

## بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب و بیلان آب حوضه آبریز سد لتیان با استفاده از مدل SWAT

محمدنبی جلالی<sup>۱</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۲\*</sup>، حسین بابازاده<sup>۳</sup>

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۱۴؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۹/۲۸)

### چکیده

تغییرات اقلیمی می‌تواند تهدید بزرگی برای تنوع زیستی و یکپارچگی اکوسیستم‌ها باشد. از این‌رو، پیش‌بینی رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز برای حفاظت و بازسازی اکوسیستم‌ها ضروری است. حوضه آبخیز سد لتیان به‌عنوان یکی از حوضه‌های کوهستانی کشور با وسعت تقریبی ۷۱۰ کیلومتر مربع در شمال شرق تهران و در غرب شهرستان دماوند واقع شده است. در پژوهش حاضر، برای ارزیابی رواناب و بیلان آبی بر اثر تغییرات اقلیمی، از مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی SWAT براساس داده‌های جمع‌آوری شده طی سال‌های ۱۹۸۸-۲۰۱۴ استفاده شده است. با توجه به دقت زیاد مدل‌های سری CMIP5، خروجی‌های این مدل‌ها تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای آینده نزدیک با استفاده از مدل اقلیمی LARS-WG به مدل وارد شد. نتایج شبیه‌سازی اقلیمی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ میلادی نشان داد میانگین دما با در نظر گرفتن سناریوی خوش‌بینانه RCP2.6، به‌طور متوسط  $0.75^{\circ}\text{C}$  و در سناریوی بدبینانه RCP8.5،  $1.45^{\circ}\text{C}$  افزایش خواهد یافت. همچنین، نتایج کاهش ۲ درصدی بارش در سناریوی RCP8.5 و ۵ درصدی بارش در سناریوی RCP2.6 را نشان داد. نتایج رواناب نیز بیانگر بیشترین تغییرات رواناب طی دوره آینده، در ماه می با  $2/4$  مترمکعب بر ثانیه کاهش و در ماه آوریل با  $1/49$  مترمکعب بر ثانیه افزایش در سناریوی خوش‌بینانه است. بیشترین کاهش رواناب نیز در سناریوی بدبینانه RCP8.5 در ماه‌های می و ژوئن پیش‌بینی شده که می‌تواند آثار بسیار بدی روی مقادیر آب ذخیره‌شده در مخزن سد تا شروع بارندگی‌های مجدد داشته باشد. میزان تبخیر و تعرق واقعی متوسط سالانه در سناریوی خوش‌بینانه با ۳ میلی‌متر افزایش و در سناریوی بدبینانه با ۸ میلی‌متر افزایش، تأثیر منفی روی منابع آب قابل دسترس در حوضه آبریز خواهد گذاشت. نتایج تحقیق حاضر بر ضرورت اعمال سیاست‌های مناسب به‌منظور سازگاری تغییرات اقلیمی مبتنی بر اکوسیستم‌ها در مدیریت حوضه آبریز لتیان تأکید می‌کند.

کلیدواژگان: بیلان آب، سد لتیان، LARS-WG, RCP, SUFI2.

## مقدمه

تغییرات اقلیمی که بیشتر ناشی از فعالیت‌های انسانی در نتیجه مصرف سوخت‌های فسیلی و مداخله‌های ناروا در جنگل‌ها و منابع طبیعی است، می‌تواند علاوه بر تأثیر منفی بر عملکرد حوضه آبخیز از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی؛ آثار مخرب شدیدی بر ساختار اکوسیستم‌های طبیعی داشته باشد. به بیانی دیگر، یکی از محرک‌های مهم از دست رفتن تنوع زیستی و تهدیدی جدی برای سلامت انسان طی دهه‌های آتی، تغییرات اقلیمی است [۱].

طبق آخرین گزارش پنجم مجمع بین‌الدول تغییر اقلیم، دمای سطح زمین در قرن ۲۱ احتمالاً بیش از  $1/5^{\circ}\text{C}$  نسبت به دوره ۱۸۵۰-۲۰۰۵ افزایش خواهد یافت [۲]. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) مجموعه‌ای از سناریوهای RCP<sup>۲</sup> را برای طرح آینده آب‌وهوایی بر اساس پروژه همسان‌سازی مدل CMIP5<sup>۳</sup> تعریف کرده است. مدل‌های گزارش پنجم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم بیشتر به جنبه‌های اقتصادی-اجتماعی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر توسعه پایدار اکوسیستم‌ها تمرکز دارند. از این‌رو، در کشور ایران اقلیم شکننده سبب شده تا پیش‌بینی درازمدت تغییرات اقلیمی اهمیت زیادی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب داشته باشد [۳].

آگاهی دقیق از رفتار هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز می‌تواند به شبیه‌سازی بهتر این محیط به‌منظور کنترل مؤلفه‌های اصلی بیلان آب کمک زیادی کند. با توجه به اینکه فرایندهای هیدرولوژیک در حوضه با تغییرات آب و هوا تغییر می‌کنند [۴]، نشان دادن تعاملات بین فرایندهای هیدرولوژیک مختلف از طریق مدل‌سازی هیدرولوژیک رابطه بین آب، خاک، کاربری اراضی و آب‌وهوا بسیار کاربردی است [۵]. مدل‌سازی هیدرولوژیک ابزار بسیار مفیدی برای مطالعه پاسخ‌های هیدرولوژیک به تغییرات اقلیمی است. از این‌رو، مدل‌های مختلف هیدرولوژیک مفهوم شاخصی همچون مدل توزیعی سیستم هیدرولوژیک اروپا (SHE)<sup>۴</sup> [۶] و مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند مدل

هیدرولوژیک مبتنی بر توپوگرافی (TOPMODEL)<sup>۵</sup> [۷]؛ شبیه‌سازی رواناب مبتنی بر استفاده از زمین (SLURP)<sup>۶</sup> [۸] و ابزار ارزیابی خاک و آب (SWAT)<sup>۷</sup> [۹] طی سال‌ها معرفی و توسعه داده شده‌اند. SWAT نوعی مدل در مقیاس حوضه‌ای مبتنی بر محاسبات تجربی و نیمه‌توزیعی است که می‌تواند شبیه‌سازی فرایندهای حوضه، فعالیت‌های مدیریت بر آب و خاک و کمی‌سازی خدمات اکوسیستمی هیدرولوژیک مختلف را انجام دهد [۱۰].

نرسیما و همکاران (۲۰۱۳) در هند تحقیقاتی در مورد تغییرات اقلیمی آینده بر منابع آب حوضه رودخانه‌ای با استفاده از SWAT انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد در اواسط قرن (۲۰۵۰-۲۰۷۰) میانگین جریان سالانه می‌تواند ۴/۱۶ درصد افزایش یابد و تا پایان قرن (۲۰۷۱-۲۰۹۸) به ۵/۹۳ درصد افزایش نیز برسد [۱۱]. رانتا و همکاران (۲۰۱۸) طی پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر تعادل هیدرولوژیک حوضه کالینگی به‌وسیله مدل‌های CMIP5 براساس سناریوهای RCP4.5، RCP8.5 با استفاده از مدل SWAT را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تا پایان قرن حاضر دما برای سناریوی بدبینانه تا  $4^{\circ}\text{C}$  افزایش خواهد یافت [۱۲]. مهریزی و همکاران (۲۰۱۸) طی تحقیقی اثر تغییر اقلیم بر جریان آینده حوضه آبریز رودخانه گاماسیاب را به‌وسیله خروجی‌های چهار مدل سری CMIP5 و دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برای آینده نزدیک و آینده دور ارزیابی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد مقدار بارندگی سالانه حوضه در پنج ایستگاه بررسی شده با توجه به سناریوهای مد نظر و دوره‌های زمانی مختلف بین ۳۱/۶- تا ۵۲/۸ درصد تغییر خواهد کرد. همچنین، میانگین کمترین و بیشترین دمای ماهانه در ایستگاه کرمانشاه به ترتیب حداکثر ۲/۷۵ و ۲/۱۵ و در ایستگاه همدان به ترتیب حداکثر تا ۳/۴۳ و ۴/۲۶ سانتی‌گراد افزایش می‌یابد [۱۳]. صیاحی و همکاران (۲۰۱۶) اثر تغییر اقلیم را روی رواناب ماهانه حوضه دز به‌وسیله مدل‌های CMIP5 تحت سناریوهای RCP2.6 بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌داد دما تا  $2^{\circ}\text{C}$  طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ افزایش خواهد یافت [۱۴].

5. Topography based Hydrological Model  
6. Semi distributed Land Use based Runoffproce  
7. Soil and Water Assessment Tool

1. Intergovernmental Panel on Climate Change  
2. Representative Concentration Pathway  
3. Coupled Model Intercomparisonproject 5  
4. System Hydrolodique Europeen

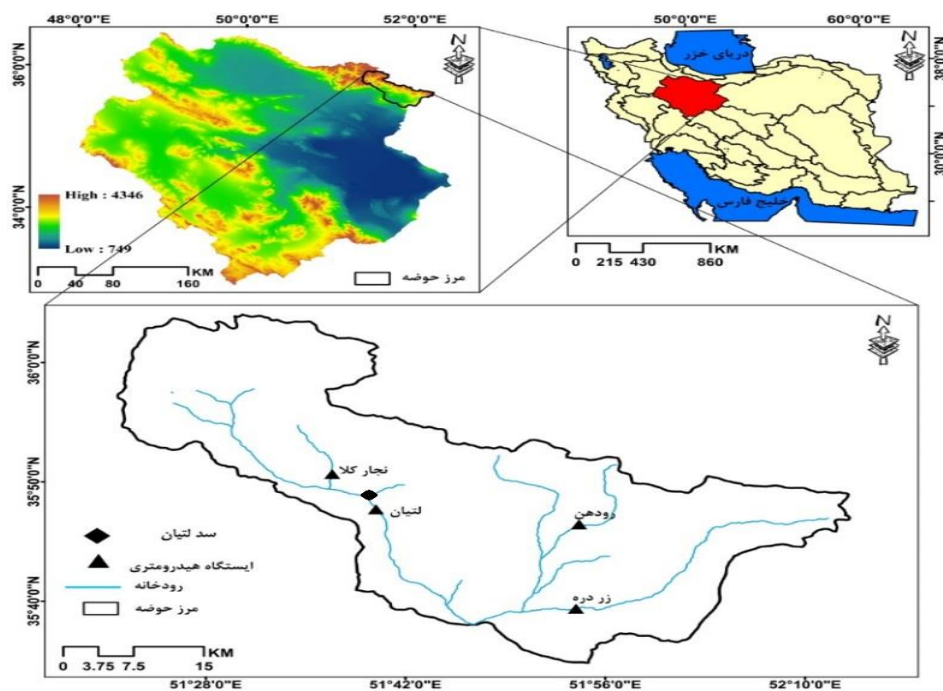
اصلی آن، بررسی اثر تغییر اقلیم روی رواناب و بیلان آبی حوضه آبریز بالادست سد لتیان است.

### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد لتیان به مختصات جغرافیایی  $51^{\circ}22'$  تا  $51^{\circ}66'$  طول شرقی و  $35^{\circ}45'$  تا  $36^{\circ}55'$  عرض شمالی به‌عنوان یکی از حوضه‌های کوهستانی کشور در فاصله ۳۰ کیلومتری شمال شرق استان تهران قرار دارد. این حوضه از نظر تقسیمات کشوری در محدوده شهرستان شمیرانات واقع شده است. به‌طور تقریبی ۲۰ درصد این حوضه در ارتفاعات بیش از ۳ هزار متر و ۶۰ درصد آن در ارتفاعات ۲ تا ۳ هزار متر قرار دارد. منبع اصلی تأمین‌کننده آب سد لتیان، رودخانه جاجرود است. این رودخانه با ۴۰ کیلومتر طول و ۷۱۰ کیلومترمربع مساحت حوضه آبریز، شیب بستری حدود ۴ درصد دارد که جنس آن بیشتر سنگریزه است. جریان ورودی این رودخانه به سد لتیان در هر سال به‌طور متوسط حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب است. شکل ۱ موقعیت حوضه مطالعه‌شده را نشان می‌دهد.

ایران با متوسط نزولات جوی ۲۵۰ میلی‌متر در سال، از کشورهای خشک جهان و دارای منابع آب محدود به‌شمار می‌رود. عواملی همچون رشد جمعیت، نیاز به غذای بیشتر، توسعه صنعتی و حفاظت اکوسیستم‌ها روز‌به‌روز تقاضای آب را بیشتر می‌کند. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۱۴۰۰ سرانه منابع آب تجدیدشونده سالانه به حدود ۸۰۰ مترمکعب کاهش یابد که پایین‌تر از مرز کم‌آبی، یعنی ۱۰۰۰ مترمکعب است [۱۵]. اکوسیستم‌های کشاورزی به‌عنوان مصرف‌کننده عمده آب، یکی از بخش‌های آسیب‌پذیر بر اثر تغییرات اقلیمی در ایران خواهند بود. به‌رغم این واقعیت که تأثیرات تغییرات اقلیم همراه با عدم قطعیت است، اما یک توافق کلی وجود دارد که بخش کشاورزی ایران به‌طور درخور توجهی تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار خواهد گرفت. سد لتیان علاوه بر تأمین آب آشامیدنی شهر تهران، برای آبیاری حدود ۳۰ هزار هکتار زمین کشاورزی نیز استفاده می‌شود. برای اطمینان از پایداری و سودمندی کشاورزی این حوضه مهم، مطالعه تغییرات اقلیمی احتمالی ضروری است. با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر روی شبیه‌سازی پاسخ‌های مختلف هیدرولوژیکی به تغییرات آب‌وهوایی تمرکز دارد و هدف



شکل ۱. موقعیت محدوده مطالعاتی و شبکه آبراه

است. همچنین، در پژوهش حاضر برای تخمین حجم رواناب سطحی حوضه از روش SCS استفاده شده است. بیان آب‌های سطحی نیز توسط مدل SWAT از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۰].

$$Sw_i = Sw_0 + R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw} \quad (1)$$

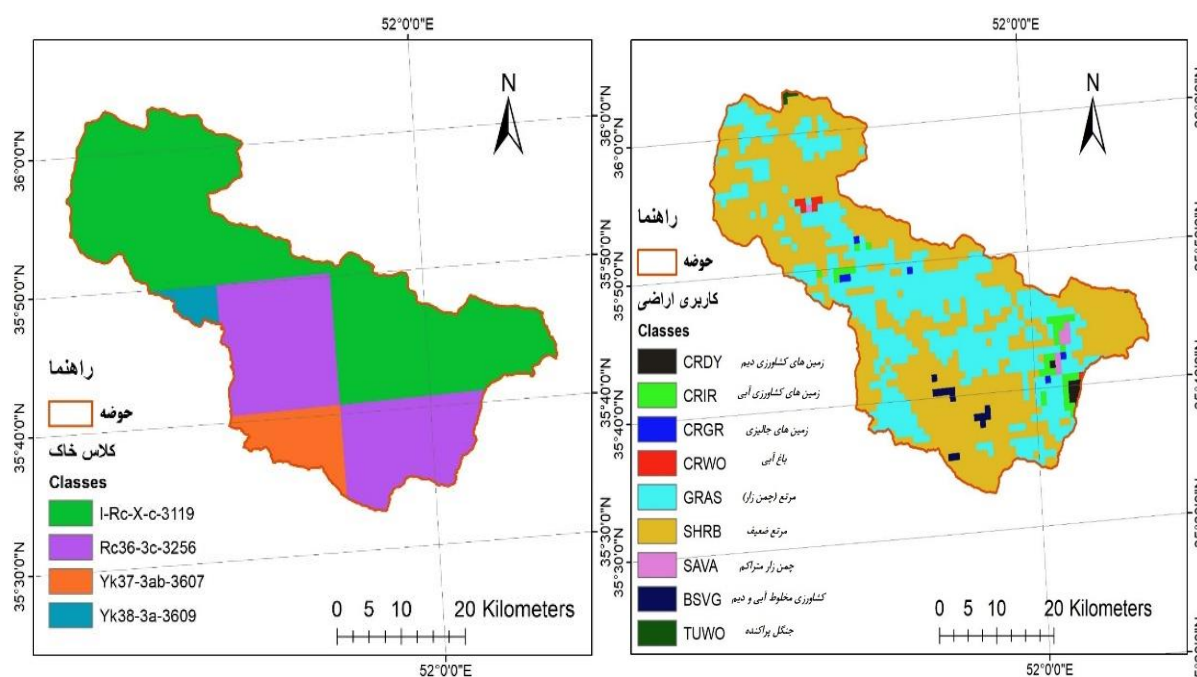
که در آن،  $Sw_i$ : میزان آب باقی‌مانده در خاک،  $Sw_0$ : میزان اولیه رطوبت خاک،  $R_{day}$ : بارش روزانه برای روز  $i$ ،  $Q_{surf}$ : مجموع رواناب روزانه برای روز  $i$ ،  $W_{seep}$ : نفوذ آب از پروفیل زیرین خاک،  $E_a$ : تبخیر تعرق حاصل از روش پنمن-مانتیت و  $Q_{gw}$ : جریان آب بازگشتی برای روز  $i$  است.

### مدل هیدرولوژیکی SWAT

مدل SWAT به کمک نقشه رقومی حوضه، حوضه آبریز را به زیرحوضه‌ها، سپس هر زیرحوضه را با توجه به لایه خاک، کاربری اراضی، شیب و با در نظر گرفتن حد آستانه مشخص کرده به واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم می‌کند. در پژوهش حاضر، از نقشه DEM با دقت ۳۰ متر به همراه نقشه کاربری اراضی برای سال ۲۰۱۴ (GLCC) و نقشه خاک FAO با ابعاد ۱۰ کیلومتری برای ساخت مدل هیدرولوژیکی SWAT استفاده شده است. در شکل ۲ اطلاعات نقشه‌های خاک و کاربری اراضی نشان داده شده

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شده

کد ایستگاه	ارتفاع	نام ایستگاه	نام رودخانه	مساحت (km <sup>2</sup> )	دبی متوسط سالانه برای سال آبی ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۳
۴۱۱۱۹	۱۵۳۴	لتیان	جاجرود	۷۱۰	۵۵/۲۳
۴۱۱۵۹	۱۶۷۸	نچارکلا	کندرود - گلندوک	۵۹	۸/۰۶
۴۱۸۷۰	۱۴۱۵	زر دره	دماوند	۴۰۴	۱۵/۶
۴۱۹۲۹	۱۸۴۴	رودهن	آه	۵۷	۳/۹۶



شکل ۲. نقشه‌های خاک و کاربری اراضی

### مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی

در مطالعات تغییر اقلیم از معتبرترین ابزارهای تولید سناریوی اقلیمی، مدل‌های سه‌بعدی جفت‌شده گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس هستند. در پژوهش حاضر، برای پیش‌بینی دو پارامتر دما و بارش از مدل‌های گردش عمومی جو که از جدیدترین گزارش IPCC تحت عنوان «گزارش پنجم CMIP5» استخراج شده، استفاده شده است. برای دریافت خروجی این مدل‌ها نیاز به انتخاب سناریوهای انتشار است که گزارش پنجم تحت ۴ سناریوی انتشار ارائه شده که در میان آنها، RCP2.6 سناریوی خوش‌بینانه و RCP 8.5 سناریوی بدبینانه هستند. مطالعات نشان می‌دهند بهترین طول دوره آماری برای محاسبه سیگنال‌های تغییر اقلیم ۳۰ سال است [۱۶] و در تحقیق حاضر نیز دوره

سی‌ساله آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مشخصات مدل‌های استفاده‌شده در پژوهش حاضر آورده شده (IPCC.Ch). شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی توسط مدل‌های GCM در دوره‌های گذشته با محاسبه میزان تغییرات آنها در دوره‌های آینده نسبت به گذشته انجام شده است. در این روش برای دما از اختلاف بین دو متغیر و برای بارش از نسبت بین آنها استفاده می‌شود. مقادیر به‌دست‌آمده همان سناریوهای تغییر اقلیم هستند. در نهایت، برای به دست آوردن سری زمانی مد نظر سناریوی اقلیمی برای یک پارامتر، مقادیر به‌دست‌آمده بر داده‌های مشاهداتی اعمال می‌شوند. به‌منظور برآورد سری‌های زمانی آینده پس از برآورد سناریوها از مدل اقلیمی LARS-WG استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات عمومی مدل‌های منتخب CMIP5 در تحقیق حاضر

مرجع	سناریوهای انتشار	قدرت تفکیک	نام مدل
Watanabe et al, ۲۰۱۰	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۲/۸° * ۲/۸°	MIROC-ESM
Schmidt et al, ۲۰۱۴	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۲° * ۲/۵°	GISS-E۲-R
Marsh et al, ۲۰۱۳	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۲° * ۲/۵°	CESM۱ (WACCM)
Collier et al, ۲۰۱۱	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۱/۹° * ۱/۹°	CSIRO-Mk ۳,۶,۰
Watanabe et al, ۲۰۱۰	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۲/۸° * ۲/۸°	MIROC-ESM-CHEM
Giorgetta et al, ۲۰۱۳	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	۱/۹° * ۱/۹°	MPI-ESM-LR
Giorgetta et al, ۲۰۱۳	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	۱/۹° * ۱/۹°	MPI-ESM-MR
Schmidt et al, ۲۰۱۴	RCP2.6 - RCP4.5 RCP6 - RCP8.5	۲° * ۲/۵°	GISS-E۲-H
Hazeleger et al, ۲۰۱۰	RCP2.6 - RCP4.5 RCP8.5	۱/۱° * ۱/۱°	EC-EARTH

### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز و معرفی آنها به مدل SWAT باید مدل واسنجی و اعتبارسنجی شود. مرحله واسنجی مدل SWAT اهمیت زیادی دارد و فرایند بسیار زمان‌بر و طولانی است. به دلیل زیاد بودن پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی هم‌زمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی در این مدل، از نرم‌افزار SWAT-CUP برای آنالیز حساسیت و واسنجی آن استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر است با روش‌های SUFI2، PSO، GLUE، MCMC و PARASOL عملیات واسنجی را

انجام دهد. در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی پارامترها و آنالیز عدم قطعیت مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI2 انجام شده است. روش کار الگوریتم SUFI2 به این صورت است که ابتدا با تعریف یک تابع هدف که می‌تواند یک متغیره و یا چندمتغیره باشد، مرحله واسنجی شروع می‌شود. سپس، در مرحله بعدی برای هر پارامتر یک محدوده مجاز، که در SWAT-CUP در بخش Absolute Values این محدوده مجاز مشخص شده است، اختصاص داده می‌شود. با در نظر گرفتن این شرط که متوسط بین باندهای بالا و پایین این محدوده مقدار کوچکی

اول به خوبی توسط آن پاسخ داده شده است. پس از انجام مرحله تحلیل حساسیت مدل با استفاده از ۴ ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی شد. رویکرد پژوهش حاضر در مرحله واسنجی، تقسیم‌بندی مدل کلی به حوضه‌های بالادست ایستگاه‌هایی بوده است که مشاهدات برای آنها در دسترس بود. این مهم به این معناست که به جای هم‌بندسازی کل حوضه و تعیین محدوده پارامتر بهینه برای کل آن، ابتدا حوضه‌های بالادست محدود به ایستگاه‌های نزدیک‌تر به مرز حوضه مدل‌سازی شده است. سپس، به کمک صحت‌سنجی نتایج سری زمانی دبی خروجی از آن به‌عنوان جریان ورودی به حوضه‌های پایین‌دست معرفی شده است. پس از اجرای این فرایند و واسنجی چهار حوضه که خروجی هر یک متناظر با ایستگاه‌های یادشده است، صحت‌سنجی هر یک از آنها مطابق شکل‌های ۳ تا ۶ صورت گرفته است. مهم‌ترین مزیت این کار، در نظر گرفتن حداکثر محدوده زمانی ممکن برای صحت‌سنجی و واسنجی بوده که با توجه به هدف پژوهش حاضر که بررسی تغییرات اقلیم است، معقول به نظر می‌آید.

پس از تکمیل این فرایند، برای آخرین بار مدل کلی حوضه پیکره‌بندی شده و نتایج آن بررسی شده است. در توضیح این رویکرد مهم‌ترین نکته این است که دقت تخمین‌ها در کل حوضه افزایش یافته است و بسیاری از پارامترها که ممکن بود به دلیل اثر هم‌پایانی در فرایند واسنجی شرکت کنند، تثبیت شده و از تغییر بی‌دلیل آن در فرایند واسنجی جلوگیری شده است. بنابراین، می‌توان این مهم را در نظر داشت که بهترین رویه برای بررسی پدیده‌های مشابه با ماهیت اثر درازمدت نگاه جزء‌به‌جزء به مؤلفه‌های سیستم است.

فرایند صحت‌سنجی در پژوهش حاضر نیز یکی دیگر از انگیزه‌های موجود در بهره‌گیری از این رویکرد بوده است، چرا که با یک نگاه به سری زمانی دبی مشاهداتی حوضه‌ها متوجه می‌شویم که مشاهدات برای این ایستگاه‌ها هم‌پوشانی حاشیه‌ای دارند که محققان را دچار سردرگمی در انتخاب بازه زمانی مناسب، برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل خواهند کرد. بنابراین، فرضیه موجود برای استفاده از این سری زمانی، واسنجی و صحت‌سنجی مجزای آنهاست. به بیان بهتر، در رویکرد جامع پیش‌فرض این دسته از

باشد، تغییر پیدا می‌کند [۱۷]. برای ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی از شاخص‌های ضریب تبیین، ضریب نش‌ساتکلیف، P-factor و R-factor استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر شبیه‌سازی رواناب با استفاده از ایستگاه هیدرومتری لتیان از تاریخ ۱۹۸۸/۱/۱ تا ۲۰۱۳/۱۲/۳۱ صورت گرفته است، که از روز ۱۹۸۸/۱/۱ تا ۲۰۰۹/۱۲/۳۱ برای مرحله واسنجی و برای مرحله صحت‌سنجی نیز از ۲۰۱۰/۱/۱ تا ۲۰۱۳/۱۲/۳۱ استفاده شد.

## نتایج و بحث

### شبیه‌سازی رواناب، آنالیز حساسیت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پیکره‌بندی مدل به منظور استخراج آبراهه و زیرحوضه‌های آبریز با استفاده از نقشه DEM انجام گرفت. با در نظر گرفتن مقادیر حد آستانه حوضه مطالعه‌شده به ۲۲ زیرحوضه و ۱۱۳ HRU تفکیک شد. ابتدا با انجام تحلیل حساسیت پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر دبی خروجی حوضه داشتند، مشخص شدند. با توجه به شکل ۴ ملاحظه می‌شود که جریان پایه در سری زمانی جریان ورودی به سد لتیان به‌طور متوسط بین ۳ تا ۷ مترمکعب در ماه است. انتظار می‌رود با در نظر گرفتن نوسان بارش در دوره یادشده، منشأ این جریان منابع آب زیرزمینی باشد. بنابراین، پیش‌بینی اولیه پژوهش حاضر، حساسیت نسبتاً زیاد رواناب خروجی به این پارامتر بوده است، که طبق جدول ۳ همان‌طور که پیش‌بینی می‌شد پارامترهای Gw\_Delay، Gw\_Revap و Alpha\_Bf جزء ۷ پارامتر حساس قرار گرفتند. دلیل انتخاب پارامتر PLAPS.sub نیز به‌عنوان یکی از پارامترهای حساس، وجود برف در حوضه و تغییرات ارتفاعی شدید در حوضه مطالعاتی بوده است.

با بررسی اجمالی وضعیت رطوبت خاک به این نتیجه رسیدیم که میزان آب در دسترس موجود در خاک و تبخیر سطحی از آن به‌درستی توسط بسته واسنجی SWAT-CUP انتخاب شده است. پارامتر CN2 نیز که بیانگر شماره منحنی در شرایط متوسط رطوبتی حوضه است، بیشترین تأثیر را بر رواناب از خود نشان داد. همان‌طور که از نتایج آنالیز حساسیت نیز برآمده است، این پارامتر تا حد معقولی توانسته برانگیزی لازم در نتایج شبیه‌سازی شده ایجاد کند، بنابراین نگرانی موجود در نگاه

استنباط کرد که مدل همبستگی مناسبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد و عملکرد آن در شناسایی زمان رخ دادن نقاط پیک در مرحله اعتبارسنجی، تقریباً خوب بوده است. مقایسه عملکرد مدل در دو حالت پیش از واسنجی و پس از آن، نشان دهنده کاهش واریانس تخمین مقادیر دبی سیلابی تا حدود ۵۰ درصد مقدار اولیه بوده است. با در نظر گرفتن اینکه شبیه‌سازی‌ها همیشه درصدی از عدم قطعیت ناشی از عدم انطباق کامل مقادیر برآوردی و مقادیر مشاهداتی را دارند، می‌توان گفت که شبیه‌سازی در این حوضه آبریز با دقت خوبی انجام شده است.

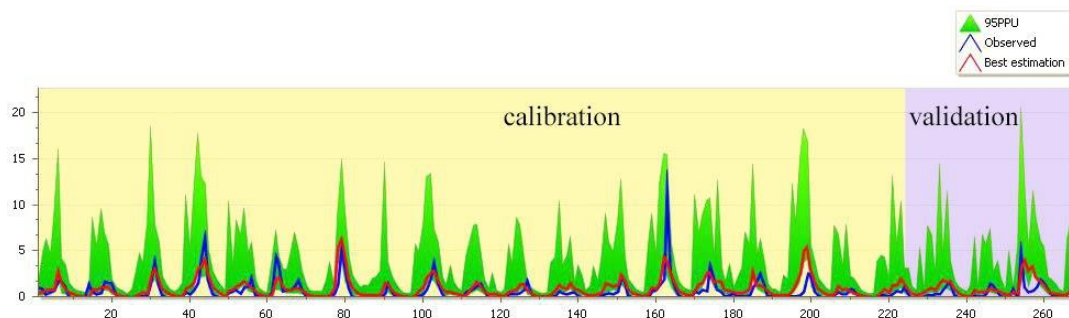
مطالعات با در نظر گرفتن بازه زمانی مشترک برای سری زمانی داده‌های موجود و محقق ناچار به انتخاب محدوده زمانی کوتاه و به طبع دوره صحت‌سنجی کوتاه به دنبال آن خواهد بود. نتایج برآورد دقت و خطای شبیه‌سازی نشان می‌دهد مدل توانسته است برای چهار ایستگاه آب‌سنجی مقادیر ضریب تبیین بیش از ۰/۶ برای دوره واسنجی و بیش از ۰/۵۵ برای دوره اعتبارسنجی را نشان دهد که بهترین نتیجه مربوط به ایستگاه لتیان با ضریب تبیین بیش از ۰/۶۷ در واسنجی و ۰/۶۵ برای دوره اعتبارسنجی بود. با مقایسه گرافیکی سری زمانی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی، می‌توان

جدول ۳. آنالیز حساسیت پارامترهای مدل

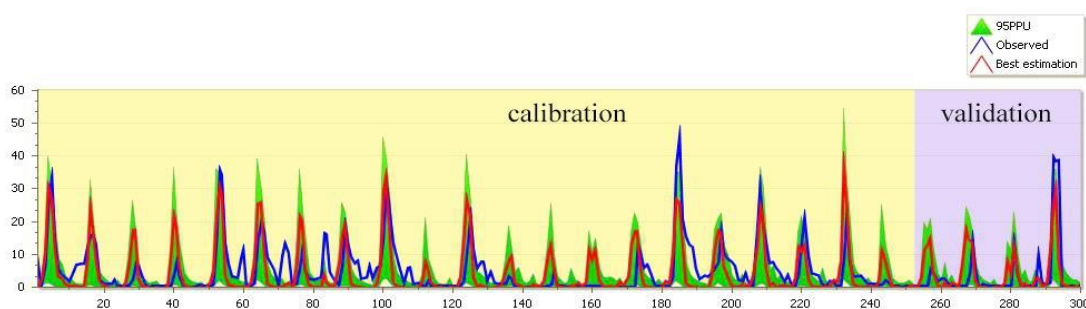
پارامتر	توضیح	رتبه حساسیت	مقدار بهینه (min,max,fitted)
r_Cn2	شماره منحنی رواناب در شرایط رطوبتی متوسط	۱	(-۰/۰۲ و ۰/۲۶ و ۰/۲۱)
v_Alpha_Bf	ضریب واکنش آب زیرزمینی	۲	(-۰/۰۱ و ۰/۴ و ۰/۰۲)
V_PLAPS.sub	افزایش بارندگی بر اثر افزایش ارتفاع (میلی‌متر در کیلومتر)	۳	(۱/۱۵ و ۸/۴۷ و ۳/۱۶)
v_Esco	ضریب تصحیح تبخیر از سطح خاک	۴	(۰/۱۸ و ۰/۳۶ و ۰/۲۹۱)
r_Sol_Awc	ظرفیت آب قابل دسترس خاک	۵	(-۰/۴ و ۰/۲ و ۰/۰۹۷)
v_Gw_Delay	ضریب تأخیر آب زیرزمینی	۶	(۰/۸ و ۷ و ۶/۴)
v_Gw_Revap	ضریب تعیین نفوذ به آبخوان عمیق از آبخوان عمیق	۷	(۰/۰۱۵ و ۰/۰۱۷ و ۰/۰۱۵۹)

جدول ۴. نتایج آماری شبیه‌سازی رواناب در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی

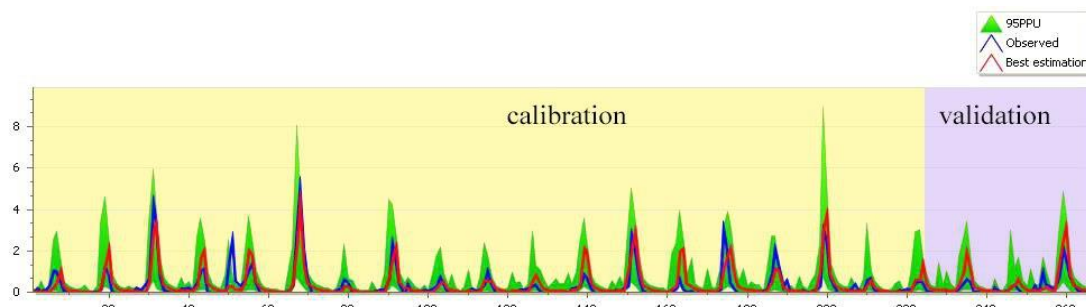
	۱۹۸۸-۲۰۰۹		۲۰۱۰-۲۰۱۴	
	واسنجی	اعتبارسنجی	اعتبارسنجی	اعتبارسنجی
ایستگاه	R <sup>2</sup>	NS	P-Factor	R-Factor
نجار کلا	۰/۶۵	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۵۹
ورودی سد لتیان	۰/۶۷	۰/۶۱	۰/۶۳	۰/۷۷
رودهن	۰/۶۴	۰/۶	۰/۴۸	۰/۶۱
زر دره	۰/۶۱	۰/۵	۰/۵۱	۰/۵۵
ایستگاه	R <sup>2</sup>	NS	P-Factor	R-Factor
نجار کلا	۰/۵۷	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۵
ورودی سد لتیان	۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۵	۰/۵۱
رودهن	۰/۵۹	۰/۵۱	۰/۴۴	۰/۴۹
زر دره	۰/۵۵	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۹



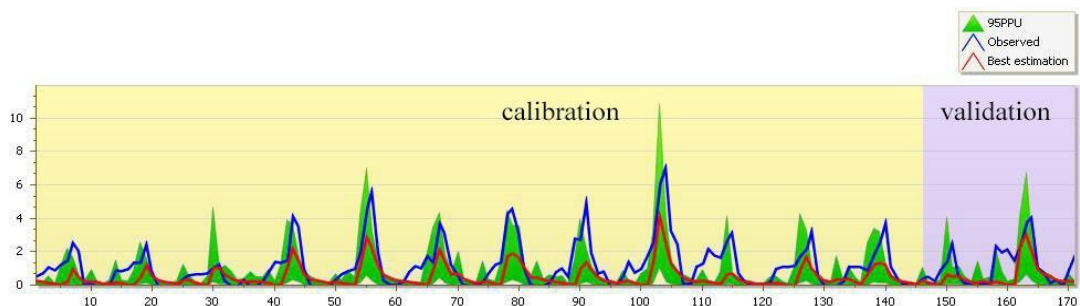
شکل ۳. سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب ایستگاه نجار کلا



شکل ۴. سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب ایستگاه ورودی سد لتیان



شکل ۵. سری زمانی مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب ایستگاه رودکن



شکل ۶. سری زمانی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب ایستگاه زر دره

ایجاد سناریوها به صورت متوسط (Ensemble) به مدل معرفی شدند. در جدول های ۵ و ۶ تغییرات پیش‌بینی شده توسط این مدل‌ها برای پارامترهای دمای کمینه و بیشینه و بارش آورده شده است. طبق پیش‌بینی مدل‌ها، بیشترین افزایش بارش در

سناریوهای اقلیمی و پیش‌بینی‌های آینده در پژوهش حاضر از سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به منظور شبیه‌سازی دما و بارش طی دوره ۳۰ سال آینده استفاده شده است. مدل‌های CMIP5 استفاده شده در پژوهش حاضر پس از



در ماه می با ۲/۰۴ مترمکعب در ماه کاهش می یابد و در ماه آوریل ۱/۴۹ مترمکعب در ماه در سناریوی خوش بینانه افزایش خواهد یافت. همچنین، در سناریوی بدبینانه RCP8.5 در ماه های می و ژوئن بیشترین کاهش رواناب را خواهیم داشت که می تواند تأثیرات بسیار بدی روی مقادیر آب ذخیره شده در مخزن سد تا شروع بارندگی های مجدد داشته باشد. با توجه به شکل ۷ در ایستگاه سد لتیان که مهم ترین ایستگاه این حوضه است، تغییرات به صورت جابه جایی زمانی خواهد بود و تقریباً در هر دو سناریوی بدبینانه و خوش بینانه پیک رواناب حدود یک ماه به جلو جابه جا خواهد شد و از ماه ۴ به ماه ۵ میلادی خواهد رسید. در شکل ۸ تغییرات ماهانه رواناب ارائه شده است که کاهش نسبی رواناب در ماه های فصل بهار و تابستان را نشان می دهند.

ماه آگوست با ۲۳ درصد افزایش و بیشترین کاهش بارش در ماه ژوئن با ۱۰ درصد برای سناریوی بدبینانه RCP8.5 خواهد بود. همچنین، افزایش بارش ۲۷ درصدی برای ماه سپتامبر و کاهش ۱۴ درصدی برای ماه ژولای توسط سناریوی خوش بینانه RCP2.6 انجام گرفته است. همچنین، تغییرات دما نشان داد میانگین دما با در نظر گرفتن سناریوی خوش بینانه RCP2.6، به طور متوسط  $0.75^{\circ}C$  و با در نظر گرفتن سناریوی بدبینانه RCP8.5،  $1.45^{\circ}C$  افزایش خواهد یافت.

#### پیش بینی رواناب تحت سناریوهای اقلیمی

پس از دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل و با ثابت نگه داشتن پارامترهای واسنجی شده، سناریوهای پیش بینی دما و بارش آینده به منظور برآورد رواناب به مدل SWAT وارد شدند. این تغییرات به صورت ماهانه روی دما و بارش دوره پایه اعمال می شود. در جدول ۷ بیشترین تغییرات رواناب

جدول ۵. سناریوهای بارش برای دوره آینده (درصد تغییرات)

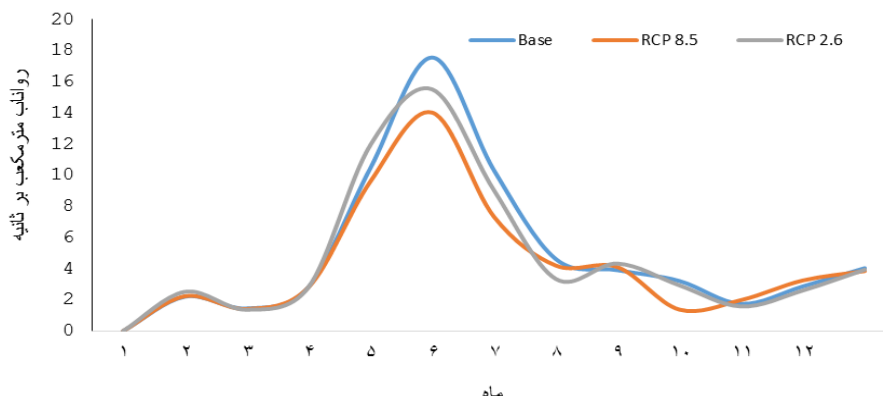
تغییرات بارش	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۱/۰۱	۰/۹۷	۰/۹۹	۱/۱۱	۰/۹۱	۰/۹۰	۰/۹۱	۱/۲۳	۱/۱۴	۱/۰۲	۱/۱۳	۰/۹۵
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۱/۰۸	۰/۹۴	۰/۹۹	۱/۱۴	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۸۶	۱/۱۵	۱/۲۷	۱/۰۶	۱/۲۰	۱/۰۵

جدول ۶. تغییرات دمای کمینه و بیشینه ( $^{\circ}C$ )

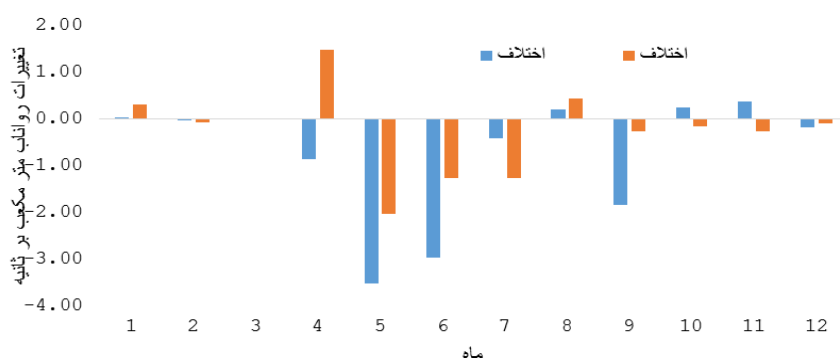
دمای کمینه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۶۳	۰/۹۴	۰/۴	۰/۵۸	۰/۳۵	۰/۹	۰/۶۹
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۶۹	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۹۲	۰/۵۷	۰/۶۴	۰/۲۵	۰/۶۵	۰/۵۱
دمای بیشینه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
RCP 8.5	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۰/۲۹	۱/۷۱	۱/۷۳	۰/۹۳	۱/۲۳	۰/۳۸	۰/۸۸	۰/۲۷	۰/۱۸	۰/۸۳	۲/۵۲	۱/۷۳
RCP 2.6	۲۰۲۱-۲۰۵۰	۱/۴۹	۱/۸۸	۰/۶۷	۰/۱۹	۰/۸۳	۰/۴۷	۰/۲۱	۱	۰/۹۴	۳/۸۲	۲/۰۲	۱/۷۵

جدول ۷. تغییرات رواناب در دوره آینده تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه (مترمکعب در ماه)

Month	اختلاف (mm)		RCP 2.6 (mm)	RCP 8.5 (mm)	Base (mm)
	RCP 2.6	RCP 8.5	۲۰۵۰-۲۰۲۱	۲۰۵۰-۲۰۲۱	Avg. ۲۰۱۴-۱۹۸۸
۱	۰/۳۱	۰/۰۳	۲/۵۲	۲/۲۴	۲/۲۱
۲	-۰/۰۸	-۰/۰۴	۱/۳۷	۱/۴۲	۱/۴۵
۳	-۰/۰۲	-۰/۰۲	۲/۸۱	۲/۸۱	۲/۸۳
۴	۱/۴۹	-۰/۸۶	۱۱/۹۳	۹/۵۹	۱۰/۴۵
۵	-۲/۰۴	-۳/۵۳	۱۵/۵۲	۱۴/۰۳	۱۷/۵۶
۶	-۱/۲۸	-۲/۹۸	۹/۰۵	۷/۳۴	۱۰/۳۳
۷	-۱/۲۷	-۰/۴۲	۳/۳۵	۴/۲۱	۴/۶۳
۸	۰/۴۳	۰/۲۰	۴/۳۳	۴/۱۱	۳/۹۱
۹	-۰/۲۸	-۱/۸۴	۲/۹۴	۱/۳۸	۳/۲۲
۱۰	-۰/۱۷	۰/۲۵	۱/۵۸	۱/۹۹	۱/۷۴
۱۱	-۰/۲۶	۰/۳۸	۲/۶۱	۳/۲۵	۲/۸۷
۱۲	-۰/۱	-۰/۱۹	۳/۹۴	۳/۸۵	۴/۰۴



شکل ۷. سری زمانی ماهانه رواناب در ورودی سد لتیان



شکل ۸. تغییرات ماهانه رواناب در ورودی سد لتیان

جدول ۸. برآورد مؤلفه‌های بیلان آب در دوره آینده تحت سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه

مؤلفه بیلان	Base(mm)	RCP 2.6(mm)	RCP 8.5(mm)
PRECIP MM	۳۸۸/۱۹	۳۸۱/۵۴	۳۷۰/۴۳
SNOW FALL MM	۱۱۰/۴۴	۱۱۴/۳	۱۱۹/۲۱
SNOW MELT MM	۱۰۷/۰۳	۱۰۶/۷۴	۱۰۲/۱۹
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q MM	۱۵/۵۶	۱۴/۵۱	۱۳/۳۲
GROUNDWATER (DEEP AQ) Q MM	۱/۸۲	۱/۱۷	۱/۱۵
REVAP (SHAL AQ => SOIL/PLANTS) MM	۲۲/۰۷	۲۱/۴۲	۲۱/۵۱
DEEP AQ RECHARGE MM	۱/۸۲	۱/۶۶	۱/۵۱
ET MM	۲۵۹/۳۸	۲۶۱/۴۱	۲۶۶/۲۱

### بررسی تغییرات بیلان آبی حوضه

اثر تغییر اقلیم روی بیلان کلی حوضه به صورت جدول ۸ است. مؤلفه‌های بیلان از داخل مدل SWAT برای پارامترهای بارش، مقدار بارش برف، ذوب برف، نفوذ به آبخوان عمیق و زیرسطحی، آب برگشتی، تبخیر تعرق واقعی و پتانسیل محاسبه شده‌اند. تغییر اقلیم علاوه بر تأثیر روی رواناب، بر سایر پارامترهای هیدرولوژیکی نظیر

تبخیر و تعرق، نفوذ و رشد گیاهی تأثیرگذار است. میزان تبخیر و تعرق واقعی در سناریوی خوش‌بینانه با ۳ mm افزایش و در سناریوی بدبینانه با ۸ mm افزایش، تأثیر بدی روی منابع آب در دسترس در حوضه آبریز خواهند گذاشت. همچنین، در هر دو سناریو در دوره آینده با کاهش بارش مواجه خواهیم بود.

Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 5<sup>th</sup> ed. United Kingdom and New York USA: Cambridge University Press, 2014.p.1-32.

- [4].Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Journal of American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 2007;50(3):885–900.
- [5].Nasiri A, Koocheki M, Kamali A, Shahandeh H. Potential Impacts of Climate Change on Agroclimatic Indicators in Iran. *Journal of Arid Land Research and Management*. 2006;33(8):626–632.
- [6].Abbott MB, Bathurst JC, Cunge JA, Connell PE, Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*. 1986;87(1-2):45–59.
- [7].Beven K, Lamb R, Quinn P, Romanowicz R, Freer J. TOPMODEL. In: Singh VP, editor. *Computer models of watershed hydrology*. 1<sup>th</sup> ed. Colorado Usa: Water resource publications. 1995.p. 627–668.
- [8].Kite GW. The SLURP model. In: Singh VP, editor. *Computer models of watershed hydrology*. 1<sup>th</sup> ed. Colorado Usa: Water resource publications. 1995.p. 521–562.
- [9].Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modelling and assessment part model development. *Journal of Water Resource As*. 1998;34(1):73–89.
- [10]. Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute. 2011; Report 406.
- [11]. Narsimlu B, Gosain AK, Chahar BR. Assessment of future climate change impacts on water resources of upper sind river basin, India using SWAT model. *Journal of Water Resource Management*. 2013;27(10):3647–3662.
- [12]. Ratna A, Ratna S, Shrestha A, Maharjan S. Climate change impact assessment on the hydrological regime of the Kaligandaki Basin. *Nepal Science of the Total Environment*. 2018;625 837–848.

## نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، تأثیر تغییرات آب و هوایی بر منابع آب یکی از ابرچالش‌های پیش روی برنامه‌ریزان منابع آب است و می‌تواند پیامدهای جدی خطرناکی را متوجه اکوسیستم‌ها و جوامع کند. از این‌رو، پیش‌بینی بلندمدت تغییرات آب و هوایی برای مدیریت حوضه آبخیز ضروری است. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر میزان رواناب و بیلان حوضه آبریز لتیان انجام گرفته است. در پژوهش حاضر بیشترین کاهش رواناب در سناریوی بدبینانه RCP8.5 در ماه‌های می و ژوئن پیش‌بینی شده که می‌تواند آثار بسیار بدی روی مقادیر آب ذخیره‌شده در مخزن سد لتیان تا شروع بارندگی‌های مجدد داشته باشد. البته، باید توجه داشت که عدم قطعیت، نتایج مطالعات ارزیابی آثار اقلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به دلیل مشخص نبودن وضعیت اقتصادی، اجتماعی آینده جامعه بشری نمی‌توان به‌صراحت میزان مشخصی برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفت. با بررسی نتایج کارایی مدل SWAT به نظر می‌رسد که این مدل برای حوضه‌های کوهستانی با وجود ایستگاه‌های کم باران‌سنجی می‌تواند به‌طور مؤثری استفاده شود. با توجه به اینکه ثبت مقادیر واقعی مؤلفه‌های بیلان آبی کاری دشواری است، استفاده از مدلی مانند SWAT راهکار مناسبی است تا سناریوهای مدیریتی و اقلیمی مختلف توسط پژوهشگران و مدیران به‌منظور حفظ اکوسیستم‌ها بررسی شود. در انتها، ضمن بیان اهمیت آثار تغییر اقلیم در وضعیت هیدرولوژی این منطقه استراتژیک، اعمال سیاست‌های مناسب به‌منظور مدیریت اصولی و پایدار از اکوسیستم‌ها، برای مقابله با افزایش خطرات تغییرات اقلیمی برای شکوفایی اقتصاد و آبادانی این منطقه توصیه می‌شود.

## منابع

- [1].Thomas CD, Bodsworth EJ, Wilson RJ, Simmons AD, Davies ZG, Musche M, et al. Extinction risk from climate change. *Journal of Nature*. 2004;427(8):145–148.
- [2].kelanki m, karandish f. Forecasting the long-term effects of climate change on climatic components in the region wet. *Journal of Water and Irrigation Engineering*. 2015;20(5):131-148. [Persian]
- [3].IPCC. Summary for policymakers. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, astrandrea MD, Bilir TE, et al, editor. *Climate Change*

- [13]. Mehrizi SH, Khorani A, Bazrafshan J, Bazrafshan O. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Gamasiab river basin. *journal of Ecohydrology*. 2018;5(3):777-789. *[Persian]*
- [14]. Sayahi S, Shahbazi A, Khademi KH. Prediction of the effect of climate change on the monthly runoff of the basin Dez using IHACRES. *Journal of Water Science Engineering*. 2016;15(7): 7-18.
- [15]. Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H, Kløve BA. continental-scale hydrology and water quality model for Europe calibration and uncertainty of a high-resolution largescale SWAT model. *Jounral of Hydrology*. 2015; 524:733–752.
- [16]. Massah Bavani A, Morid S. Study effects of climare change on zayande rood discharge. *Journal of Water and Soil Science*. 2006; 4:17-27. *[Persian]*
- [17]. Abbaspour KC. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs –A User Manual. Department of Systems Analysis. Integrated Assessment and Modelling. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology. 2015;100pp.