

## بررسی آثار تغییر اقلیم بر برخی ویژگی‌های هیدرولوژیک منابع آب استان اردبیل

آرش ملکیان<sup>۱\*</sup>، مهسا میردشتوان<sup>۲</sup>، مهرنوش قدیمی<sup>۳</sup>

۱. دانشیار دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲. فارغ‌التحصیل دکتری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳. استادیار دانشکده جغرافی دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۲/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۵/۲۴)

### چکیده

تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آینده، سبب ایجاد تغییراتی در بارش و دما می‌شود و این تغییرات به عنوان بزرگ‌ترین معضل قرن ۲۱ به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. از این رو، بررسی تغییرات اقلیمی دوره آتی و آسیب‌پذیری منابع آب نسبت به آن ضروری است. برای پیش‌بینی آثار تغییر اقلیم روی وضعیت هیدرولوژیک استان اردبیل، ابتدا مقادیر متغیرهای اقلیمی برای دهه‌های آینده و تحت سناریوهای اقلیمی پیش‌یابی شد. سپس، با استفاده از خروجی‌های به‌وجودآمده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل گردش عمومی جو استفاده‌شده، به شبیه‌سازی و پیش‌بینی وضعیت هیدرولوژیک منطقه مطالعه‌شده اقدام شد. نتایج برگرفته از شبیه‌سازی‌ها توسط مدل بیلان بیان‌کننده تغییرات نامحسوس و غیر معنادار جریان سطحی کل در دوره آتی در حوضه‌های بررسی شده نسبت به دوره مرجع است. با این حال، تغییر در پارامترهای اصلی اقلیمی نظیر بارش و دما روی اجزای جریان سطحی تأثیراتی حدود ۳۰ درصد دارد، به طوری که میزان جریان سطحی‌ای که روی زمین جاری می‌شود در تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که این امر ارتباط مستقیم با کاهش میزان بارش‌ها در دوره آتی و نیز افزایش متوسط دمای منطقه دارد. در مورد ذخیره آب زیرزمینی در منطقه نیز با توجه به کاهش محسوس بارش و نیز کاهش رطوبت در دسترس خاک و همچنین افزایش دما که به افزایش میزان تبخیر از سطح خاک منجر می‌شود، منطقه در دوره آتی تحت تمامی سناریوهای انتشار روندی کاهش از خود نشان می‌دهد.

**کلیدواژگان:** استان اردبیل، تغییر اقلیم، منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژیک.

## مقدمه

طی چند دهه گذشته، گرم شدن آب و هوا در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی مشاهده شده است [۱]. افزایش شواهد مربوط به گرمایش جهانی نشان می‌دهد با وجود برخی ابهام‌ها در مورد گرم شدن کره زمین، هوا دچار تغییرات درخور توجهی شده است، به طوری که طی دوره ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۵ میلادی دمای کره زمین  $0.74 \pm 0.18$  درجه سانتی‌گراد تغییر کرده است [۲]. بنابراین، گرمایش جهانی در ۱۰۰ سال گذشته حدود  $0.75$  درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که این مقدار در ۲۵ سال گذشته حدود  $0.18$  درجه سانتی‌گراد در هر دهه بوده است. انتظار می‌رود تا پایان قرن ۲۱ میلادی، دمای هوا در سطح جهانی از  $1/8$  تا  $4$  درجه سانتی‌گراد افزایش یابد. برخی موارد از تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم عبارت‌اند از: تغییرات در چرخه آب، بالا آمدن سطح دریا، کاهش سطح آب دریاچه‌ها، نفوذ آب شور به آب‌های شیرین و مهاجرت گونه‌ها به دلیل گرم شدن کره زمین و تغییر کیفیت آب [۳]. تأثیر تغییر اقلیم بر دسترسی به آب از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت خواهد بود، به طوری که در برخی مناطق با کاهش بارندگی، فشار بر منابع آبی افزایش خواهد یافت و در مناطقی دیگر در نتیجه افزایش بارندگی و بالا آمدن سطح آب دریا، با خطر سیلاب و به زیر آب رفتن مواجه خواهند شد. همچنین، مساحت مناطق بسیار مرطوب و خیلی خشک جهان از سال ۱۹۷۲ از ۲۰ درصد به ۳۸ درصد افزایش پیدا کرده است که نشان‌دهنده تأثیر شدید وقایع حدی است. براساس گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم IPCC<sup>۱</sup> افزایش خشکسالی در عرض‌های پایین و میانی (از جمله ایران) در تابستان محتمل است. انتظار می‌رود که در قرن آینده مناطق نیم‌کره شمالی، به‌ویژه در فصل تابستان، خشک‌تر شود [۴]. آثار تغییر اقلیم بر زندگی بشر اجتناب‌ناپذیر است، به همین سبب بررسی و پیش‌بینی تغییر اقلیم و تأثیرات آن در دوره‌های آتی و ارائه راه‌کارهای سازگاری با آن اهمیت درخور توجهی دارد. از آنجا که کشورهای واقع‌شده در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر، بیشترین آثار منفی تغییر اقلیم را متحمل خواهند شد، بنابراین کشور ایران هم با توجه به قرارگیری در عرض جغرافیایی پایین از تأثیرات ناشی از این پدیده مصون نخواهد

بود [۵]. براساس مدل‌های اقلیم جهانی در میانه قرن ۲۱، آب قابل دسترس و میانگین رواناب رودخانه‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا افزایش خواهد یافت، در حالی که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک منابع آبی با کاهش مواجه خواهد شد. در مناطق کوهستانی، از یک طرف افزایش دما سبب ذوب شدن مخازن طبیعی ذخیره‌شده به صورت برف خواهد شد؛ و از طرف دیگر در حوزه‌های برفی، مقدار ریزش باران نسبت به برف افزایش می‌یابد و ذوب برف‌ها هم به سرعت انجام می‌شود. همچنین، شواهد روند افزایشی سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و تغییرات درازمدت متغیرهای هیدرولوژیک در مناطق مختلف دنیا را نشان می‌دهد. طبق گزارش IPCC مناطق آسیایی در مقابل تغییر اقلیم آسیب‌پذیر خواهند بود، به طوری که براساس مدل‌سازی‌های IPCC در منطقه خاورمیانه بیش از ۸۰ تا ۱۰۰ میلیون نفر تا سال ۲۰۵۰ در معرض کمبود آب قرار خواهند گرفت و آب‌های زیرزمینی نیز کاهش سریعی می‌یابد [۷]. وانگ و همکارانش در تحقیقی روی حوضه‌ای در چین، اثر تغییر اقلیم بر منابع آبی آنجا را طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹ بررسی کردند. آنها به منظور شبیه‌سازی تغییرات بارش، از مقادیر کمینه و بیشینه دما و چهار مدل گردش عمومی جو استفاده کردند و نوعی مدل هیدرولوژیک را برای شبیه‌سازی تغییرات رواناب خروجی در نتیجه تغییرات اقلیمی با مدل‌های اقلیمی و سناریوهای یادشده به کار گرفتند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد بارش سالانه بین  $2/3$  تا  $7/8$  درصد تغییر خواهد کرد و دمای بیشینه و کمینه به ترتیب از  $0.7$  تا  $2/2$  و  $1/2$  تا  $2/8$  درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. مقدار رواناب از  $19/8$  تا  $37$  درصد و رطوبت خاک از  $5/5$  تا  $17/2$  تغییر خواهد کرد و تبخیر - تعرق بین  $0.1$  تا  $5/9$  درصد افزایش خواهد یافت [۸]. تقوی و همکارانش به بررسی تأثیر تغییر اقلیم در حوضه آبخیز سیوران در شمال شرق اسپانیا پرداختند. به این ترتیب که پس از پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در بازه زمانی ۲۰۱۳-۲۰۳۷ و ۲۰۳۶-۲۰۶۲ با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5 بر پایه سناریوهای اقلیمی از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS، بارش-رواناب در دوره‌های یادشده را ارزیابی کردند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در پژوهش یادشده نشان داد تغییرات آب‌وهوایی پیش‌بینی‌شده، کاهش حداکثر ۵۶ درصدی منابع آب در کل سیستم هیدرولوژیکی حوضه آبخیز سیوران را در

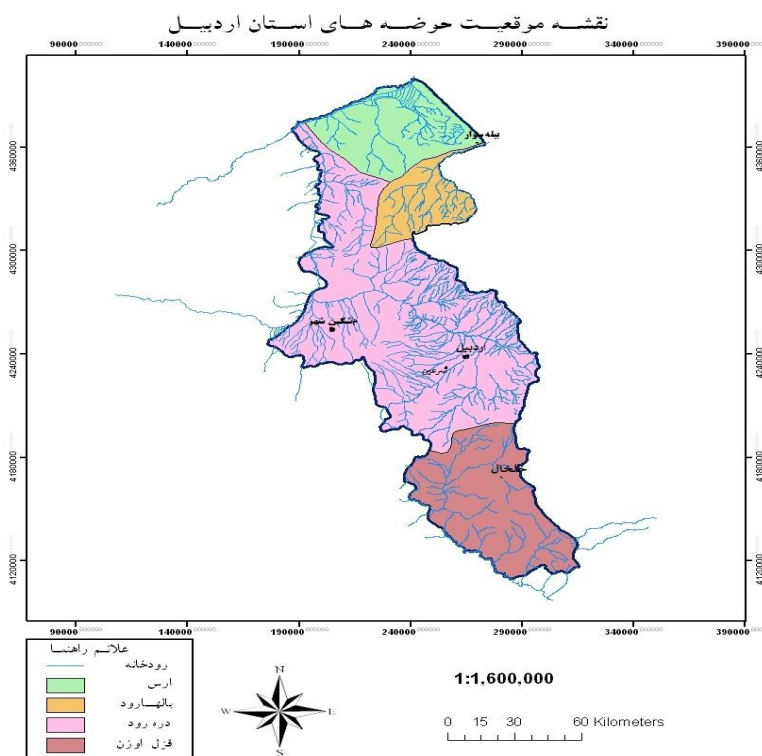
سناریوهای استفاده شده، یخچال‌های منطقه به طور کامل ذوب خواهند شد که این شرایط سبب کاهش دسترسی به منابع آبی و کمبود در آب مورد نیاز کشاورزی می‌شود که اقتصاد منطقه وابسته به آن است [۱۲]. به دلیل وابستگی استان اردبیل به تولیدات کشاورزی و مرتعداری و با توجه به آثار وسیع اقتصادی و اجتماعی تغییر اقلیم بر منابع آب، اطلاع از چگونگی بروز چنین تغییراتی در برنامه‌ریزی‌های محیطی بسیار مؤثر خواهد بود. از این رو، مطالعه حاضر برای آشکارسازی چگونگی تغییرات آب‌وهوایی استان اردبیل طی دوره‌های آتی صورت خواهد گرفت تا با بهره‌گیری از نتایج پژوهش حاضر، بتوان با به‌کارگیری تدابیر لازم، آثار تغییر اقلیمی بر این منطقه را کاهش داد و سازگاری بیشتری با شرایط آبی به انجام رساند. در مطالعه حاضر به بررسی آثار تغییر اقلیم بر برخی ویژگی‌های بیلان آبی منابع آب استان اردبیل با استفاده از سناریوهای RCPs پرداخته می‌شود.

## روش کار

### منطقه مطالعه شده

استان اردبیل در شمال غربی کشور با مساحت ۱۷۹۵۳ کیلومترمربع در حوضه آبخیز دریای خزر (یکی از حوضه‌های درجه ۱ شش‌گانه ایران) واقع شده است. براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، اقلیم منطقه براساس شاخص خشکی به‌دست‌آمده در یکی از شش طبقه اقلیمی (خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب) قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد در محدوده مطالعه شده بین شش نوع اقلیم موجود در منطقه، اقلیم نیمه‌خشک با داشتن ۵۳/۴ درصد از محدوده مطالعه شده، اقلیم غالب منطقه است. محدوده‌های اردبیل، مشکین‌شهر و مغان دارای اقلیم غالب نیمه‌خشک و محدوده خلخال دارای اقلیم نیمه‌مرطوب است. قسمت‌های میانی و شمالی آن یعنی محدوده‌های اردبیل، مشکین‌شهر و مغان (زیرحوضه‌های فرعی‌تر) جزء حوضه درجه ۲ ارس (یکی از حوضه‌های درجه ۲ سی‌گانه ایران) و قسمت‌های جنوبی این استان یعنی محدوده خلخال جزء حوضه درجه ۲ سفیدرود است. شکل ۱ موقعیت استان اردبیل و زیرحوضه‌های واقع در آن را نشان می‌دهد.

پی دارد، به طوری که برای دوره ۲۰۳۶-۲۰۶۲ افزایش دما تا ۲/۲ درجه سانتی‌گراد و کاهش حجم بارش به اندازه ۱۱ درصد پیش‌بینی می‌شود [۸]. آرنولد با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تغییر اقلیم GCM و مدل هیدرولوژیکی باران-رواناب IHACRES به مطالعه اثر اقلیم بر منابع آب جنوب غرب استرالیا پرداخت و به این نتیجه رسید که تا سال ۲۰۳۰ آب‌های سطحی ۲۴ درصد و آب‌های زیرزمینی حدود ۲ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. آنان بیان کردند که با توجه به مصرف سرانه فعلی آب، رشد سریع جمعیت و اقتصاد به همراه کاهش بازده آب، انتظار می‌رود که برخی از شهرهای جنوب غربی استرالیا تا سال ۲۰۳۰ دچار کمبود گسترده در منابع آب سطحی و زیرزمینی قابل دسترس شوند [۹]. شوک و همکارانش با استفاده از مدل IAP-FGOALS و تحت سناریوهای گزارش پنجم IPCC (AR5)، جریان‌های مونسون در شرق آسیا را بررسی کردند. نتایج پیش‌بینی‌های آنها بیان‌کننده افزایش دما در زمستان‌های آینده است که این افزایش دما بین یک تا سه درجه سانتی‌گراد بر اساس سناریوی RCP4.5 خواهد بود و همچنین از چهار تا نه درجه سانتی‌گراد براساس سناریوی RCP8.5 است [۱۰]. وانگ و همکارانش آثار تغییر اقلیم را براساس سناریوهای گزارش پنجم IPCC بر جریان سطحی حوضه رودخانه Hoeya کره جنوبی بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد جریان سطحی در فصول بهار و زمستان روند کاهشی دارد و در فصول تابستان و پاییز افزایش خواهد داشت [۱۱]. زوبولیس و تولکو در منطقه کوهستانی مندوزا در غرب آرژانتین، تأثیرات تغییر اقلیم روی منابع آبی منطقه مطالعه شده را بررسی کردند. آنها برای شبیه‌سازی تأثیر سناریوهای اقلیمی روی رواناب از مدل SWAT استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با در نظر گرفتن سناریوهای اقلیمی IPCC با وجود کاهش رواناب به سبب کاهش بارندگی، در نتیجه ذوب یخچال‌ها در منطقه مطالعه شده به سبب افزایش دما، مقدار رواناب خروجی از حوزه افزایش می‌یابد. به طور کلی، سناریوهای اقلیمی از یک تا ۱۰ درصد کاهش دسترسی به منابع آبی را نشان داد. به علاوه، سناریوهای اقلیمی تحت شرایط تغییرات شدید اقلیمی بدون در نظر گرفتن داده‌های یخچال‌ها حدود ۱۱/۸ درصد کاهش در جریان دبی رودخانه را نشان داد. همچنین، نتایج بیان می‌کرد که تحت



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده در تحقیق حاضر

### روش تحقیق

تحقیق حاضر شامل مراحل زیر است:

در مرحله نخست پس از مطالعه ویژگی های طبیعی منطقه، به جمع آوری داده ها و اطلاعات مورد نیاز برای مراحل مختلف تحقیق اقدام می شود. سپس، داده ها و اطلاعات به دست آمده در مرحله نخست، در قالب های مورد نیاز طبقه بندی و مرتب شده و به لحاظ کیفی ارزیابی می شوند. بررسی تغییرات اقلیمی احتمالی در دوره زمانی پایه و بررسی مدل های اقلیمی و سناریوهای انتشار برای محدوده مطالعه شده و کوچک مقیاس سازی خروجی های بزرگ مقیاس اقلیمی مربوط به مدل گردش عمومی جو منتخب در مرحله پیشین انجام می شود. در نهایت، مؤلفه های بیلان آبی منطقه با استفاده از داده های تولید شده در مرحله پیشین بررسی می شوند.

### الف) انتخاب ایستگاه ها و کنترل کیفیت داده ها

در تحقیق حاضر پس از انتخاب ایستگاه های منتخب دارای آمار کافی شامل ایستگاه های اردبیل، بيله سوار، سرعین، گرمی، مشکین شهر، فرودگاه اردبیل، خلخال و مغان طی دوره آماری موجود، همگنی و تصادفی بودن داده ها با

روش غیر نموداری آزمون توالی و استقلال داده ها با کاربرد آزمون ناپارامتری من - ویتنی بررسی شد.

### ب) بررسی تغییرات اقلیمی در دوره فعلی

برای بررسی تغییرات اقلیمی احتمالی رخ داده در دوره کنونی در محدوده های مطالعاتی استان اردبیل، متغیرهای دما و بارش بررسی و تحلیل شد. در واقع، وجود روند در سری زمانی داده های اقلیمی می تواند به عنوان نشانه ای از وقوع تغییرات اقلیمی مطرح شود، زیرا در صورتی که میانگین داده های اقلیمی نسبت به زمان ثابت باشد، بیان کننده نبود روند و در نتیجه عدم تغییر در میانگین واریانس پارامترهای اقلیمی است، در حالی که هرگونه تغییر در میانگین پارامترهای اقلیمی نسبت به زمان به عنوان تغییر در اقلیم محسوب می شود. در تحقیق حاضر با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال به بررسی وجود داشتن یا نداشتن روند معنادار در سری داده های یاد شده پرداخته شد.

### ج) بررسی تغییرات اقلیمی در دوره های آتی

در حال حاضر، معتبرترین ابزار برای پیش بینی تغییرات اقلیمی در آینده، استفاده از خروجی های مدل های گردش عمومی جو (GCM) است (مهدی زاده و همکاران، ۱۳۹۰).

واقعی، نفوذ درون ناحیه تهویه، نفوذ آب به داخل سفره آب زیرزمینی، رواناب کل (رواناب مستقیم، جریان میانی، جریان پایه) و ذخیره آب حاصل از ذوب برف. برخی الگوریتم‌های مدل براساس شرایط ویژه هر ماه استفاده می‌شوند. مدل با استفاده از داده‌های دمای ماهانه میان شرایط تابستان و زمستان تفاوت قائل می‌شود. اگر دمای میانگین هر ماه به صورت معادله ۱ باشد، مدل شرایط را تابستان تشخیص می‌دهد:

$$t_i \geq 0 \quad (1)$$

که در آن،  $t$  میزان متوسط دما در هر ماه و  $i$  شماره ماه مد نظر است. همین الگوریتم برای شرایط زمستان به کار می‌رود، در صورتی که دمای میانگین هر ماه منفی باشد. مدل با استفاده از مجموع سه مؤلفه زیر رواناب کلی را شبیه‌سازی می‌کند (رابطه ۲):

$$rm(i) = dr(i) + I(i) + bf(i) \quad (2)$$

که در آن  $dr(i)$ ،  $I(i)$  و  $bf(i)$  به ترتیب رواناب مستقیم، جریان میانی و جریان پایه هستند. مؤلفه جریان مستقیم جریانی است که به عنوان مؤلفه جریان سریع مد نظر قرار می‌گیرد که در دسترس تبخیر نیست و بیلان آبی خاک روی آن تأثیری ندارد. جریان میانی از بیلان آب در نتیجه آب اضافی در ناحیه تهویه در ماه مد نظر به وجود می‌آید. مؤلفه جریان پایه هم که زمان تأخیر طولانی و بیشتر از یک ماه در حوضه را دارد، توسط جریان آب زیرزمینی منطقه تأمین می‌شود. ذخیره آب زیرزمینی در هر ماه به عنوان مجموع ذخیره در ماه قبلی و جریان نفوذی محاسبه می‌شود. همان‌طور که گفته شد، جریان پایه به عنوان خروجی از آب زیرزمینی در نظر گرفته می‌شود که در ابتدای هر ماه بر ذخیره آب زیرزمینی تقسیم شده و توسط پارامتر  $Grd$  کنترل می‌شود (رابطه ۳):

$$bf(i) = Grd * gs(i-1) \quad (3)$$

بنابراین، ذخیره آب زیرزمینی در پایان هر ماه از طریق معادله ۴ به دست می‌آید:

$$gs(i) = rc(i) + (1 - Grd) * gs(i-1) \quad (4)$$

در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های اقلیمی پیش‌یابی شده برای دوره‌های زمانی آتی که در واقع با

در پژوهش حاضر از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2 استفاده می‌شود. به منظور دریافت آمار و ارقام مدل گردش عمومی یادشده از سایت شبکه داده‌های تغییر اقلیم کانادا<sup>۱</sup> خروجی مدل گردش عمومی یادشده برای شبکه مرتبط با منطقه مطالعه شده دریافت شد که داده‌های مورد نیاز برای ورود به مدل کوچک‌مقیاس‌سازی SDSM سری CMIP5 تحت سناریوهای انتشار RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 با قدرت تفکیک پذیری ۱\*۱ درجه به‌روزرسانی شده است. در تحقیق حاضر سری داده‌های محدوده مطالعه شده براساس داده‌های دوره پایه NCEP، داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های سینوپتیک و خروجی‌های بزرگ مقیاس مدل CanESM2، برای پیش‌بینی دما و بارش تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره نزدیک تغییر اقلیم (۲۰۱۱-۲۰۴۰) شبیه‌سازی شد. سناریوهای یادشده به ترتیب بیان‌کننده سناریوی انتشار پایین، سناریوی موازنه ثانویه و سناریوی انتشار بالاست.

#### د) بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب

با توجه به آنکه آب یکی از منابعی است که در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی قرار دارد، بررسی تأثیرات آن در سال‌های آینده بر شدت و فراوانی وقوع خشکسالی و سیلاب یک منطقه اهمیت زیادی دارد، به طوری که طبق گزارش IPCC تغییر اقلیم می‌تواند سبب افزایش احتمال وقوع رخداد‌های حدی اقلیمی مانند خشکسالی و سیلاب در بعضی مناطق کره زمین شود [۵]. در تحقیق حاضر از مدل بیلان برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب یک حوضه استفاده شده است. مدل یادشده براساس مجموعه‌ای از روابط است که مفاهیم پایه‌ای بیلان آب را برای مناطق اشباع و غیر اشباع توصیف می‌کند. گام زمانی استفاده شده برای محاسبه بیلان آب سری‌های زمانی ماهانه بارش و دمای حوضه هستند؛ علاوه بر این سری‌های زمانی رطوبت نسبی هوا یا تبخیر-تعرق پتانسیل مورد نیازند. برای واسنجی پارامترهای مدل (با استفاده از نوعی الگوریتم بهینه‌سازی) نیاز به مقایسه سری‌های زمانی ماهانه رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در خروجی حوضه است. سری‌های زمانی شبیه‌سازی شده در مدل «بیلان» عبارت‌اند از: تبخیر - تعرق پتانسیل، تبخیر

1. <http://www.ccsn.ec.gc.ca>

2. Statistical Downscaling Model

سطح ۵ درصد معنادار نیست. بیشترین میزان شیب روند در میان ایستگاه‌های بررسی شده متعلق به ایستگاه سرعین (۰/۱۲۸) و کمترین میزان شیب روند افزایشی متعلق به ایستگاه مغان (۰/۰۰۶) است.

نتایج محاسبه آماره آزمون من-کندال برای مجموع بارش منطقه برای هشت ایستگاه و در مقیاس زمانی سالانه در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج پیداست، مجموع بارش سالانه در بیشتر ایستگاه‌های بررسی شده (به جز ایستگاه‌های اردبیل و خلخال) از روندی افزایشی تبعیت می‌کنند. با این وجود، در هیچ یک از ایستگاه‌ها این روند افزایشی و حتی روند کاهشی در ایستگاه‌های اردبیل و خلخال، به لحاظ آماری و در سطح ۵ درصد معنادار نیست. بیشترین میزان شیب روند در میان ایستگاه‌های بررسی شده متعلق به ایستگاه گرمی (۴/۵۶۷) و کمترین میزان شیب روند افزایشی مربوط به ایستگاه مغان (۰/۶۰۴) است. همچنین، بیشترین مقدار روند کاهشی بارش متعلق به ایستگاه اردبیل (۱/۹۰۶-) است.

استفاده از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و براساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی تولید شده‌اند، شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی منطقه در دوره آتی با استفاده از مدل بیلان، صورت می‌گیرد.

## یافته‌ها

### بررسی تغییرات اقلیمی در دوره کنونی

در تحقیق حاضر به منظور مطالعه روند متغیرهای اقلیمی، از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد. از آنجا که آزمون یادشده قادر به برآورد اندازه روند (در صورت وجود) نیست، بنابراین روش ناپارامتری تخمینگر شیب سن برای برآورد اندازه روند متغیرهای اقلیمی به کار برده شد. نتایج محاسبه آماره آزمون من-کندال برای دمای میانگین منطقه برای هشت ایستگاه و در مقیاس زمانی سالانه در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج پیداست، دمای میانگین در تمامی ایستگاه‌های بررسی شده (به جز ایستگاه فرودگاه اردبیل) از روندی افزایشی تبعیت می‌کنند، با این حال در هیچ یک از ایستگاه‌ها این روند افزایشی به لحاظ آماری و در

جدول ۱. نتایج آزمون من-کندال و تخمینگر سن برای دمای میانگین سالانه

ایستگاه	آماره آزمون من-کندال	مقادیر معناداری	آماره سن
اردبیل	۰/۱۰۸	۰/۳۳۹	۰/۰۲۴
بيله‌سوار	۰/۲۳۶	۰/۳۵۰	۰/۰۳۵
خلخال	۰/۰۷۴	۰/۵۹۴	۰/۰۱۵
سرعین	۰/۳۵۱	۰/۱۳۰	۰/۱۲۸
فرودگاه اردبیل	-۰/۳۴۵	۰/۱۶۱	-۰/۱۳۳
گرمی	۰/۲۸۹	۰/۲۸۳	۰/۰۵۴
مشکین شهر	۰/۱۸۹	۰/۲۵۶	۰/۰۵۳
مغان	۰/۰۳۲	۰/۸۱۲	۰/۰۰۶

جدول ۲. نتایج آزمون من-کندال و تخمینگر سن برای مجموع بارش سالانه

ایستگاه	آماره آزمون من-کندال	مقادیر معناداری	آماره سن
اردبیل	-۰/۱۹۸	۰/۰۷۷	-۱/۹۰۶
بيله‌سوار	۰/۱۲۷	۰/۶۴۰	۲/۷۱۳
خلخال	-۰/۱۱۶	۰/۳۹۶	-۱/۵۲۷
سرعین	۰/۱۵۲	۰/۵۳۷	۴
فرودگاه اردبیل	۰/۱۶۴	۰/۵۳۳	۱/۷
گرمی	۰/۳۳۳	۰/۲۱۰	۴/۵۶۷
مشکین شهر	۰/۱۱۶	۰/۴۹۶	۲/۶۱۴
مغان	۰/۰۴۹	۰/۷۰۸	۰/۶۰۴

متغیرهایی که بیشترین همبستگی را با متغیرهای اقلیمی منطقه (دما و بارش) داشتند، انتخاب شدند.

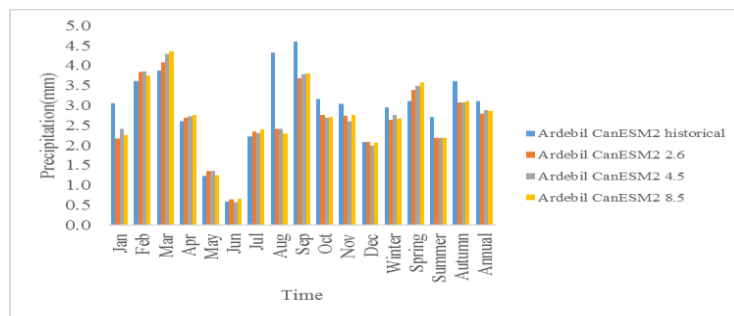
### بررسی تغییرات اقلیمی دوره آبی

همان طور که در شکل‌های ۲-۵ مشاهده می‌شود، به طور میانگین بارش روزانه در سه ایستگاه اردبیل- مغان و خلخال که معرف سه شرایط متفاوت آب‌وهوایی منطقه هستند، در دهه ۲۰۲۰ میلادی (۲۰۱۱-۲۰۴۰ میلادی) در مقیاس سالانه و تحت هر سه سناریوی انتشار در ایستگاه‌های اردبیل و خلخال روند کاهشی دارد، با این وجود متغیر بارش در ایستگاه مغان از روند افزایشی تبعیت می‌کند. ایستگاه اردبیل در تمامی فصول در دوره آبی با کاهش میزان بارش نسبت به دوره پایه مواجه خواهد شد. در ایستگاه خلخال، در فصول زمستان و بهار روند افزایشی بارش را خواهیم داشت، در حالی که این روند برای فصل پاییز، کاهشی است. در فصل تابستان نیز به جز سناریوی ۴/۵، سایر سناریوها روند کاهشی را نشان می‌دهند. نتایج بررسی تغییرات متغیر بارش در منطقه مطالعه شده نشان می‌دهد کمینه بارش متعلق به ماه ژوئیه در ایستگاه اردبیل و برای تمامی سناریوهای بررسی شده است، در ایستگاه خلخال کمینه بارش در ماه سپتامبر (سناریوی ۲/۶) رخ می‌دهد و برای سایر سناریوها در ایستگاه خلخال و همچنین ایستگاه مغان، متعلق به ماه ژانویه است.

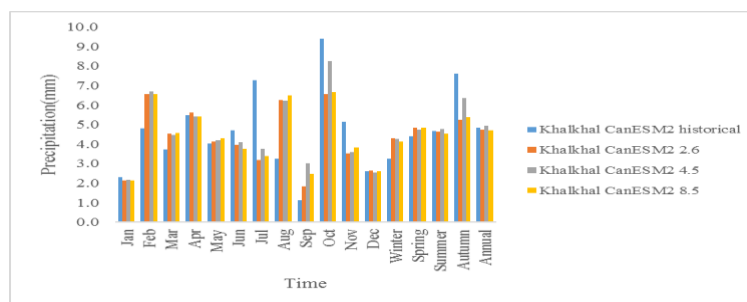
### بررسی تغییرات اقلیمی در دوره آبی

در تحقیق حاضر، برای بررسی تغییرپذیری متغیرهای اقلیمی در منطقه مطالعه شده، از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2 استفاده شد. برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی جو استفاده شده، پس از استخراج داده‌های بزرگ‌مقیاس برای سلول محاسباتی منطقه مطالعه شده، با استفاده از داده‌های اقلیمی مشاهداتی و داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP و روش آماری SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌ها و تولید سناریوهای تغییر اقلیم در دوره آبی استفاده می‌شود. با انجام آزمون و خطا و وارد کردن متغیرهای پیش‌بینی‌کننده به مدل، در نهایت بهترین متغیرها برای استفاده در فرایند ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای دمای میانگین و بارش در منطقه مطالعه شده به مدل SDSM معرفی شدند.

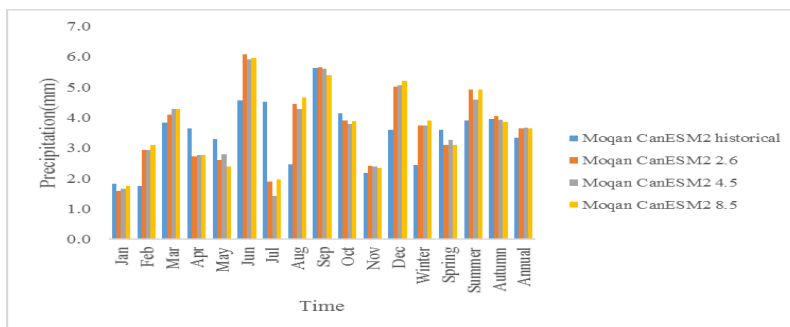
پس از تعیین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مناسب برای کوچک‌مقیاس‌سازی دما و بارش در منطقه مطالعه شده، به منظور تولید سناریوهای تغییر اقلیم، ابتدا باید مدل SDSM واسنجی و صحت‌سنجی شود. در این میان، حدود ۸۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و حدود ۲۰ درصد داده‌ها به منظور صحت‌سنجی مدل استفاده شدند. برای واسنجی مدل SDSM ابتدا از میان متغیرهای بزرگ‌مقیاس موجود،



شکل ۲. نتایج تولید سناریوهای اقلیمی برای میانگین بارش روزانه ایستگاه اردبیل



شکل ۳. نتایج تولید سناریوهای اقلیمی برای میانگین بارش روزانه ایستگاه خلخال



شکل ۴. نتایج تولید سناریوهای اقلیمی برای میانگین بارش روزانه ایستگاه مغان

گزارش پنجم هیئت بین الدول تغییرات اقلیمی تولید شده‌اند، شبیه‌سازی جریان سطحی و زیرزمینی منطقه در دوره آتی صورت گرفته است.

نخستین اقدام برای این فرایند، واسنجی مدل است که به این منظور داده‌های دما، بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل و همچنین رواناب ایستگاه‌های مشاهداتی به کار برده شد. بررسی آمار ایستگاه‌های یادشده نشان داد دوره ۱۹۸۸-۲۰۰۸ میلادی دربرگیرنده سال‌های متنوع وقوع خشکسالی و ترسالی است که شرایط را برای واسنجی مطلوب مدل بارش-رواناب فراهم می‌سازد. نتایج ارزیابی کارایی مدل برای انتخاب هشت پارامتر مدل و بهینه‌سازی مقادیر آنها استفاده شد. پس از واسنجی مدل، میزان همبستگی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل براساس آزمون همبستگی پیرسون و همچنین ضریب تعیین مشخص شد. و اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای جریان سطحی کل، جریان سطحی مستقیم، میزان رطوبت خاک، میزان ذخیره آب زیرزمینی و تبخیر-تعرق پتانسیل در مقیاس زمانی ماهانه و براساس سه سناریوی ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ برای زیرحوضه‌های چهارگانه استان اردبیل شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی پارامترهای یادشده در جدول ۳ به طور خلاصه ارائه شده است.

### شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب در دوره آتی

مدل بیلان برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب یک حوضه ارائه شده است. مدل یادشده براساس مجموعه‌ای از روابط است که مفاهیم پایه‌ای بیلان آب را برای منطقه اشباع و غیر اشباع توصیف می‌کند. گام زمانی استفاده شده در این مدل، ماهانه است. در این مدل، داده‌های ورودی به مدل شامل موارد زیر می‌شود:

- سری‌های زمانی ماهانه بارش، دما رطوبت نسبی هوا و تبخیر - تعرق پتانسیل؛
- سری‌های زمانی ماهانه رواناب به منظور واسنجی مدل؛
- تبخیر - تعرق پتانسیل که می‌تواند به جای رطوبت نسبی استفاده شود.

سری‌های زمانی شبیه‌سازی در مدل «بیلان» عبارت‌اند از: تبخیر - تعرق پتانسیل، تبخیر واقعی، نفوذ درون ناحیه تهویه، نفوذ آب به داخل سفره آب زیرزمینی، رواناب کل (رواناب مستقیم، جریان میانی، جریان پایه) و ذخیره آب حاصل از ذوب برف.

در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های اقلیمی پیش‌بینی‌شده برای دوره‌های زمانی آتی که در واقع با استفاده از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و براساس

جدول ۳. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی هیدرولوژیک برای دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ (میلیون مترمکعب در سال)

RCP8.5				RCP4.5				RCP2.6				پارامتر
دره	دره	قزل‌اوزن	ارس	بالها	دره	قزل‌اوزن	ارس	بالها	دره	قزل‌اوزن	ارس	حوضه
۰/۶۳	۶/۳۷	۱/۹۶	۱/۵۷	۰/۶۸	۶/۸۳	۲/۰۸	۱/۷۱	۰/۶۴	۶/۴۴	۱/۹۸	۱/۶	جریان سطحی
۰/۴۴	۳/۶۱	۰/۸۶	۱/۰۹	۰/۴۴	۳/۸۰	۰/۹۶	۱/۱۱	۰/۴۶	۴/۲۲	۱/۱۸	۱/۱۴	رطوبت خاک
۰/۳۶	۳/۴۳	۱	۰/۸۹	۰/۲۹	۲/۷۵	۰/۸	۰/۷۲	۰/۳۲	۳/۰۵	۰/۸۸	۰/۸	ذخیره آب زیرزمینی
۰/۳۱	۳/۱۸	۰/۹۸	۰/۷۸	۰/۳۱	۳/۲	۰/۹۹	۰/۷۹	۰/۳۱	۳/۱۹	۰/۹۹	۰/۷۸	تبخیر-تعرق پتانسیل

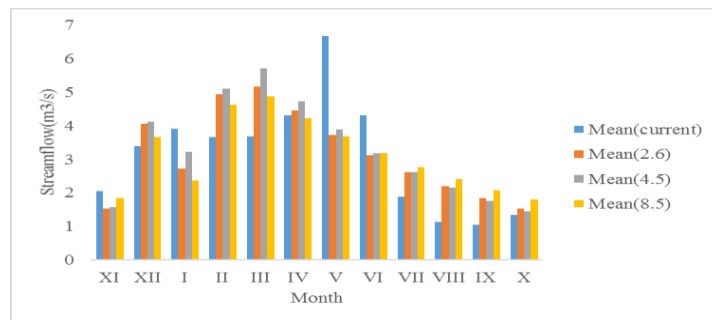


مدل بیلان بیان‌کننده تغییرات نامحسوس و غیرمعنادار جریان سطحی کل در دوره آبی در هر دو حوضه بررسی شده نسبت به دوره مرجع است، تغییر در پارامترهای اصلی اقلیمی نظیر بارش و دما روی اجزای جریان سطحی تأثیرات محسوسی دارد، به طوری که میزان جریان سطحی مستقیم که روی زمین جاری می‌شود در تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد که این امر ارتباط مستقیم با کاهش میزان بارش‌ها در دوره آبی و همچنین افزایش متوسط دمای منطقه دارد. در مورد ذخیره آب زیرزمینی در منطقه نیز با توجه به کاهش محسوس بارش و همچنین کاهش رطوبت در دسترس خاک و افزایش دما که به افزایش میزان تبخیر از سطح خاک منجر می‌شود، منطقه در دوره آبی بررسی شده و تحت تمامی سناریوهای مورد انتشار روندی کاهشی دارد.

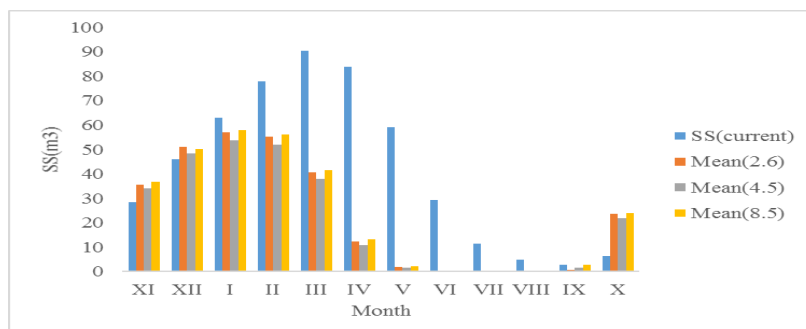
رطوبت در دسترس گیاهان (SS) نیز در تمامی سناریوهای بررسی شده نسبت به میزان متوسط دوره پایه از روند کاهشی تبعیت می‌کند (۳۹/۲ مترمکعب در هر ماه). مقدار رطوبت در دسترس گیاهان در ماه‌های بهار و تابستان به حد صفر می‌رسد که این امر بر میزان تولید محصولات کشاورزی که اساساً بر کشت دیم استوارند، مؤثر است.

پس از شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره آبی و تحت سناریوهای خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای، با استفاده از مدل بیلان اقدام به شبیه‌سازی وضعیت هیدرولوژیک استان اردبیل در سطح حوضه‌های درجه ۲ دربرگیرنده استان اردبیل شد. به این منظور برای بخش‌های شمالی و میانی استان از داده‌های اقلیمی ایستگاه‌های اردبیل و مغان استفاده شد، همچنین برای قسمت‌های جنوبی استان نیز شبیه‌سازی وضعیت هیدرولوژیک با استفاده از متغیرهای پیش‌بینی‌شده متعلق به ایستگاه خلخال صورت گرفت. همان‌گونه که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است، تبخیر-تعرق پتانسیل در منطقه مطالعه شده براساس تمامی سناریوهای بررسی شده نسبت به میزان آن در دوره پایه افزایش یافته است که این امر روی گیاهان زراعی و مرتعی منطقه تأثیر می‌گذارد، همچنین ملاحظه می‌شود که میزان افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل در مناطق جنوبی منطقه مطالعه شده نسبت به بخش‌های شمالی و میانی بیشتر است که علت این امر با توجه به افزایش دما طی دوره‌های آبی و تحت سناریوهای گوناگون اقلیمی استفاده شده قابل توجیه است.

در مورد آثار تغییرات اقلیمی روی جریان سطحی منطقه باید گفت که اگرچه نتایج برگرفته از شبیه‌سازی‌ها توسط



شکل ۵. مقادیر جریان سطحی در دوره پایه و آبی تحت سناریوهای RCPs منطقه مطالعه شده (ماه اول I: نوامبر)



شکل ۶. مقادیر ذخیره رطوبت خاک در دوره پایه و آبی تحت سناریوهای RCPs منطقه مطالعه شده (ماه اول I: نوامبر)

## نتیجه‌گیری

محسوس بارش و همچنین کاهش رطوبت در دسترس خاک و افزایش دما که به افزایش میزان تبخیر از سطح خاک منجر می‌شود، منطقه در دوره آتی بررسی شده و تحت تمامی سناریوهای مورد انتشار، روندی کاهش را از خود نشان می‌دهد. همچنین، باید به مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب توجه زیادی شود و تدابیر لازم به منظور حفظ آبخوان‌ها و تغذیه آب‌های زیرزمینی از طریق شیوه‌های احیا و تعادل بخشی آبخوان‌ها اجرا شود.

## تشکر و قدردانی

پروژه تحقیقاتی حاضر با حمایت مالی کمیته تحقیقات شرکت آب منطقه‌ای اردبیل تحت قرارداد شماره ۳۸۵۰۲/۹۰۰ مورخ ۹۴/۹/۳ به انجام رسیده است که در اینجا از کمیته مربوطه تشکر می‌شود.

## منابع

- [1]. Arnell N, Gosling S. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*. 2017: 1-15.
- [2]. Cleridou N, Benas N, Matsoukas C, Croke B, Vardavas I. Water resources of Cyprus under changing climatic conditions.: Modelling approach, validation and limitations. *Environmental Modelling & Software*. 2014(60): 202-218.
- [3]. Cousino LK, Becker RH, Zmijewski KA. Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2015(4) Part B: 762-775.
- [4]. Fowler HJ, Ekstrom M. Multi-model ensemble estimates of climate change impacts on UK seasonal precipitation extremes. *International Journal of Climatology*. 2009(29): 385-416.
- [5]. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2007-Synthesis Report of the Fourth Assessment Report*. 2013.
- [6]. Lespinas F, Ludwig W, Heussner S. Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*. 2014(511): 403-422.
- [7]. Schwank J, Escobar R, Girón GH, Morán-Tejeda E. Modeling of the Mendoza river watershed as a tool to study climate change impacts on water availability. *Environmental Science & Policy*. 2014(43): 91-97.

استان اردبیل با وجود اینکه ۱/۹ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد، ۵/۴ میلیون تن از محصولات کشاورزی کشور در این استان تولید می‌شود که ۴ درصد از کل تولیدات کشاورزی کشور را در بر می‌گیرد. حدود ۴۴ درصد از اراضی استان اردبیل در اختیار بخش کشاورزی است و توسعه پروژه‌های آب و خاک در استان اهمیت زیادی دارد. از این رو، بررسی آثار تغییر اقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آبی منطقه بسیار ضروری به نظر می‌رسد. در تحقیق حاضر روش‌شناسی ارائه شده که در آن انتخاب ایستگاه‌های واجد شرایط در منطقه مطالعه شده اقدام به بررسی کیفیت داده‌ها با استفاده از آزمون‌هایی که در این زمینه وجود دارند، شد. سپس، با استفاده از آزمون‌های تحلیل روند، وجود داشتن یا نداشتن روند و همچنین تعیین میزان آن در داده‌های اقلیمی منطقه بررسی شد. با استفاده از خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو، داده‌های ایستگاه‌های مشاهداتی و روش ریزمقیاس‌نمایی مناسب، پارامترهای اقلیمی براساس سناریوهای مختلف RCPs شبیه‌سازی شد. همچنین، با استفاده از داده‌های اقلیمی دوره حاضر و آتی نظیر بارش، مؤلفه‌های بیلان آبی بررسی شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، تبخیر-تعرق پتانسیل در منطقه مطالعه شده براساس تمامی سناریوهای بررسی شده نسبت به میزان آن در دوره پایه افزایش یافته که شدیدترین آن ۳/۲ میلیون مترمکعب در سال براساس سناریوی RCP4.5 است که این امر روی گیاهان زراعی منطقه تأثیر می‌گذارد. در مورد آثار تغییرات اقلیمی بر جریان سطحی منطقه باید گفت که نتایج برگرفته از شبیه‌سازی‌ها توسط مدل بیلان بیان‌کننده تغییرات نامحسوس جریان سطحی کل در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۴۴) در هر دو حوضه بررسی شده نسبت به دوره مرجع است، به طوری که برای دوره آتی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی هیدرولوژیک بیان‌کننده تغییرات از ۰/۶۳ تا ۶/۳۷ میلیون مترمکعب در سال در شدیدترین سناریوی تغییرات اقلیمی RCP8.5 است. با این حال، تغییر در پارامترهای اصلی اقلیمی نظیر بارش و دما روی اجزای جریان سطحی تأثیرات محسوسی دارد، به طوری که میزان جریان سطحی مستقیمی که بر زمین جاری می‌شود ارتباط زیادی با کاهش میزان بارش‌ها در دوره آتی و نیز افزایش متوسط دمای منطقه دارد. در مورد ذخیره آب زیرزمینی در منطقه نیز با توجه به کاهش

- [8]. Singh VP, & Goyal MK. Analysis and trends of precipitation lapse rate and extreme indices over north Sikkim eastern Himalayas under CMIP5ESM-2M RCPs experiments. *Atmospheric Research*.2016(167): 34-60.
- [9]. Su B, Huang J, Gemmer M, Jian D, Tao H, Jiang T, Zhao C. Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research*.2016 (178-179): 138-149.
- [10]. Taghavi F. Linkage between Climate Change and Extreme Events in Iran, *Journal of the Earth & Space Physics*.2010(36): 33-43.
- [11]. Wang Y, Liao W, Ding Y, Wang X, Jiang Y, Song X, Lei X. Water resource spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quaternary International*.2015(380-381): 187-196.
- [12]. Zouboulis A, Tolkou A. Effect of Climate Change in Wastewater Treatment Plants: Reviewing the Problems and Solution. Chapter in: *Managing Water Resources under Climate Uncertainty, Examples from Asia, Europe, Latin America, and Australia*, edited by Shrestha S, Anal AK, Salam PA, van der Valk M, 2015(197-220), Springer.