

پیش‌بینی تغییرات رواناب حوزه آبخیز زرينه‌رود تحت شرایط تغییر اقلیم از طریق شبیه‌سازی هیدرولوژیک

ملیحه راهواره^۱، بهارک معتمدوزیری^{۲*}، علی‌رضا مقدم‌نیا^۳ و علی مریدی^۴

- (۱) دانشجوی دکتری رشته علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
- (۲) استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
*رایانامه نویسنده مسئول مکاتبات: bmvaziri@gmail.com
- (۳) دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- (۴) استادیار گروه مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۱۷

چکیده

بررسی رفتار رودخانه تحت تاثیر تغییر اقلیم، به‌ویژه میزان رواناب در دوره‌های آینده ضروری است. این پژوهش با در نظر گرفتن مدل گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوهای انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5، تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه زرينه‌رود (بزرگ‌ترین زیرحوضه دریاچه ارومیه) را ارزیابی کرده است. برای این منظور با استفاده از داده‌های تغییر اقلیم مدل HadGEM2-ES طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰، تغییرات دما و بارش در دوره‌های آتی در حوضه زرينه‌رود بررسی گردید. جهت ریزمقیاس نمودن این داده‌ها، جعبه ابزار CCT به‌کار برده شد. از مدل SWAT جهت ارزیابی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه استفاده گردید. مدل SWAT با استفاده از آمار ماهانه رواناب، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی شد. در ادامه با معرفی نتایج ریزمقیاس‌شده مدل گردش عمومی جو، به مدل SWAT، تغییرات رواناب خروجی حوضه در طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که مدل SWAT عملکردهای خوبی در شبیه‌سازی رواناب ارایه می‌دهد. میانگین نتایج جعبه ابزار CCT نشان داد که حداکثر و حداقل دما در دوره مذکور افزایش می‌یابد. بارش سالانه ۳/۶ درصد افزایش تحت RCP 2.6 و ۲/۹ درصد کاهش تحت RCP 8.5 را نشان داد. نتیجه بررسی رواناب نشان داد که میانگین رواناب دوره آتی در زمستان، بهار و تابستان کاهش می‌یابد درحالی‌که روند افزایشی رواناب در پاییز مشهود می‌باشد. رواناب سالانه تحت RCP 2.6 و RCP 8.5 به‌ترتیب حدود ۶/۵ و ۳۰ درصد کاهش یافته است که متعاقباً باعث کاهش تخلیه این رودخانه به دریاچه ارومیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه زرينه‌رود، رواناب، سناریوهای RCP، مدل SWAT، HadGEM2-ES.

مقدمه

(Luo et al., 2014). بسیاری از مطالعات گزارش کرده‌اند که تغییرات رواناب در حوضه با تغییر اقلیم ارتباط نزدیک دارد (Luo et al., 2016; Shang et al., 2019; Wu et al., 2015; Zhang et al., 2016a; Zhang et al., 2016b). حوزه آبخیز زرينه‌رود، منبع اصلی جریان ورودی به دریاچه ارومیه است. دریاچه ارومیه طی ۲۵ سال گذشته با کاهش سطح آب به‌طور متوسط

درک بهتر از تغییرات رواناب و نیروهای محرک بالقوه‌ی آن از اهمیت حیاتی برای استفاده موثر از منابع آب و مدیریت جریان‌های رودخانه برخوردار است. به‌طور کلی، تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی عوامل مهمی هستند که بر رواناب تاثیر می‌گذارند (Shi & Wang, 2015; Ye et al., 2013; Zhang et al., 2015).

خواهد شد. Muelchi و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌های GCM تحت سناریوهای انتشار RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به بررسی تغییرات رواناب تحت شرایط تغییر اقلیم در سوئیس پرداختند. نتایج آنها نشان داد میانگین سالانه رواناب در اکثر حوضه‌ها کاهش یافته است. هدف از این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه زربینه می‌باشد. بدین منظور مدل HadGEM2-ES، از گزارش پنجم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم در دو حالت انتشار RCP^۱ برای شبیه‌سازی اقلیم و سنجه‌های آن (بارش، دمای حداقل و حداکثر) به‌کار گرفته شد. برای شبیه‌سازی رواناب نیز مدل SWAT به‌کار گرفته شد. در این پژوهش، پیش‌بینی‌های آتی در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۵) تحت دو سناریو ۲/۶ و ۸/۵ صورت پذیرفت. نوآوری این مقاله، کاربرد مدل گردش عمومی مندرج در گزارش پنجم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم با استفاده از خروجی ریزمقیاس‌نمایی شده توسط جعبه ابزار CCT جهت بررسی مولفه‌های دما و بارش در حوزه آبخیز زربینه رود می‌باشد. همچنین از داده‌های جدید برای ورودی مدل SWAT به‌منظور شبیه‌سازی رواناب استفاده شد.

مواد و روش‌ها

خصوصیات منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز زربینه رود با مساحتی بالغ بر ۱۲۵۱۲ کیلومترمربع، در شمال‌غربی ایران در موقعیت ۲۷° ۳۷' - ۴۱° ۳۵' شرقی و ۲۰° ۴۷' - ۴۷° ۴۵' شمالی واقع شده است (شکل ۱). رودخانه زربینه رود از مهم‌ترین و طولی‌ترین رودخانه‌های حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است که از گوشه جنوب‌شرقی به دریاچه ارومیه می‌ریزد و طول آن ۲۴۰ کیلومتر و میانگین آبدهی این رودخانه ۱۳۹/۵ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. سد بوکان، سد اصلی مورد بهره‌برداری در این حوضه بوده و از آن برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می‌شود.

۴۰ سانتی‌متر در سال در حال کاهش است (Ahmadaali et al., 2016; Jalili et al., 2018) که دلیل عمده آن ناشی از کاهش ورودی‌ها به آن است. این خشک شدن منجر به پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی بسیاری شده است (Boroughani et al., 2020). بر اساس پژوهش Hassanzadeh و همکاران (۲۰۱۲) تغییرات ورودی به دریاچه ارومیه ناشی از تغییر اقلیم و استفاده بیش از حد از منابع آب سطحی بوده که ۶۵ درصد کاهش سطح آب را به دنبال داشته است. Shang و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که تغییر اقلیم ۸۷ درصد از تغییرات رواناب پس از سال ۲۰۰۴ را به خود اختصاص داده است. از آنجایی که تغییر اقلیم تاثیر به‌سزایی بر میزان رواناب دارد، بنابراین ضروری است که تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب به کمک مدل‌های گردش عمومی جو (GCM^۱) و مدل‌سازی بارش-رواناب برای دوره‌های آینده پژوهش شود.

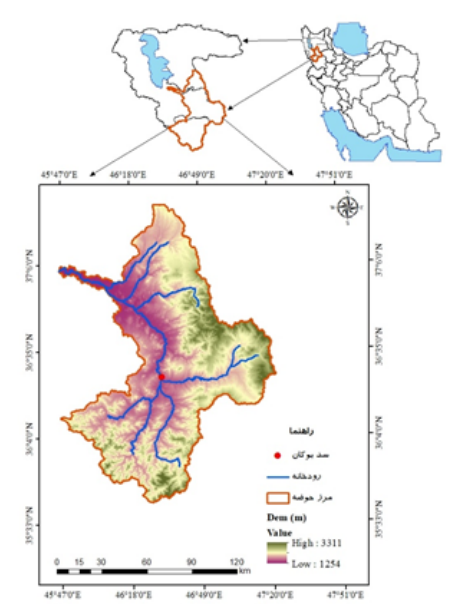
پژوهش‌های گسترده‌ای بر تغییر اقلیم در ایران انجام شده است (Ahmadi et al., 2020; Mahmudi et al., 2021; Yazdandoost et al., 2020). رضایی‌زمان و همکاران (۱۳۹۲) در ارزیابی اثر تغییر اقلیم به کمک مدل SWAT^۲ در حوزه آبخیز سیمینه‌رود نشان دادند که در آینده، ۲۵ درصد منابع آبی حوضه کاهش پیدا می‌کند. به علت بزرگ بودن سلول‌های محاسبه‌ای در پژوهش‌های تغییر اقلیم باید با روش ریزمقیاس‌گردانی، مقیاس سلول محاسبه‌ای را کوچک‌مقیاس کرد. نادری و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه دریاچه ارومیه و محمدعلیزاده‌فرد و همکاران (۱۳۹۹) در حوضه دریاچه ارومیه از جعبه ابزار CCT^۳ جهت ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح خطاهای داده‌های اقلیمی مدل‌های GCM استفاده کردند. Emami و Koch (۲۰۱۹) در ارزیابی اثر تغییر اقلیم در حوضه زربینه‌رود نشان دادند که در دوره آینده، حوضه با کمبود آب مواجه

1 General Circulation Model

2 Soil and Water Assessment Tool

3 Climate Change Toolkit

4 Representative Concentration Pathway

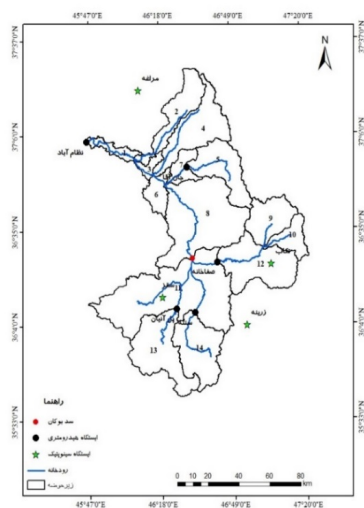


شکل ۱. موقعیت حوضه زربنه‌رود و زیرحوضه‌های آن

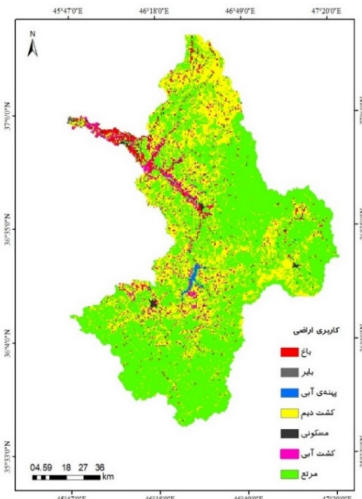
رواناب پنج ایستگاه هیدرومتری از سال ۲۰۱۷-۱۹۹۶ جهت اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT استفاده شد که مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارایه شده است. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری در شکل (۳) نشان داده شده است. اطلاعات مدیریتی حوضه، مانند الگوی کشت و اطلاعات سد بوکان نیز به صورت اختیاری به مدل SWAT معرفی شد (Ahmadzadeh *et al.*, 2016; Ashraf, 2017; Vaghefi *et al.*, 2017).

داده‌های مورد استفاده

مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل اطلاعات هواشناسی، هیدرولوژی، کاربری اراضی (شکل ۲)، مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با اندازه سلولی ۳۰ متر و داده‌های نوع خاک از نقشه جهانی خاک FAO می‌باشد. از داده‌های هواشناسی، بارش، حداقل و حداکثر دما با گام زمانی روزانه از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ میلادی مربوط به چهار ایستگاه سینوپتیک که نزدیک‌ترین فاصله را با منطقه مطالعاتی داشتند جهت شبیه‌سازی رواناب استفاده گردید. همچنین آمار ماهانه



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در مدل SWAT



شکل ۲. نقشه کاربری اراضی حوضه زربنه‌رود

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری مورد استفاده در تحقیق

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	دوره آماری	نوع ایستگاه
۱	زرینه	۴۶/۹۱	۳۶/۰۶	۲۱۴۲/۶	۱۹۹۰-۲۰۱۹	سینوپتیک
۲	تکاب	۴۷/۰۹	۳۶/۳۹	۱۸۱۷/۲	۱۹۹۰-۲۰۱۹	سینوپتیک
۳	سقر	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲	۱۵۲۲/۸	۱۹۹۰-۲۰۱۹	سینوپتیک
۴	مراغه	۴۶/۱۴	۳۷/۳۴	۱۳۴۴	۱۹۹۰-۲۰۱۹	سینوپتیک
۵	نظام آباد	۴۵/۹۴	۳۷/۰۵	۱۲۸۲	۱۹۹۶-۲۰۱۷	هیدرومتری
۶	جان آقا	۴۶/۴۹	۳۶/۹	۱۴۱۰	۱۹۹۶-۲۰۱۶	هیدرومتری
۷	صفاخانه	۴۶/۷	۳۶/۴	۱۵۳۳	۱۹۹۶-۲۰۱۶	هیدرومتری
۸	پل آنیان	۴۶/۴۳	۳۶/۲	۱۴۵۵	۱۹۹۶-۲۰۱۷	هیدرومتری
۹	ستته	۴۶/۵	۳۶/۱۷	۱۵۸۱	۱۹۹۶-۲۰۱۷	هیدرومتری

مدل SWAT

مدل SWAT که توسط مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا تهیه شده است، یک مدل هیدرولوژیکی فیزیکی-توزیعی است که در مقیاس حوزه آبخیز استفاده می‌شود (Hu et al., 2020; Yu et al., 2018). مدل SWAT به‌طور گسترده برای تعیین کمیت تاثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر فرایندهای هیدرولوژیکی، پیش‌بینی پاسخ تخلیه آب رودخانه در اثر تغییر اقلیم در آینده و شیوه‌های مدیریت زمین استفاده می‌شود (Mittal et al., 2016; Sellami et al., 2016). بنابراین مدل SWAT برای شبیه‌سازی رواناب در این پژوهش انتخاب شد. بنابراین معادله اصلی حاکم بر مدل، معادله بیلان آب است:

$$SWt = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در آن SWt ظرفیت نهایی آب در خاک، SW₀ ظرفیت اولیه آب در خاک، R_{day} بارش روزانه، Q_{surf} رواناب سطحی، E_a تبخیر و تعرق واقعی، W_{seep} آبی که به ناحیه غیراشباع خاک وارد می‌شود و Q_{gw} آب زیرزمینی که به رودخانه وارد می‌شود، می‌باشد (Neitsch et al., 2005).

پس از تهیه داده‌های اقلیمی و مکانی مورد نیاز، گام بعدی تبدیل حوضه به چندین زیرحوضه و تعیین تعداد واحدهای هیدرولوژیکی یکسان^۱ (HRU) بود. ترکیبی از نقشه های خاک، کاربری زمین و شیب/ توپوگرافی منجر به ۱۴ زیرحوضه و ۶۶۶ HRU برای حوضه زرینه‌رود شد. همچنین داده‌های خروجی ماهانه مخزن سد بوکان در دوره بهره‌برداری ۱۹۷۲-۲۰۱۹ به مدل SWAT وارد شد. دوره شبیه‌سازی مدل از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ بود که از آن ۱۹۹۰-۱۹۹۴ به‌عنوان دوره گرم شدن مدل تعیین شد.

اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و آنالیز عدم قطعیت مدل

SWAT

برای اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل از نرم‌افزار SWAT-CUP بر اساس داده‌های رواناب ثبت شده در ۵ ایستگاه هیدرومتری استفاده شد (Van Griensven et al., 2006). از الگوریتم SUFI-2 برای تعیین دامنه‌ها و مقادیر بهینه پارامترها استفاده شد (Abbaspour, 2015; Anoh et al., 2017) و مقادیر بهینه پارامترها به مدل معرفی شدند و در نهایت پارامترهایی با حساسیت شدید انتخاب شدند.

سال ۱۹۹۶-۲۰۱۳ برای دوره اعتبارسنجی مدل و سال ۲۰۱۴-۲۰۱۷ به‌عنوان دوره صحت‌سنجی مدل تعیین شد. ضریب نش ساتکلیف (NSE)، ضریب همبستگی (R²) و درصد بایاس (PBIAS) برای ارزیابی قدرت پیش‌بینی مدل استفاده شد (Fu et al., 2019) که در معادله‌های (۲) الی (۴) نشان داده شده است:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})^2} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})(Q_{si} - Q'_{avg})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{avg})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{si} - Q'_{avg})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})} \quad (4)$$

در معادله‌های ۲، ۳ و ۴ مقادیر Q_{si} و Q_{avg} به‌ترتیب رواناب شبیه‌سازی شده و متوسط رواناب شبیه‌سازی شده و Q_{oi} و Q_{avg} به‌ترتیب مقادیر رواناب مشاهداتی و متوسط رواناب مشاهداتی، همچنین n تعداد مشاهدات است. عدم‌قطعیت با استفاده از دو شاخص کمی شد. عامل P-factor که درصد داده‌های اندازه‌گیری شده‌ای است که در محدوده

برای پیش‌بینی اقلیم آینده از آمار بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه مدل HadGEM2-ES مستخرج از گزارش پنجم هیات بین‌کشوری تغییر اقلیم (IPCC, *Hempel et al.*, 2013) تحت دو سناریوی انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 استفاده شد. در مطالعات تغییر اقلیم، سناریوهای انتشار RCP 2.6 و RCP 8.5 به ترتیب به عنوان سناریوی انتشار خوش‌بینانه و بدبینانه، مطرح می‌گردند. مشخصات مدل HadGEM2-ES در جدول (۲) ارائه شده است. از آنجایی که این GCM در مطالعات تغییر اقلیم با امکان مطلوب در ایران به کار رفته، در این پژوهش نیز مورد انتخاب قرار گرفت (Vaghefi *et al.*, 2019). استفاده از چندین سناریوی انتشار برای پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی، امکان مطالعه پارامترهای مختلف و کاهش عدم دقت شبیه‌سازی را فراهم می‌آورد (Knutti *et al.*, 2010).

بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (۹۵ ppu) پیش‌بینی مدل قرار گرفت. بر این اساس همه ورودی‌های مدل همانند توزیع بارندگی و دما که در خروجی مدل آشکار می‌شوند، اصلاح شد. یکی دیگر از ابزارهای اندازه‌گیری در طی دوره اعتبارسنجی و آنالیز عدم قطعیت، پارامتر R-factor بود که متوسط محدوده ۹۵ درصد به وسیله انحراف معیار داده‌های اندازه‌گیری شده، تقسیم شد. مقدار P-factor بین ۰ و ۱۰۰ و پیرو آن مقدار R-factor بین صفر و بی نهایت بود. یک شبیه‌سازی با P-factor مساوی ۱ و R-factor مساوی صفر، نشان‌دهنده آن بود که داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده کاملاً مطابق هم بودند (Abbaspour *et al.*, 2009).

مدل و سناریوهای انتشار در گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم

جدول ۲. توصیف مدل انتخاب شده از گزارش ارزیابی پنجم (AR5)

GCM	دقت	موسسه و کشور
HadGEM2-ES	$1/25^{\circ} \times 1/85^{\circ}$	MOHC, انگلستان

دمای حداقل و حداکثر روزانه از روش Additive Method انجام شد.

نتایج

آنالیز حساسیت، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT

اعتبارسنجی و صحت‌سنجی در نرم‌افزار SWAT-CUP 2012 انجام شد. بدین منظور در مرحله اول، پارامترهایی که به شبیه‌سازی رواناب مربوط بودند، برای تجزیه و تحلیل حساسیت اولیه انتخاب شدند. پارامترهای حساس با استفاده از تجزیه و تحلیل نمودار لاتین هایپرکیوب (Hypercube Latin) در SWAT-CUP شناسایی شدند. تعداد ۲۳ پارامتر که تاثیر بیشتری بر رواناب داشتند، مشخص شدند (جدول ۳). سپس محدوده‌های بهینه شده آن پارامترهای حساس را توسط الگوریتم SUFI-2 در SWAT-CUP، به‌طور خودکار کالیبره شد. در نهایت جهت صحت‌سنجی مدل، مقادیر پارامترهای کالیبره شده، بدون تغییر نگه داشته شد و برای شبیه‌سازی رواناب مورد استفاده قرار گرفت و در نهایت جهت تعیین

شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌سازی مولفه‌های دما و بارش

مدل‌های گردش عمومی جو برای مطالعات در سطح منطقه‌ای و محلی مناسب نمی‌باشند. بنابراین خروجی این مدل‌ها به منظور استفاده در مقیاس منطقه‌ای بایستی ریزمقیاس شوند. در این پژوهش از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری CCT^۲ استفاده گردید. جعبه ابزار CCT یک برنامه گرافیکی کاربردی است که به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های آب و هوایی شامل استخراج، ریزمقیاس‌نمایی و درونیابی داده‌های گردش عمومی جو توسط Ashraf Vaghefi و همکاران (۲۰۱۷) توسعه یافته است. همچنین این برنامه قادر به محاسبه و تحلیل تحدیدهای اقلیمی مانند دوره‌های خشک و مرطوب و نیز یافتن روند گذشته و پیش‌بینی الگوی فراوانی رخدادهای سیل و خشکسالی در آینده می‌باشد که برای اولین بار در حوضه زربنه رود از این مدل استفاده شد. در این مدل پس از استخراج داده‌های تغییر اقلیم برای محدوده مطالعه، ابتدا ریزمقیاس‌سازی انجام شد، سپس آنومالی و میانگین ماهانه و سالانه محاسبه گردید. همچنین تصحیح خطاها برای داده‌های بارش با استفاده از روش Ratio Method و برای داده‌های

کمیت حساسیت و اهمیت نسبی هر پارامتر از t-stat و p-value استفاده شد.

جدول ۳. فهرست پارامترهای حساس مورد استفاده برای اعتبارسنجی مدل SWAT

نام پارامتر	توضیحات	واحد	مقدار نهایی پارامتر	p-value	t-stat
v_SFTMP.bsn	دمای بارش برف	درجه سانتی‌گراد (C)	۱/۵۰	۰/۶۳	۰/۴۸
v_SMTMP.bsn	دمای پایه ذوب برف	درجه سانتی‌گراد (C)	۹/۱۶	۰/۴۷	-۰/۷۳
v_TLAPS.sub	نرخ گذشت دما	درجه سانتی‌گراد بر کیلومتر (C/km ¹)	۷/۳۹	۰/۰۶	۱/۸۷
v_PLAPS.sub	نرخ گذشت بارش	میلی‌متر آب بر کیلومتر (mm H ₂ O/km ¹)	۳۶۰/۸۳	۰/۰۰	-۵/۱۴
r_CN2.mgt	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	بدون بعد	۰/۰۹	۰/۰۷	-۱/۸۰
v_ALPHA_BF.gw	ضریب پاسخ جریان پایه	یک بر روز (1/day)	۰/۸۰	۰/۹۱	۰/۱۲
v_GW_DELAY.gw	مدت زمان زهکشی لایه‌های خاک بالای سطح ایستایی	روز (days)	۳۴۴/۰۲	۰/۶۱	۰/۵۱
v_GWQMN.gw	حداقل ارتفاع سطح ایستایی لازم برای خروج آب زیرزمینی	میلی‌متر (mm)	۱/۹۸	۰/۰۹	۱/۷۲
v_ESCO.hru	ضریب جریان تبخیر خاک	بدون بعد	۰/۹۹	۰/۷۸	-۰/۲۹
v_CH_N2.rte	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	بدون بعد	۰/۲۰	۰/۶۶	۰/۴۴
v_CH_K2.rte	هدایت الکتریکی موثر در رودخانه اصلی	میلی‌متر در ساعت (mm/hr)	۱۱۵/۶۴	۰/۸۳	۰/۲۲
v_ALPHA_BNK.rte	ضریب پاسخ جریان پایه در رودخانه‌ها	یک بر روز (1/day)	۰/۸۴	۰/۲۱	۱/۲۶
r_SOL_AWC(1).sol	ظرفیت آب قابل دسترس	بدون بعد	-۰/۰۲	۰/۰۰	۲/۹۳
r_SOL_K(1).sol	هدایت الکتریکی اشباع خاک در لایه سطحی	میلی‌متر در ساعت (mm/hr)	-۰/۳۹	۰/۵۰	-۰/۶۸
v_EPCO.bsn	ضریب جریان گیرش آب گیاهی	بدون بعد	۰/۱۴	۰/۳۱	۱/۰۲
v_SMFMX.bsn	فاکتور ذوب برف در طول سال	میلی‌متر بر درجه در روز (mm/day-c)	۱/۰۶	۰/۷۵	۰/۳۲
v_SPEXP.bsn	پارامتر توان برای محاسبه رسوب در مسیریابی رسوب کانال	بدون بعد	۰/۶۳	۰/۳۴	۰/۹۷
v_SPCON.bsn	پارامتر برای محاسبه مسیریابی رسوب کانال	بدون بعد	۰/۰۱	۰/۱۰	-۱/۶۸
v_SURLAG.bsn	ضریب تاخیر رواناب سطحی	بدون بعد	۱۴/۰۲	۰/۹۰	۰/۱۳
v_SMFMN.bsn	فاکتور ذوب برف در طول سال	میلی‌متر بر درجه در روز (mm/day-c)	۱/۸۶	۰/۹۸	۰/۰۲
v_CH_BED_BD.rte	چگالی ظاهری رسوب بستر کانال	گرم بر سانتی‌مترمکعب (g/cm ³)	۱/۷۲	۰/۶۷	-۰/۴۲
v_GW_REVAP.gw	ضریب مربوط به تبخیر از لایه بالایی سطح ایستایی	بدون بعد	۰/۰۷	۰/۹۲	-۰/۱۱
r_SOL_BD(1).sol	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی	گرم بر سانتی‌مترمکعب (g/cm ³)	۱/۳۶	۰/۸۲	۰/۲۳

r به معنای ضرب کردن مقدار پیش فرض مدل در (+1 مقدار بهینه پارامتر) و v به معنی جایگزین شدن حد بهینه در پارامتر به جای مقدار

پیش فرض مدل

هر پارامتری که مقدار قدرمطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، تاثیر بیشتری بر رواناب داشته است. نتایج تحلیل حساسیت جدول (۳)، نشان می‌دهد، پارامترهای CN2, TLAPS, SOL-AWC, PLAPS به ترتیب بالاترین تاثیر را بر دبی حوضه زاینه رود داشتند. پارامتر PLAPS هنگام تعیین باندهای ارتفاعی در زیر حوضه‌ها، اثر توپوگرافی بر بارندگی را هدایت می‌کند (Boithias et al., 2017). در مدل، برخی از زیرحوضه‌ها با یکدیگر اختلاف سطح زیادی دارند، بنابراین جای تعجب نیست که PLAPS با مقدار نهایی ۳۶۰/۸۳ میلی‌متر H₂O در کیلومتر (mm H₂O km-1) به عنوان تاثیرگذارترین پارامتر، عامل کلیدی برای تنظیم بارش در حوضه است. نتایج معیارهای ارزیابی قدرت مدل نشان داد که مقدار R² از ۰/۵۲ تا ۰/۷۰ برای اعتبارسنجی و از ۰/۴۴ تا ۰/۷۳ برای

صحت‌سنجی متغیر است، درحالی‌که مقادیر NSE برای اعتبارسنجی از ۰/۵۲ تا ۰/۶۴ و برای صحت‌سنجی از ۰/۴۲ تا ۰/۶۴ متغیر است. بنابراین خروجی‌های مدل برای اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری را می‌توان رضایت‌بخش ارزیابی کرد. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. در دوره صحت‌سنجی، ایستگاه‌های جان‌آقا و صفاخانه نتایج رضایت‌بخشی برای NSE و R² نداشتند، دلیل آن می‌تواند فعالیت‌های انسانی گسترده در بالادست این دو ایستگاه در طول دوره صحت‌سنجی باشد. جدول (۴) نتایج اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و معیارهای عملکردمدل را برای ۵ ایستگاه هیدرومتری مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها ۵۰ تا ۷۰ درصد (مقدار p-factor بین ۰/۵ تا ۰/۷) از داده‌های مشاهده شده در طول شبیه‌سازی را به دست آوردند. R-factor در حین اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

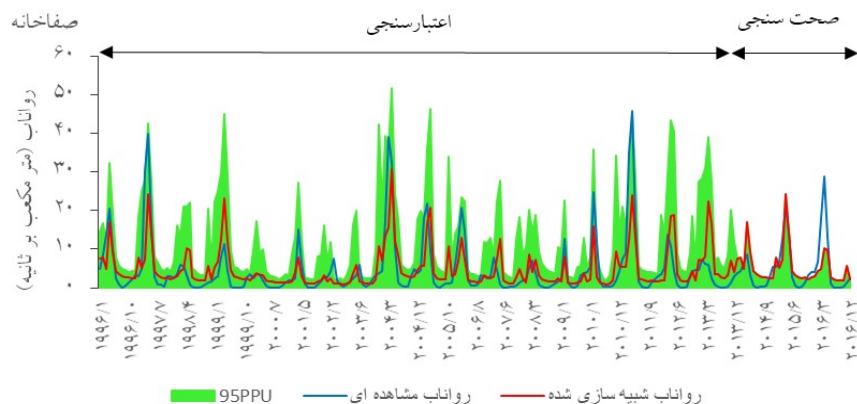
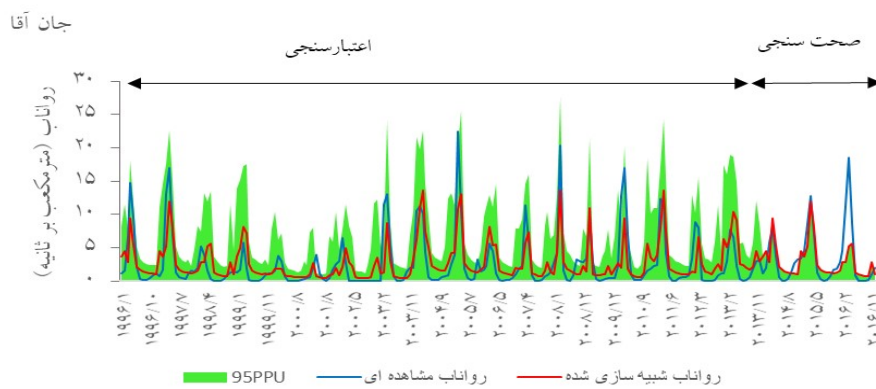
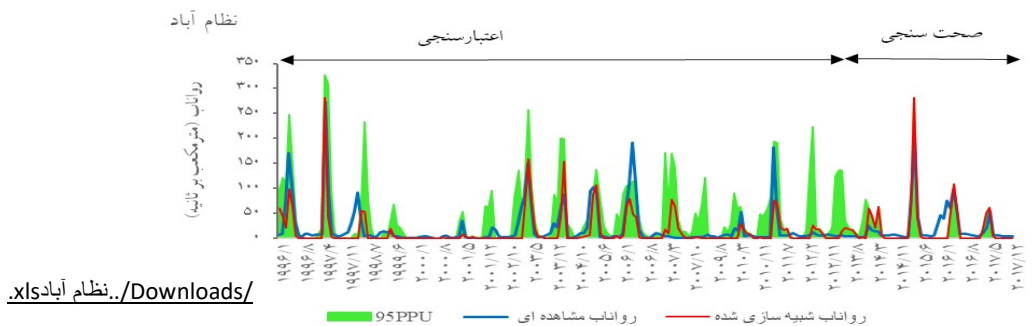
صحت‌سنجی متغیر است، درحالی‌که مقادیر NSE برای اعتبارسنجی از ۰/۵۲ تا ۰/۶۴ و برای صحت‌سنجی از ۰/۴۲ تا ۰/۶۴ متغیر است. بنابراین خروجی‌های مدل برای اکثر ایستگاه‌های هیدرومتری را می‌توان رضایت‌بخش ارزیابی کرد. نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. در دوره صحت‌سنجی، ایستگاه‌های جان‌آقا و صفاخانه نتایج رضایت‌بخشی برای NSE و R² نداشتند، دلیل آن می‌تواند فعالیت‌های انسانی گسترده در بالادست این دو ایستگاه در طول دوره صحت‌سنجی باشد. جدول (۴) نتایج اعتبارسنجی، صحت‌سنجی و معیارهای عملکردمدل را برای ۵ ایستگاه هیدرومتری مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها ۵۰ تا ۷۰ درصد (مقدار p-factor بین ۰/۵ تا ۰/۷) از داده‌های مشاهده شده در طول شبیه‌سازی را به دست آوردند. R-factor در حین اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

پیش‌بینی تغییرات رواناب حوزه آبخیز زربنه‌رود تحت شرایط تغییر اقلیم از طریق شبیه‌سازی هیدرولوژیک/۱۳۵

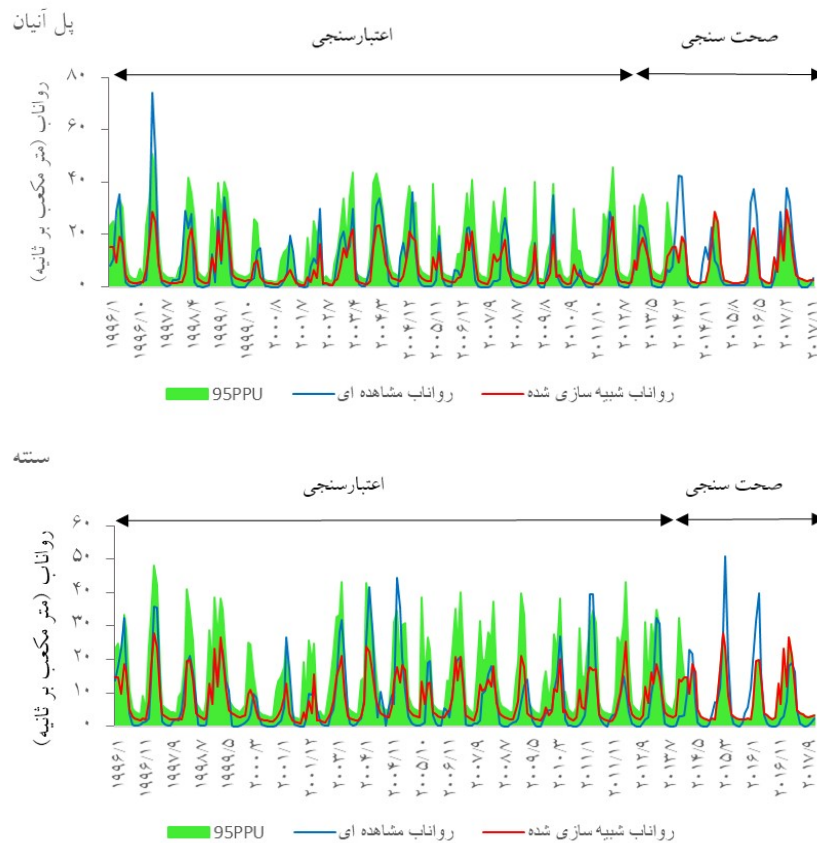
کوچک‌تر از ۱/۵ بود که نشان‌دهنده پیش‌بینی منطقی است، factor نشان‌دهنده عدم قطعیت بالاتر در طول اعتبارسنجی به‌جز برای ایستگاه‌های جان‌آقا و صفاخانه مقادیر بزرگ‌تر R- است (جدول ۴).

جدول ۴. نتایج اعتبارسنجی و صحت‌سنجی برای ایستگاه‌های هیدرومتری در حوضه زربنه‌رود

دوره اعتبارسنجی (۱۹۹۶-۲۰۱۳)					دوره صحت‌سنجی (۲۰۱۴-۲۰۱۷)					ایستگاه هیدرومتری
P-Factor	R-Factor	R2	NSE	PBIAS	P-Factor	R-Factor	R2	NSE	PBIAS	
۰/۴۶	۰/۹۵	۰/۷۳	۰/۶۴	۲۰/۹	۰/۶۴	۱/۱۱	۰/۶۳	۰/۶۰	۲۵/۶	نظام‌آباد (خروجی حوضه)
۰/۶۷	۱/۱۷	۰/۴۷	۰/۴۲	۲۳/۳	۰/۷۱	۱/۷۹	۰/۵۷	۰/۵۶	-۱۲/۳	جان‌آقا
۰/۵۸	۱/۱۸	۰/۴۴	۰/۴۳	۱۰/۲	۰/۷۱	۱/۵۴	۰/۵۲	۰/۵۲	-۷/۵	صفاخانه
۰/۵۸	۰/۷۲	۰/۵۴	۰/۵۰	۲۲/۳	۰/۶۶	۱/۱۷	۰/۷۰	۰/۶۴	۱۲/۹	پل‌آنیان
۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۵۲	۰/۵۱	۷/۷	۰/۶۵	۱/۴۰	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۷	سنه



شکل ۴. مقایسه سری زمانی رواناب‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده برای دوره اعتبارسنجی و صحت‌سنجی در ایستگاه‌های نظام‌آباد، جان‌آقا و صفاخانه



شکل ۵. مقایسه سری زمانی رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دوره اعتبارسنجی و صحت‌سنجی در ایستگاه‌های پل آبیان و سنته

به فصل تابستان و به میزان (۱۱/۲-) کاهش و کمترین میزان مربوط به فصل زمستان به میزان (۲/۱-) کاهش می‌باشد. بارش سالیانه در این سناریو به میزان ۲/۹ درصد نسبت به دوره مشاهداتی کاهش یافته است. میانگین دمای حداقل و حداکثر سالیانه به ترتیب ۵۰/۱ و ۲۰ درصد افزایش یافته است. همچنین بررسی نتایج این مدل در ارتباط با RCP 2.6 نشان می‌دهد که در فصل زمستان و پاییز روند بارش در فصل بهار و تابستان کاهش و در فصل پاییز و زمستان افزایش می‌باشد و بارش سالیانه به میزان ۳/۶ درصد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است. میانگین دمای حداقل و حداکثر سالیانه به ترتیب ۳۷/۲ و ۱۶/۴ درصد افزایش یافته است (جدول ۵). نتایج مدل در هر دو سناریو (RCP 2.6 و RCP8.5) نشان داد که دمای حداقل و حداکثر در همه فصول افزایش می‌یابد.

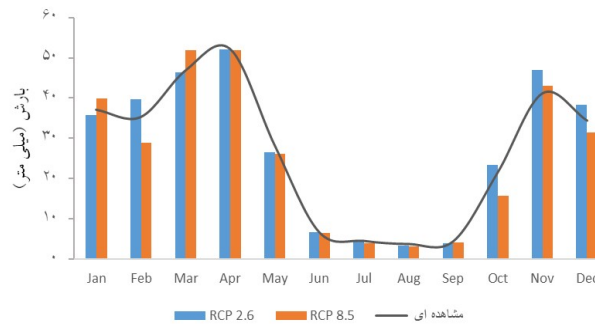
شبیه‌سازی بارش، دمای حداقل و حداکثر با استفاده از مدل CCT

تغییرات میانگین بارندگی ماهانه، حداکثر و حداقل دما از خروجی مدل HadGEM2-ES طی سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۵۰) در مقایسه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹) در نمودارها نشان داده شده است (شکل‌های ۶ و ۷). به‌طور کلی بیشترین میزان بارش در دوره مشاهداتی در فروردین و کمترین میزان بارش مربوط به مرداد ماه است. در شرایط کنونی سهم بارندگی در زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۳۷/۵، ۲۷/۵، ۴ و ۲۳/۴ درصد است و سهم تابستان از بارندگی سالانه بسیار کم است. بررسی نتایج مدل HadGEM2-ES در ارتباط با RCP8.5 نشان می‌دهد که بارندگی در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ در همه فصول کاهش پیدا می‌کند و بیشترین تغییرات بارندگی مربوط

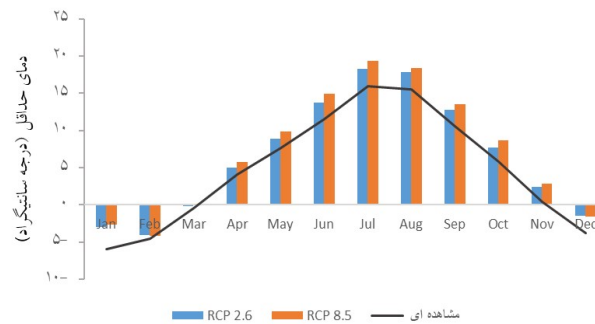
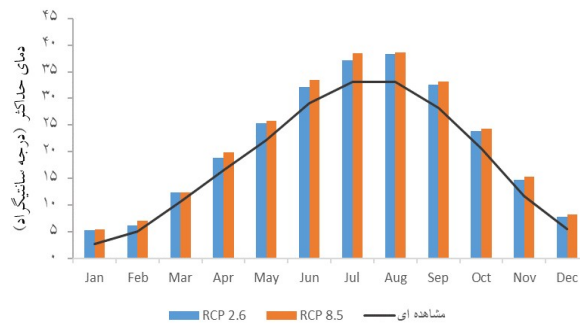
پیش‌بینی تغییرات رواناب حوزه آبخیز زربنه‌رود تحت شرایط تغییر اقلیم از طریق شبیه‌سازی هیدرولوژیک/۱۳۷

جدول ۵. درصد تغییرات فصلی و سالانه میانگین بارش، دمای حداقل و حداکثر تحت سناریوی انتشار RCP2.6 و RCP8.5 طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ نسبت به مقادیر مشاهداتی (%)

نام مدل	فصلی/سالانه	بارندگی (RCP2.6)	بارندگی (RCP8.5)	دمای حداکثر (RCP 2.6)	دمای حداکثر (RCP 8.5)	دمای حداقل (RCP 2.6)	دمای حداقل (RCP 8.5)
HadGEM2-ES	زمستان	۳/۳	-۲/۱	۲۸/۲	۳۴/۱	۳۳/۴	۳۹/
	بهار	-۲/۳	-۳	۱۲/۵	۱۶/۶	۱۹	۳۱/۸
	تابستان	-۶/۵	-۱۱/۲	۱۴/۳	۱۶/۷	۱۶/۳	۲۱/۹
	پاییز	۱۲	-۶/۵	۲۲/۷	۲۷/۱	۲۵/۷	۳۱۳/۵
	سالانه	۳/۶	-۲/۹	۱۶/۴	۲۰	۳۷/۲	۵۰/۱



شکل ۶ میانگین بارندگی ماهانه تحت سناریو انتشار RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ در مقایسه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹)



شکل ۷. میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه تحت سناریو انتشار RCP2.6 و RCP8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ در مقایسه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۱۹)

ماهانه در ایستگاه نظام‌آباد (خروجی حوضه) تحت RCP 2.6 و RCP 8.5 برای دوره آینده در مقایسه با دوره مشاهداتی (۲۰۱۷-۱۹۹۶) در شکل (۸) نشان داده شده است. نتایج مطالعه تغییرات رواناب در آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) نشان داد که

شبیه‌سازی رواناب تحت سناریوهای انتشار

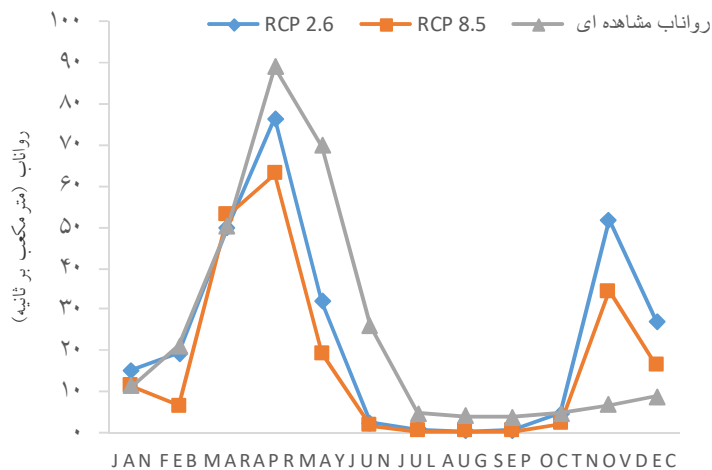
با معرفی نتایج ریزمقیاس‌شده مدل HadGEM2-ES به مدل SWAT، تغییرات رواناب خروجی حوضه در طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ شبیه‌سازی گردید. تغییرات میانگین رواناب

در هر دو سناریوی انتشار، در دوره آینده، میزان رواناب در فصل زمستان، بهار و تابستان نسبت به دوره مشاهداتی کاهش یافته است اما در مقابل، روند افزایشی رواناب پاییزی مشهود بوده است. میزان رواناب در دوره آینده در فصل پاییز تحت RCP 2.6، ۳۰٪/۷ درصد و تحت RCP 8.5، ۱۵٪/۵ نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است (جدول ۶). میانگین رواناب سالانه در دوره آینده تحت RCP 2.6، ۶٪/۵۲ درصد و تحت RCP 8.5، ۳۰٪/۴ درصد کاهش یافته است.

میانگین رواناب در ماه نوامبر و دسامبر تحت هر دو سناریو از مقادیر رواناب مشاهده شده بیشتر است، ولی در اکثر ماه‌های سال، رواناب تحت اثر سناریوها کمتر از رواناب در دوره مشاهداتی است. نتایج برای هر دو سناریو (RCP 2.6 و RCP 8.5)، در ماه جون در منطقه مورد مطالعه، بسیار به هم نزدیک است و در این ماه بیشترین میزان کاهش رواناب رخ داده است. بیشترین و کمترین میزان رواناب در حوضه زربینه‌رود در دوره مشاهداتی به ترتیب در فصل بهار و تابستان است. تقریباً

جدول ۶ تغییرات میانگین فصلی و سالانه رواناب در دوره آینده در مقایسه با دوره مشاهداتی

نام مدل	فصلی/سالانه	درصد تغییرات میانگین رواناب در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰)				
		RCP 2.6		RCP 8.5		
مشاهداتی	۱۹۹۰-۲۰۱۹	مقدار	درصد تغییرات	مقدار	درصد تغییرات	
HadGEM2-ES	زمستان	۲۷/۵	۲۸/۲	۲/۳	۲۳/۶	۱۴/۳
	بهار	۶۱/۶	۳۶/۹	-۴۰	۲۸/۱	-۵۴/۴
	تابستان	۴/۲	۰/۶	-۸۶	۰/۳	-۹۱/۹
	پاییز	۶/۸	۲۷/۹	۳۰۸/۷	۱۷/۶	۱۵۸/۵
	سالانه	۲۵	۲۳/۴	-۶/۵	۱۷/۴	-۳۰/۴



شکل ۸ میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آینده تحت RCP2.6 و RCP8.5 در خروجی حوضه زربینه‌رود

به ترتیب، اعتبارسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس متغیرهای پیش‌بینی اقلیمی آینده (بارندگی، حداقل و حداکثر دما) از مدل HadGEM2-ES طی دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۰ در مدل CCT ریزمقیاس شدند و برای بررسی تأثیر احتمالی تغییر اقلیم بر رواناب، به ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) معرفی شدند.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه زربینه‌رود تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP 8.5 مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ابتدا مدل SWAT برای دوره‌های ۱۹۹۶-۲۰۱۳ و ۲۰۱۴-۲۰۱۷ در مقیاس زمانی ماهانه

به‌دست آمده توسط Qin و همکاران (۲۰۰۷) است. میانگین رواناب سالانه در دوره آینده نزدیک تحت هر دو سناریو کاهش یافته است. علاوه بر این، در دوره آینده دور میزان رواناب در اکثر سناریوها کاهش یافته است، بنابراین میانگین سالانه ورودی به دریاچه ارومیه کاهش می‌یابد. تغییرات اقلیمی تاثیر منفی بر ورودی‌های دریاچه ارومیه دارد که لزوم اجرای راهکارهای سازگاری را هشدار می‌دهد. این نتایج پیش‌بینی‌شده در مورد کاهش رواناب سالانه دوره‌های آبی در حوزه زرينه‌رود، مشابه مطالعات انجام شده برای دریاچه ارومیه توسط Heydari Tashah Kabood و همکاران (۲۰۲۰)، Sanikhani و همکاران (۲۰۱۸) و مطالعات انجام شده برای زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه توسط Kanani و همکاران (۲۰۱۹) و Shirmohammadi و همکاران (۲۰۲۰) می‌باشد.

Lian و همکاران (۲۰۲۱) پیش‌بینی کردند که تغییرات اقلیم باعث کاهش ۶۵/۶۴ درصد رواناب در حوضه رودخانه یانه^۱ می‌شود. از آنجایی که RCP8.5، بدبینانه‌تر از RCP2.6 است، افزایش دمای حداقل و حداکثر سالانه آن بیشتر ارزیابی شده است، اما میزان بارندگی در RCP8.5 کمتر ارزیابی شده است. از آنجایی که مدل‌های بارش-رواناب نسبت به تغییرات بارندگی حساس‌تر هستند (Fang et al., 2015)، رواناب حاصل از RCP8.5 در دوره آینده کمتر تخمین زده شد. علی‌رغم اینکه برای دوره آینده، افزایش بارندگی (تقریباً ۴ درصد) در سناریو RCP2.6 پیش‌بینی می‌شود، اما رواناب سالانه حوضه در هر دو سناریو در دوره آبی کاهش یافته است، زیرا در مدل‌سازی SWAT، مدیریت اراضی کشاورزی به‌طور جداگانه بر اساس هر زیرحوضه اجرا شد و کشاورزی در حوضه زرينه‌رود نیاز آبی بسیار بالایی دارد. در نتیجه بر میزان رواناب خروجی حوضه تاثیر گذاشته و باعث کاهش تخلیه رودخانه زرينه‌رود به دریاچه ارومیه می‌شود. در حال حاضر، بیشتر آب آبیاری برای کشاورزی در زرينه‌رود از آب‌های زیرزمینی، آب‌های سطحی و تاسیسات ذخیره‌سازی آب استخراج می‌شود. به‌منظور سازگاری با تاثیر منفی تغییر اقلیم بر رواناب حوضه زرينه‌رود، پیشنهاد می‌شود در طول دوره‌های کمبود آب، با به‌کارگیری یک مدل آبیاری، تخصیص آب آبیاری کشاورزی را کنترل کرد و با تغییر الگوهای کشت

نتایج نشان داد مدل SWAT کاربرد رضایت‌بخشی را برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز زرينه‌رود دارد، زیرا مدل تمام شرایط فیزیکی حوضه را جهت شبیه‌سازی در نظر می‌گیرد. همچنین ورودی‌های زیادی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در داخل مدل SWAT وجود دارد که توسط مدل استفاده می‌شود. نتایج به‌دست آمده در رابطه با ورودی‌های مدل SWAT مشابه نتایج Valeh و همکاران (۲۰۲۱) است. مقادیر R^2 ، NSE و PBIAS رواناب ماهانه شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی، ثابت می‌کند که این مدل هم برای محاسبه میزان رواناب و هم برای شبیه‌سازی رواناب تحت سناریوهای مختلف مناسب است. بر اساس مطالعه Santos و همکاران (۲۰۲۱) در زمینه مدل‌سازی تاثیر تغییر اقلیم بر رواناب، نتایج مدل SWAT خوب است. با توجه به اینکه مقدار p-factor در این تحقیق بیش از ۰/۵ و ضریب R-factor در این حوضه نیز کوچک‌تر از ۱/۵ است، در نتیجه نشان دهنده پیش‌بینی عدم قطعیت‌های منطقی است. با بررسی نتایج در دوره آینده، میانگین حداقل و حداکثر دمای سالانه در حوضه افزایش می‌یابد. همچنین بارش سالانه ۳/۶ درصد افزایش تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP 2.6) و ۲/۹ درصد کاهش تحت سناریوی بدبینانه (RCP 8.5) را نشان داد. این نتایج پیش‌بینی‌شده در دوره‌های آینده مشابه نتایج سایر مطالعات انجام شده در حوضه زرينه‌رود توسط Emami و Koch (۲۰۱۸) و دریاچه ارومیه توسط Alborzi و همکاران (۲۰۱۸) بود. با توجه به افزایش حداقل و حداکثر دما در دوره‌های آینده، می‌توان انتظار داشت که تبخیر افزایش یابد که می‌تواند منجر به کاهش منابع آبی دریاچه ارومیه و زرينه‌رود شود.

از آنجایی که در سناریوهای اقلیمی روند افزایشی دما در حوضه در پاییز قوی‌تر بود، می‌توان نتیجه گرفت که روند افزایشی رواناب در پاییز ناشی از افزایش دما در این فصل است، زیرا با افزایش دما الگوی بارش تحت تاثیر قرار گرفته است و رژیم بارش در پاییز از بارش برف به بارندگی تغییر کرده است. این امر نشان می‌دهد که در دوره آبی، آب شدن برف نسبت به گذشته تسریع می‌شود و وقوع سیل به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این نتیجه‌گیری مطابق با نتایج

- Mazdiyasn, O., Ashraf, S., Madani, K., Norouzi, H., Azarderakhsh, M., Mehran, A., Sadegh, M., Castelletti, A. and AghaKouchak, A. (2018) Climate-informed environmental inflows to revive a drying lake facing meteorological and anthropogenic droughts. *Environmental Research Letters*, 13(8), 084010. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad246/>
- Anoh, K.A., Koua, T.J.J., Koua, K.J., Jourda, J.P. and Laurent, F. (2017) Modelling water flow in a complex watershed in humid a tropical area using SWAT: A case study of Taabo watershed in Ivory Coast. *International Journal of River Basin Management*, 16(2): 157-167. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/15715124.2017.1387122/>
- Ashraf Vaghefi, S., Abbaspour, N., Kamali, B. and Mikayilov, F. (2017) A toolkit for climate change analysis and pattern recognition for extreme weather conditions – Case study: California-Baja California Peninsula. *Environmental Modelling and Software*, 96: 181-198. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.033/>
- Boithias, L., Sauvage, S., Lenica, A., Roux, H., Mikayilov, F., Larnier, K., Dartus, D. and Sánchez Pérez, J. (2017). Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water*, 9(12), 929. <https://doi.org/10.3390/w9120929>
- Boroughani, M., Hashemi, H., Hosseini, S.H., Pourhashemi, S. and Berndtsson, R. (2020) Desiccating lake Urmia: A new dust source of regional importance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(9): 1483-1487. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2949132/>
- Emami, F. and Koch, M. (2018) Evaluation of statistical-downscaling/bias-correction methods to predict hydrologic responses to climate change in the Zarrine river basin, Iran. *Climate*, 6(2): 30-30. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2225-1154/6/2/30/>
- Emami, F. and Koch, M. (2019) Modeling the impact of climate change on water availability in the Zarrine river basin and inflow to the Boukan Dam, Iran. *Climate*, 7(4): 51-51. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2225-1154/7/4/51/>
- Fang, G.H., Yang, J., Chen, Y.N. and Zammit, C. (2015) Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6): 2547-2559. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015/>
- Fu, Q., Shi, R., Li, T., Sun, Y., Liu, D., Cui, S. and Hou, R. (2019) Effects of land-use change and climate variability on streamflow in the Woken River basin in Northeast China. *River research and applications*, 35(2): 121-132.
- Hassanzadeh, E., Zarghami, M. and Hassanzadeh, Y. (2012) Determining the main factors in declining the Urmia lake level by using system dynamics modeling. *Water Resources Management*, 26(1): 129-145. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9909-8/>
- به گیاهانی با نیاز آبی کم و همچنین بازیافت آب بتوان کمبود آب را کاهش داد.
- منابع**
- رضایی‌زمان، م.، مرید، س. و دلاور، م. (۱۳۹۲) ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدروکلیماتولوژی حوضه سیمینه رود. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷(۶): ۱۲۴۷-۱۲۵۹.
- محمدعلیزاده‌فرد، ا.، میرموسوی، س.ح.، یاراحمدی، ج. و فرجی، ع. (۱۳۹۹) ارزیابی اثر تغییر اقلیم در مناطق فاقد آمار مشاهداتی با استفاده از بسته نرم‌افزاری CCT. مطالعه موردی حوضه دریان. نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۴(۷۳): ۳۰۵-۳۲۳.
- نادری، س.، علیجانی، ب.، حجازی‌زاده، ز.، عباسپور، ک. و حیدری، ح. (۱۳۹۸) آنالیز الگوهای دما و بارش در آینده با استفاده از CCT. مطالعه موردی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. کنفرانس بین‌المللی تغییر اقلیم، پیامدهای سازگاری و تعدیل. ایران، تهران، دانشگاه خوارزمی، ۲۱ خرداد ۱۳۹۸.
- Abbaspour, K. (2015) SWAT calibration and uncertainty programs—A user manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology: Eawag, Switzerland.
- Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S.S. and Yang, H. (2009) Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*, 45(10): W10434. Retrieved from <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>
- Ahmadaali, J., Barani, G.-A., Qaderi, K. and Hessari, B. (2018) Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia lake basin, Iran. *Water*, 10(2): 160-160. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/2/160/>
- Ahmadi, M., Motamedvaziri, B., Ahmadi, H., Moeini, A. and Zehtabian, G.R. (2020) Assessment of the impact of climate change on runoff on the kan watershed in the future. *Watershed Management Research*, 33(2): 66-81. Retrieved from <https://doi.org/10.22092/wmej.2019.127163.1247/>
- Ahmadzadeh, H., Morid, S., Delavar, M. and Srinivasan, R. (2016) Using the SWAT model to assess the impacts of changing irrigation from surface to pressurized systems on water productivity and water saving in the Zarrineh Rud catchment. *Agricultural Water Management*, 175:15-28
- Alborzi, A., Mirchi, A., Moftakhari, H., Mallakpour, I., Alian, S., Nazemi, A., Hassanzadeh, E.,

- Switzerland in a changing climate – runoff regime changes and their time of emergence. *Hydrology and Earth System Sciences.*, 25(6): 3071-3086. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/hess-25-3071-2021/>
- Neitsch, S., Arnold, J.G., Kiniry, J., Williams, J. and King, K. (2005) Soil and water assessment tool (SWAT) theoretical documentation. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas (BRC Report 02-05).
- Qin, D., Chen, Z., Averyt, K., Miller, H., Solomon, S., Manning, M., Marquis, M. and Tignor, M. (2007) *Ipcc, 2007: Summary for policymakers.*
- Sanikhani, H., Kisi, O. and Amirataee, B. (2018) Impact of climate change on runoff in Lake Urmia basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(2): 491-502. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2091-z/>
- Santos, J.Y.G.d., Montenegro, S.M.G.L., Silva, R.M.d., Santos, C.A.G., Quinn, N.W., Dantas, A.P.X. and Ribeiro Neto, A. (2021) Modeling the impacts of future LULC and climate change on runoff and sediment yield in a strategic basin in the Caatinga/Atlantic forest ecotone of Brazil. *CATENA*, 203, 105308. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105308/>
- Sellami, H., Benabdallah, S., La Jeunesse, I. and Vanclooster, M. (2016) Quantifying hydrological responses of small Mediterranean catchments under climate change projections. *Science of The Total Environment*, 543: 924-936. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.006/>
- Shang, X., Jiang, X., Jia, R. and Wei, C. (2019) Land use and climate change effects on surface runoff variations in the upper Heihe river basin. *Water*, 11(2): 344-344. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-344/2/11/4441/>
- Shi, H. and Wang, G. (2015) Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River. *Hydrological Processes*, 29(14): 3236-3246.
- Shirmohammadi, B., Malekian, A., Salajegheh, A., Taheri, B., Azarnivand, H., Malek, Z. and Verburg, P.H. (2020) Impacts of future climate and land use change on water yield in a semiarid basin in Iran. *Land Degradation and Development*, 31(10), 1252-1264.
- Vaghefi, S.A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H. and Abbaspour, K.C. (2019) The future of extreme climate in Iran. *Scientific reports*, 9(1): 1464-1464. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8/>
- Valeh, S., Motamedvairi, B., Kiadaliri, H. and Ahmadi, H. (2021) Hydrological simulation of Ammameh basin by artificial neural network and SWAT models. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 123, 103014. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103014/>
- Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J. and Piontek, F. (2013) A trend-preserving bias correction and ndash; the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics.*, 4(2): 219-236. Retrieved from <https://doi.org/10.5194/esd-4-219-2013/>
- Heydari Tasheh Kabood, S., Hosseini, S.A. and Heydari Tasheh Kabood, A. (2020) Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1): 329-339. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00681-0/>
- Hu, J., Ma, J., Nie, C., Xue, L., Zhang, Y., Ni, F., Deng, Y., Liu, J., Zhou, D., Li, L. and Wang, Z. (2020) Attribution Analysis of Runoff Change in Min-Tuo River Basin based on SWAT model simulations, China. *Scientific Reports*, 10(1): 2900. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59659-z/>
- Jalili, S., Hamidi, S.A. and Namdar Ghanbari, R. (2016) Climate variability and anthropogenic effects on Lake Urmia water level fluctuations, Northwestern Iran. *Hydrological Sciences Journal*, 61(10): 1759-1769. Retrieved from <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1036757/>
- Kanani, R., fakheri fard, A., Ghorbani, M.A. and Dinpashoh, Y. (2019) Analysis of the role of climatic and human factors in runoff variations, case study Lighvan River in Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 11(1): 291-302. Retrieved from <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.186/>
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J. and Meehl, G.A. (2010) Challenges in combining projections from multiple climate models. *Journal of Climate*, 23(10): 2739-2758.
- Lian, Y., Sun, M., Wang, J., Luan, Q., Jiao, M., Zhao, X. and Gao, X. (2021) Quantitative impacts of climate change and human activities on the runoff evolution process in the Yanhe River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 122, 102998. Retrieved from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.102998/>
- Luo, K., Tao, F., Moiwo, J.P. and Xiao, D. (2016) Attribution of hydrological change in Heihe River Basin to climate and land use change in the past three decades. *Scientific reports*, 6(1): 33704. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/srep33704/>
- Mahmudi, P., Motamedvaziri, B., Hosseini, M., Ahmadi, H. and Amini, A. (2021) Study of climate change effects on hydrological processes in Siminehroud and Zarrinehroud watersheds Northwest of Iran. *Earth Science Informatics*, 14(2): 965-974. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00598-2/>
- Mittal, N., Bhave, A.G., Mishra, A. and Singh, R. (2016) Impact of human intervention and climate change on natural flow regime. *Water Resources Management*, 30(2): 685-699. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1185-6/>
- Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. and Martius, O. (2021) River runoff in

- Yu, Y., Liu, J., Yang, Z., Cao, Y., Chang, J. and Mei, C. (2018) Effect of climate change on water resources in the Yuanshui River Basin: a SWAT model assessment. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(11): 270-270. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3619-y/>
- Zhang, A., Liu, W., Yin, Z., Fu, G. and Zheng, C. (2016b) How will climate change affect the water availability in the Heihe river basin, Northwest China. *Journal of Hydrometeorology*, 17(5): 1517-1542. Retrived from <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0058.1/>
- Zhang, C., Zhang, B., Li, W. and Liu, M. (2014) Response of streamflow to climate change and human activity in Xitiaoxi river basin in China. *Hydrological Processes*, 28(1): 43-50.
- Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y. and Li, S. (2016a) Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe river basin, Northwest China. *PLoS One*, 11(6): e0158394. Retrived from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158394/>
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. and Srinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1): 10-23. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008/>
- Wu, F., Zhan, J., Su, H., Yan, H. and Ma, E. (2015) Scenario-based impact assessment of land use/cover and climate changes on watershed hydrology in Heihe river basin of Northwest China. *Advances in Meteorology*, 2015: 410198. Retrived from <https://doi.org/10.1155/2015/410198/>
- Yazdandoost, F., Moradian, S. and Izadi, A. (2020) Evaluation of water sustainability under a changing climate in Zarrineh river basin, Iran. *Water Resources Management*, 34(15): 4831-4846. Retrived from <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02693-3/>
- Ye, X., Zhang, Q., Liu, J., Li, X. and Xu, C.-y. (2013) Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. *Journal of Hydrology*, 494: 83-95. Retrived from <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.036/>

Prediction of runoff changes in Zarrineh river basin under climate change conditions via hydrological simulation

Maliheh Rahvareh¹, Baharak Motamedvaziri^{2*}, Alireza Moghaddamnia³ and Ali Moridi⁴

- 1) Ph.D candidate of Watershed Management Science and Engineering, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
- 2) Assistant professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran. *Corresponding Author Email Address: bmvaziri@gmail.com
- 3) Associate Professor, Department of Rehabilitation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
- 4) Assistant professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

Date of Submission: 2020/11/07

Date of Acceptance: 2021/03/09

Abstract

It is necessary to study the behavior of the river under the effect of climate change, especially the runoff in the future periods. This study evaluated the effect of climate change on the runoff of Zarrineh river basin (the largest sub-basin of Lake Urmia) considering the General Circulation Model (GCM) under two Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios (2.6 and 8.5). For this purpose, temperature and precipitation changes in the future periods in Zarrineh river basin were studied using climate data of Had GEM2-ES model during the period 2025-2050. The Climate Change Toolkit (CCT) was used to downscale climate data. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrological model was used to evaluate the impact of climate change on runoff the basin. Also, the SWAT model was calibrated and validated using monthly runoff. Then, downscaled results of the general circulation model interoduced to the SWAT model. And runoff changes at the outlet of the basin were simulated during 2025-2050. The results showed that the SWAT model has good performance in runoff simulation. The average results of the CCT model revealed that the maximum and minimum temperatures would increase in 2025-2050. The annual precipitation could increase 3.6% under RCP 2.6 and decrease 2.9% under RCP 8.5. The seasonal trends in the runoff showed a decreasing trend in winter, spring and summer while an increasing trend in autumn. Annual runoff under RCP 2.6 and RCP 8.5 has decreased 6.5% and 30% respectively. Which subsequently reduces the discharge of this river to Lake Urmia.

Keywords: Climate change, HadGEM2-ES, RCP scenarios runoff, SWAT model, Zarrineh river basin.