2-LR تحت

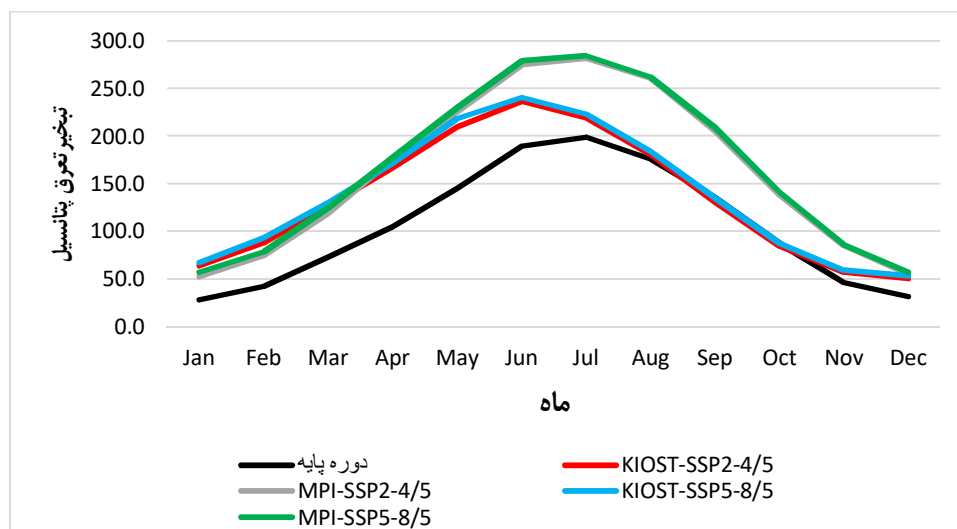
سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه بر حسب میلیمتر در ماه

اقلیم خشک بیابانی معتدل تغییرات کمی را از خود نشان داد، همچنین بیشترین میزان تغییرات اقلیمی در میزان ET_p در مدل MPI-ESM1-2-LR تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه خرم‌آباد با اقلیم مدیترانه‌ای معتدل و کمترین میزان تغییرات اقلیمی در میزان ET_p در مدل MPI-ESM1-2-LR

با توجه به اشکال ۴ تا ۷ بیشترین میزان تغییرات اقلیمی در میزان ET_p در مدل KIOST-ESM تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه اسلام‌آباد با اقلیم مدیترانه‌ای معتدل و میزان تغییرات اقلیمی در میزان ET_p در مدل KIOST-ESM تحت دو سناریوی مذکور برای ایستگاهی مانند بستان با

گرفت. با توجه به شکل ۸ میتوان نتیجه گرفت میزان ET_p در افق زمانی ۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی نسبت به دوره پایه ۲۰۱۹-۱۹۹۹ روندی افزایشی را خواهد داشت که این افزایش در ماه‌های گرم سال برای حوضه کرخه مشهودتر است.

تحت دو سناریوی مذکور برای ایستگاه بستان با اقلیم خشک بیابانی معتدل برآورد شد. پس می‌توان نتیجه گرفت ET_p در مناطقی با اقلیم‌های مدیترانه‌ای معتدل نسبت به مناطقی با اقلیم‌های خشک بیابانی معتدل بیشتر تحت تاثیر پدیده‌ی تغییر اقلیم قرار خواهند



شکل ۸- نمودار میزان تغییرات ET_p برای دوره آینده در دو مدل KIOST-ESM و MPI-ESM1-2-LR

تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه بر حسب میلی‌متر در ماه

اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر تعرق روزانه در مدل‌های با ساختار ریاضی متفاوت در اقلیم‌های مختلف ایران با بکارگیری متغیرهای های کمینه دما، بیشینه دما، بارش در مقیاس روزانه برای دوره ۲۰۳۶-۲۰۱۷ تحت سناریوهای A2، B1A، B1 و شبیه‌سازی کردند، نتایج به دست آمده حاکی از افزایش دما و کاهش بارندگی و همچنین افزایش تبخیر تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف بود. احمدی و همکاران (۲۰۲۰)، میزان بارش و دما را به عنوان پارامترهای مهم اقلیمی برای افق زمانی ۲۰۲۰-۲۰۹۰ میلادی نسبت به دوره پایه ۲۰۱۷-۱۹۸۰ برای حوضه رودخانه کرخه با استفاده از مدل آزمایشی CORDEX تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کردند، نتایج نشان داد میزان بارندگی سالانه نسبت به دوره پایه کاهش و میزان دما افزایش می‌یابد که و متناظرًا میزان تبخیر تعرق نیز روندی افزایشی خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

مطالعات دیگری در مناطق مشابه کشور، این یافته‌ها را تایید می‌نماید. طالب مراد و همکاران (۲۰۲۱)، تبخیر تعرق مرجع را تا سال ۲۰۹۰ میلادی با فرض سه سناریو انتشار A1، A1B و B1 در دشت بهار استان همدان پیش‌نگری کردند. نتایج حاکی از افزایش میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه در هر سه سناریو بود. بر اساس پیش‌نگری‌ها بیشتر افزایشی که در میانگین تبخیر تعرق مرجع سالانه رخ می‌دهد به دلیل افزایش قابل توجه تبخیر تعرق مرجع ماهانه در ماه‌های گرم سال است. رحیمی (۱۴۰۲)، با بررسی تغییرات آب و هوایی در دو ایستگاه کرمانشاه و خرم‌آباد واقع در حوضه کرخه برای دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه، نشان داد که تحت سناریوی A2، مقدار بارش حدود ۱۱ درصد و میانگین دمای حداقل و حداکثر، حدود ۵ درجه افزایش خواهند داشت. برای سناریوی B2، مقدار بارش حدود ۷ درصد و مقدار میانگین دمای حداقل و حداکثر، حدود ۳ درجه افزایش خواهند داشت. پس به دنبال آنها میزان ET_p نیز افزایش خواهد یافت. خادمپور و همکاران (۱۳۹۸)،

مشهودتر خواهد بود. اما در ماه‌های سپتامبر و اکتبر در مدل KIOST-ESM تحت دو سناریو مذکور میزان ET_p روندی کاهشی را تجربه خواهد کرد. میزان ET_p در ایستگاه‌های با اقلیم مدیترانه‌ای معتدل نسبت به ایستگاه‌هایی با اقلیم خشک بیابانی معتدل تاثیر پذیری بیشتری از پدیده تغییر اقلیم خواهند داشت. به طور کلی میزان تبخیر تعرق در منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آتی پیش‌نگری افزایش پیدا خواهد کرد که می‌تواند باعث کاهش ذخایر منابع آبی، کاهش رطوبت خاک، افزایش نیاز آبی گیاهان در منطقه گردد که کشاورزی منطقه را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

با توجه به اهمیت برآورد تبخیر تعرق در مطالعات کشاورزی و مدیریت منابع آب بویژه در شرایط تغییرات اقلیمی، در این پژوهش با استفاده از مدل برنامه‌ریزی منابع آب WEAP و خروجی مدل‌های KIOST-ESM و MPI-ESM1-2-LR تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تغییرات ET_p با توجه به تغییرات اقلیمی احتمالی در چهار ایستگاه خرم‌آباد، بستان، اسلام‌آباد و اسدآباد واقع در حوضه کرخه مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که ET_p از سال ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تحت سناریوهای منتخب نسبت به دوره پایه روندی افزایشی را خواهد داشت که این افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5

منابع

۱. ابراهیم‌پور، میثم، قرمان، نوذر، و لیاقت، عبدالمجید. ۱۳۹۱. استفاده از مدل SIMETAW جهت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و بررسی اثر تغییر اقلیم بر تبخیر تعرق پتانسیل (مطالعه موردی: مشهد). تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۳(۴). ۳۵۳-۳۶۰.
۲. خلیلی، علی، بذرافشان، جواد، و چراغعلی‌زاده، مجید. ۱۴۰۱. بررسی تطبیقی نقشه‌های اقلیمی ایران در طبقه‌بندی دمارتن گسترش داده شده و کاربست روش برای پهنه‌بندی اقلیم جهان. هواشناسی کشاورزی. ۱۰(۱). ۱۶-۳.
۳. حشمتی، فردوس، و سیاری، نسرين. ۱۴۰۰. بررسی تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل در شرایط اقلیمی آینده تحت سناریوهای واداشت تابشی (مطالعه موردی: ایستگاه بندر انزلی). هواشناسی کشاورزی. ۹(۱). ۶۳-۷۶. doi:10.22125/agmj.2021.269483.1109.
۴. خادم‌پور، فهیمه، خزیمه نژاد، حسین، و امیرآبادی زاده، مهدی. ۱۳۹۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر تعرق روزانه در مدل‌های با ساختار ریاضی متفاوت در اقلیم‌های مختلف ایران. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۳(۱). ۱۴۹-۱۶۲. doi:10.22092/jwra.2019.119121.
۵. دوستان، رضا، و علیجانی، بهلول. ۱۳۹۴. تغییر اقلیم در ایران با رویکرد سینوپتیک. جغرافیا و توسعه ناحیه-ای. ۱۳(۲) (پیاپی ۲۵). ۸۹-۱۱۳.
۶. رحیمی بندرآبادی، سیم. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی خشکسالی هواشناسی حوضه کرخه تحت سناریوهای تغییر اقلیم. مطالعات علوم محیط زیست. ۸(۳). ۶۹۱۱-۶۹۲۱. doi:10.22034/jess.2023.378847.1938.
۷. قهرمان، نوذر، بابائیان، ایمان، و طباطبائی، سید محمد رضا. ۱۳۹۵. ارزیابی پس‌پردازش برون‌دادهای دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد). فیزیک زمین و فضا. ۴۲(۳). ۶۸۷-۶۹۶. doi:22059/jesphys.2016.57730.
8. Ahmadi, H., Rostami, N., & Dadashi-Roudbari, A. 2020. Projected climate change in the Karkheh Basin, Iran, based on CORDEX models. Theoretical and Applied Climatology, 142(1-2), 661-673. doi.org/10.1007/s00704-020-03335-9.
9. Ali, A., Alizadeh, H., Tajrishy, M., & Abrishamchi, A. 2007. Water resources management scenario analysis in Karkheh River Basin, Iran, using WEAP model. Hydrological Science and Technology, 23(1), 1-12.
10. Allen, R. G. et al. 1998. Crop evapotranspiration -guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, ISBN:92-5-104219-5.

17. Riahi, K. et al. 2017. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *global environmental change: Human and Policy Dimensions*, 42, pp. 153–168. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
18. Ruiz-García, V. H., Asensio-Grima, C., Ramírez-García, A. G., & Monterroso-Rivas, A. I. 2023. The hydrological balance in micro-watersheds is affected by climate change and land use changes. *Applied Sciences*, 13(4), 2503. doi.org/10.3390/app13042503.
19. Sieber, J. 2015. Water Evaluation and Planning System. <https://www.weap21.org>. accessed 14 July 2023.
20. Song, Y. H., Chung, E., & Shahid, S. 2022. Uncertainties in evapotranspiration projections associated with estimation methods and CMIP6 GCMs for south Korea. *Science of the Total Environment*, 825, 153953. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153953.
21. Talebmorad, H., Abedi-Koupai, J., Eslamian, S., Mousavi, S., Akhavan, S., Askari, K. O. A., & Singh, V. P. 2021. Evaluation of the impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Hamedan-Bahar plain. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 11(3), 333. doi.org/10.1504/ijhst.2021.114554.
22. Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. 2005. WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. *Water International*, 30(4), 487–500. doi.org/10.1080/02508060508691893.
11. Baazi, H., Ebrahimi, H., and Aminnejad, B. 2020. A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in southern Iran using WEAP (Case study: Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering*, 12(2), 1339-1352.
12. Irmak, A., & Irmak, S. 2008. Reference and crop evapotranspiration in south central Nebraska. II: Measurement and estimation of actual evapotranspiration for corn. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce*, 134(6), 700–715. doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2008)134:6(700).
13. Kim, J. H., Sung, J. H., Shahid, S., & Chung, E. 2022. Correction to: Future hydrological drought analysis considering agricultural water withdrawal under SSP scenarios. *Water Resources Management*, 36(9), 2931. doi.org/10.1007/s11269-022-03210-4.
14. Kult, J. M., Choi, W., & Choi, J. 2014. Sensitivity of the snowmelt runoff model to snow covered area and temperature inputs. *Applied Geography*, 55, 30–38. doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.08.011.
15. Maidment, D. R. 1993. *Handbook of hydrology* (p. 1142). University of Texas.
16. Meinshausen, M., Nicholls, Z., Lewis, J., Gidden, M., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P., Reimann, S., Vollmer, M., Velders, G., Van den berg, M., Smith, S., Wang, R. 2020. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, 13(8), 3571–3605. doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020

