

## بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه زرينه‌رود با استفاده از مدل SWAT

بهاره منصوری<sup>۱\*</sup> - حجت احمدزاده<sup>۲</sup> - علیرضا مساح بوانی<sup>۳</sup> - سعید مرید<sup>۴</sup> - مجید دلاور<sup>۵</sup> - سعید لطفی<sup>۶</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۷/۷

### چکیده

تحقیق حاضر آثار ناشی از تغییر اقلیم را بر دما، بارندگی و رواناب در دوره‌های آتی با کمک مدل آماری LARS-WG و مدل مفهومی هیدرولوژیکی SWAT مورد ارزیابی قرار می‌دهد. برای مطالعه موردی، حوضه زرينه‌رود، بزرگترین زیرحوضه دریاچه ارومیه، انتخاب شد. در گام اول، به منظور تولید داده‌های هواشناسی دوره آتی در حوضه مدل LARS-WG مورد واسنجی قرار گرفت و سپس از ۱۴ مدل از مدل‌های AOGCM استفاده گردیده و خروجی این مدل‌ها برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ در ۶ ایستگاه سینوپتیک با استفاده از مدل LARS-WG کوچک مقیاس شدند. از مدل SWAT جهت ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر میزان رواناب حوضه استفاده گردید. بدین منظور ابتدا این مدل با استفاده از ۶ ایستگاه هیدرومتری برای دوره ۱۹۸۷-۲۰۰۷ واسنجی و اعتبارسنجی شد که مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ ) به ترتیب بین ۰/۴۹ تا ۰/۷۱ و ۰/۵۴ تا ۰/۷۷ بدست آمد. در ادامه با معرفی میانگین نتایج ریزمقیاس شده مدل‌های AOGCM به مدل SWAT تغییرات رواناب خروجی از حوضه در طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ شبیه‌سازی گردید. میانگین نتایج مدل LARS-WG نشان داد که متوسط ماهانه درجه حرارت حداقل و حداکثر در دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ افزایش خواهد یافت. همچنین متوسط ماهانه بارندگی در فصل بهار کاهش یافته در حالی که به مقدار آن در فصل‌های تابستان و پاییز افزوده خواهد شد. نتایج نشان داد که در دوره آتی نه تنها در مقدار بارش بلکه در الگوی بارش نیز تغییراتی رخ خواهد داد. نهایتاً نتایج نشان از کاهش ۲۸ درصدی رواناب ورودی به سد زرينه‌رود در دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه دارد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه زرينه‌رود، LARS-WG، AOGCM، رواناب، SWAT

### مقدمه

مؤلفه‌های اقلیمی در اندرکنش متقابل قرار دارد، انتظار می‌رود که تغییرات قابل ملاحظه‌ای در آب و هوای جهانی رخ دهد (۱۱). گرم شدن کره زمین منجر به تغییر بیابان تابش از سطح زمین، گردش اتمسفر، تغییر توزیع مکانی و زمانی و شدت بارش شده و به چرخش بخار آب سرعت می‌بخشد، همچنین ویژگی‌های هیدرولوژیکی از قبیل تبخیر، رواناب و آب خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱۵ و ۱۶). با توجه به آن که آب و مسائل مربوط به آن از جمله دغدغه‌های اصلی بشر در دوره‌های آتی به حساب می‌آید جهت مدیریت هر چه بهتر، ضرورت دارد وقوع تغییرات اقلیمی و میزان تأثیرگذاری آن بر منابع آب ارزیابی گردد. این پدیده می‌تواند خسارات بسیار قابل ملاحظه‌ای را در مناطقی که آسیب‌پذیری بخش آب آن‌ها در وضع موجود قابل توجه است ایجاد کند.

در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی یک حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم، عدم قطعیت‌های گوناگونی بر نتایج نهایی تأثیرگذار است که با نادیده گرفتن هر یک از آن‌ها از اعتبار نتایج کاسته می‌شود. در شکل ۱ خلاصه ۴ مرحله ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و منابع اصلی عدم قطعیت ارائه شده است (۹).

تغییر اقلیم عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است. در نیم قرن اخیر، آب و هوا و محیط زیست جهانی دستخوش تغییرات بزرگی شده است. گسترش صنعت و استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت ایجاد انرژی مورد نیاز بشر، منجر به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای چون  $\text{CH}_4$ ،  $\text{N}_2\text{O}$  و به ویژه  $\text{CO}_2$  شده است. آنچه مسلم است افزایش گازهای جاذب گرما در جو زمین، درجه حرارت زمین را افزایش خواهد داد (۶ و ۷). از آن‌جا که میزان درجه حرارت با سایر

۱ و ۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

\*- نویسنده مسئول: (Email: b\_mansouri84@ut.ac.ir)

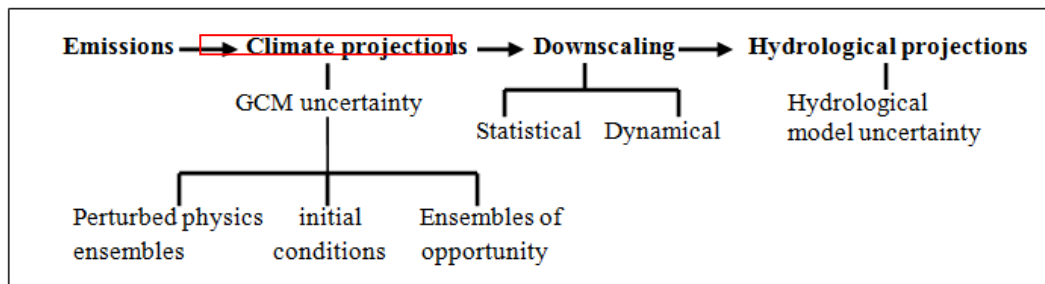
۲- دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۴ و ۵- استاد و استادیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه

تربیت مدرس

۶- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، کارشناس گروه سیاستگذاری و

تخصیص آب دفتر برنامه ریزی کلان آب و آبفا وزارت نیرو، تهران، ایران



شکل ۱- مراحل ارزیابی اثر تغییر اقلیم و منابع اصلی عدم قطعیت

شبه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که تغییر جریان کم به عدم قطعیت در ساختار مدل‌های GCM و روش ریز مقیاس کردن حساس بوده، اما حساسیت کمتری نسبت به عدم قطعیت ناشی از مدل هیدرولوژیکی و سناریوهای انتشار دارد. نجفی و همکاران (۱۷)، چهار مدل هیدرولوژیکی را با سطوح مختلف از پیچیدگی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که انتخاب مدل هیدرولوژیکی در فصول خشک نسبت به فصول مرطوب در مناطقی که ریزش‌های جوی بصورت بارش باران است از اهمیت بیشتری برخوردار است. گزارش چهارم پنل بین‌الدول (IPCC) در رابطه با تغییر اقلیم نیز نشان داد که پیش‌بینی‌های بدست آمده از مدل‌های GCM مختلف بزرگترین منابع عدم قطعیت در پیش‌بینی اثرات آن بر منابع آب هستند. جانگ و همکاران (۱۴)، عدم قطعیت هیدرولوژیکی را با ترکیب اثر دو سناریوی انتشار و هشت مدل گردش عمومی برای دو حوضه در شمال غرب اقیانوس آرام مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، اثرات نسبی منابع گوناگون عدم قطعیت بین دو حوضه متفاوت است و تغییرات در نیمه دوم زمستان برای حوضه‌های برف‌گیر، به دلیل تفاوت در مقدار و زمان ذوب برف نسبت به حوضه‌های بارانی بیشتر تحت تأثیر عدم قطعیت مدل هیدرولوژیکی قرار دارد. بنابراین مطالعه اثر تغییر اقلیم بر رواناب در حوضه‌های برفی به دلیل عدم قطعیت قابل ملاحظه در پارامترهای مدل هیدرولوژیکی نیاز به تفسیر محتاط‌تر پیش‌بینی‌ها دارد.

نتایج مدل‌های اقلیمی، اساس شبه‌سازی‌های تغییر اقلیم آینده را فراهم می‌کند که دارای عدم قطعیت بالایی می‌باشد. از طرفی گسترش این مدل‌ها باعث افزایش محدوده عدم قطعیت در نتایج می‌شود. یکی از روش‌هایی که امکان ارزیابی طیف وسیعی از عدم قطعیت را در مطالعات تغییر اقلیم فراهم می‌کند، استفاده از multi-model ensembles از گزارش چهارم IPCC (AR4 IPCC) می‌باشد. مجموعه چندگانه مدل‌های اقلیمی بر عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های آب و هوایی ناشی از تفاوت‌های ساختاری و همچنین عدم قطعیت در تغییرات شرایط اولیه و یا پارامترهای مدل‌های آب و هوایی جهانی تأکید دارد. قابل ذکر است واژه (multi-model ensembles) در مطالعات می‌تواند در مفاهیم متفاوتی ظاهر شود و برای بیان تنها

مرحله اول، تعیین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در مرحله دوم از این سناریوها به منظور شبه‌سازی تغییرات آب و هوایی توسط مدل اقلیمی استفاده خواهد شد. این مدل‌ها به دلیل استفاده از روش‌های متفاوت در پارامتر کردن فرآیندهای کوچک مقیاس (بارندگی و مانند آن)، نتایج یکسانی از شبه‌سازی متغیرهای اقلیمی مشابه در منطقه مورد نظر بدست نمی‌دهند (۱۳). لذا به منظور در نظر گرفتن تأثیر خروجی مدل‌های گوناگون AOGCM در تحقیقات تغییر اقلیم لازم است از خروجی تعداد زیادی از این مدل‌ها استفاده گردد. مرحله سوم، ریز مقیاس کردن خروجی مدل‌های اقلیمی با یک قدرت تفکیک بالا برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی مناسب می‌باشد. در مرحله نهایی اطلاعات اقلیمی کوچک مقیاس شده به یک مدل هیدرولوژیکی اعمال می‌شود. در این مرحله عدم قطعیت ناشی از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف مطرح می‌شود (۹).

انتخاب یک مدل از بین مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف که بتواند تأثیرات تغییر اقلیم را با توجه به شرایط مختلف مدیریت کشاورزی و منابع آبی بر روی سیستم منابع آب یک منطقه شبه‌سازی کند، تأثیر بسزایی در ارزیابی اثرات این پدیده و تصمیم‌گیری بهتر سازمان‌ها و ذی‌نفعان مربوط دارد. بررسی تحقیقات انجام شده نشان داده است که مدل SWAT به دلایلی مانند بدون هزینه بودن و قابلیت شبه‌سازی همزمان اثرات متقابل متغیرهای هیدرولوژیکی و مدیریت کشاورزی (مانند رواناب، تبخیر و تعرق و آب‌های زیرزمینی) و متغیرهای گیاهی (مانند عملکرد) در حوضه‌های پیچیده با شرایط کاربری اراضی و نوع خاک متنوع گزینه مناسبی می‌باشد (۱۹). این مدل ضمن دارا بودن این امکانات، می‌تواند تحلیل‌های لازم را در محیط GIS به طور مکانی انجام دهد. از سال ۱۹۹۰ مطالعات متعدد تلاش کرده‌اند عدم قطعیت ناشی از منابع مختلف را در پژوهش‌های هیدرولوژیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهند.

ویلی و هریس (۲۸)، اثر تغییر اقلیم بر میزان جریان‌های کم رودخانه تیمز در انگلستان را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه منابع عدم قطعیت مربوط به مدل‌های GCM، روش‌های کوچک مقیاس کردن، سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، مدل‌های مختلف شبه‌سازی بارش-رواناب و عدم قطعیت مربوط به پارامترهای آن‌ها

## مواد و روش‌ها

### تشریح منطقه مطالعاتی و داده‌ها

حوضه زربنه رود بزرگترین زیرحوضه درجه ۲ از حوضه دریاچه ارومیه است که در موقعیت ۴۷°۴۵ تا ۲۰°۴۷ طول جغرافیایی و ۴۱°۳۵ تا ۲۷°۳۷ عرض جغرافیایی قرار دارد. وسعت این حوضه بالغ بر ۱۲۰۲۵ کیلومتر مربع بوده و رودخانه اصلی آن دارای طول ۳۰۰ کیلومتر می‌باشد. سد زربنه رود، سد اصلی مورد بهره‌برداری در این حوضه بوده و از آن برای مصارف کشاورزی و شرب استفاده می‌گردد. رودخانه زربنه رود قبل از سد زربنه رود در بالادست از چهار شاخه اصلی به نام‌های سقرچای، جیغاتوچای، خرخره‌چای و ساروق‌چای تشکیل می‌گردد. این رودخانه پس از خروج از سد مزبور در جهت شمال به جریان خود ادامه داده و وارد سد انحرافی نوروزلو می‌گردد و با رودخانه آجرلو که یکی دیگر از شعب مهم خود می‌باشد در همین محل تلاقی می‌نماید. آب‌های خروجی از سد نوروزلو در بستر رودخانه وارد میان‌دوآب می‌گردد. پس از عبور از این شهر به موازات سیمینه رود بسوی دریاچه پیش رفته و در روستای قره‌گزلو وارد دریاچه ارومیه می‌شود. در شکل ۱ نمایی از حوضه و موقعیت سد زربنه رود و شبکه رودخانه‌های جاری در آن نشان داده شده است.

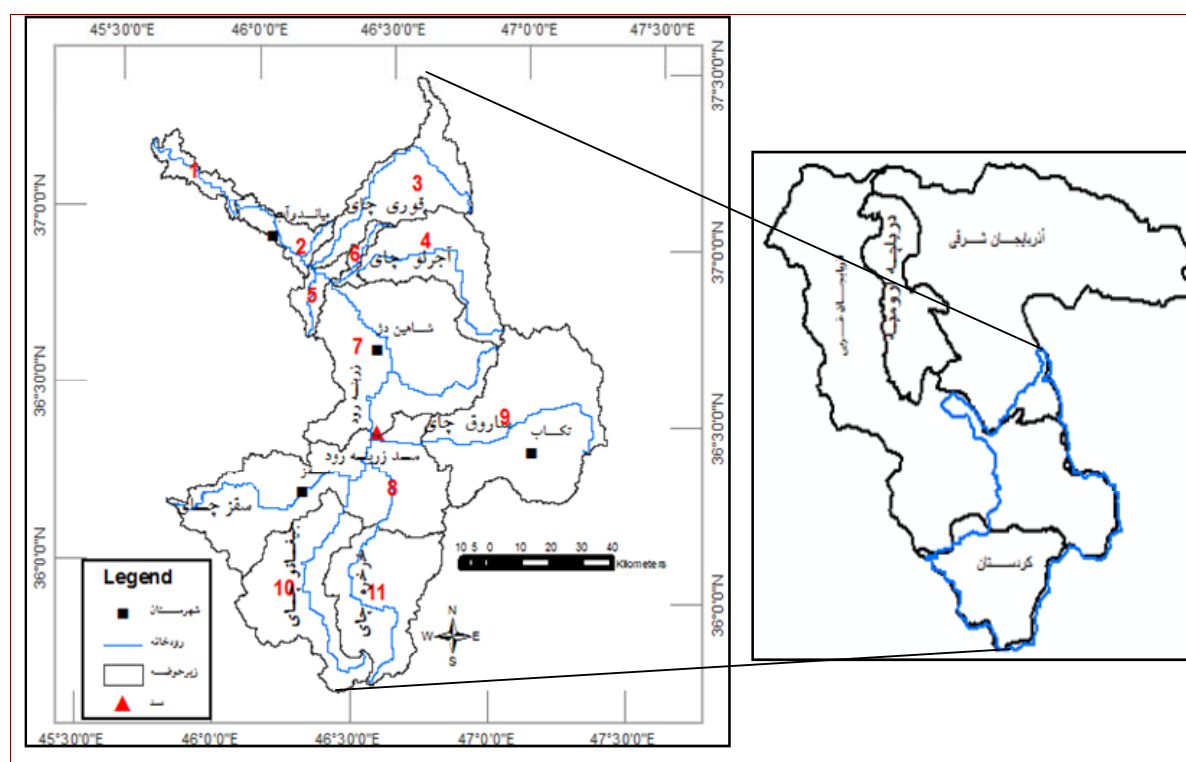
با توجه به اطلاعات مورد نیاز مدل SWAT، در این تحقیق جهت تولید شبکه آبراهه‌ها و زیرحوضه‌ها از لایه رقومی ارتفاع (DEM) (Digital Elevation Model) با اندازه سلولی ۳۰ متری استفاده گردید. همچنین از نقشه‌های کاربری اراضی (شکل ۲) (۱) و خاک FAO برای تعیین واحدهای هیدرولوژیکی یکسان حوضه (HRU<sup>۱</sup>) استفاده گردید. از داده‌های ۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک که نزدیکترین فاصله را با منطقه مورد مطالعه داشتند، جهت شبیه‌سازی فرآیندهای مورد نظر طی دوره ۱۹۸۷ لغایت ۲۰۰۸ استفاده گردید. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین از آمار ماهانه دبی ۶ ایستگاه هیدرومتری جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT استفاده گردید. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- نام و مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در

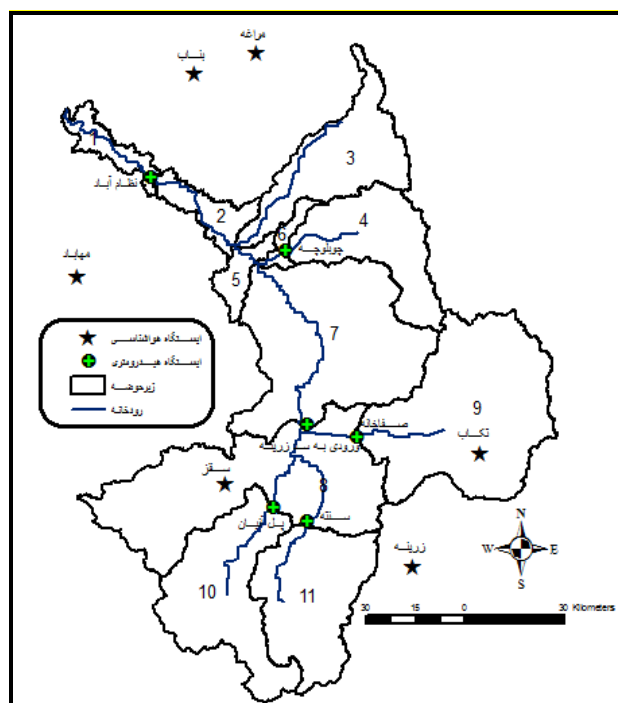
تحقیق				
نام ایستگاه	استان	طول	عرض	ارتفاع
تکاب	آذربایجان غربی	۰۷-۴۷	۲۳-۳۶	۱۷۶۵
زربنه	کردستان	۵۵-۴۶	۰۴-۳۶	۲۱۴۲/۶
سقر	کردستان	۱۶-۴۶	۱۵-۳۶	۱۵۲۲/۸
بناب	آذربایجان شرقی	۰۴-۴۶	۲۰-۳۷	۱۲۹۰
مراغه	آذربایجان شرقی	۱۶-۴۶	۲۴-۳۷	۱۴۷۷/۷
مهاباد	آذربایجان غربی	۴۳-۴۵	۴۶-۳۶	۱۳۸۵

یک نمونه ارزیابی عدم قطعیت در روش‌های اصولی مطرح نشده است (۱۲). در این تحقیق واژه ensemble در مفهوم بکارگیری میانگین چند مدل مطرح شده است. با این حال، استفاده مستقیم شبیه‌سازی‌های آب و هوای حاصل از multi-model ensembles در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و کشاورزی مناسب نیست. زیرا این شبیه‌سازی‌ها نوعاً به عنوان میانگین‌های ماهانه یا تغییرات در میانگین‌های ماهانه متغیرهای اقلیمی قابل استفاده‌اند، در صورتی که مراحل مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی به سری‌های زمانی روزانه آب و هوا به عنوان یکی از ورودی‌های اصلی خود وابسته هستند. حتی اگر خروجی روزانه از طریق GCM ها قابل استفاده باشد، قدرت تفکیک مکانی کم این مدل‌ها و عدم قطعیت بزرگ در خروجی‌های آن‌ها در مقیاس روزانه مخصوصاً برای بارندگی به این معنی است که خروجی این مدل‌ها برای استفاده در مراحل مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی و تحلیل وقایع شدید مناسب نیست. به همین دلیل خروجی مدل‌های AOGCM نیاز به تکنیک‌های مختلف ریز مقیاس نمایی دارد (۲۳). یکی از تکنیک‌های ریز مقیاس کردن آماری، برای ایجاد سناریوهای اقلیمی روزانه، استفاده از مولد آب و هوای تصادفی است (۵، ۲۳، ۲۶ و ۲۷). یک مولد آب و هوای تصادفی، مدلی است که پس از واسنجی پارامترهای آب و هوای مشاهداتی، توانایی شبیه‌سازی سری‌های زمانی آب و هوای روزانه که از نظر آماری مشابه سری مشاهداتی است را دارد (۲۲ و ۲۷). همچنین از طریق اصلاح پارامترها با استفاده از تغییرات اقلیمی برآورد شده توسط مدل‌های AOGCM، شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی ممکن می‌گردد (۲۴).

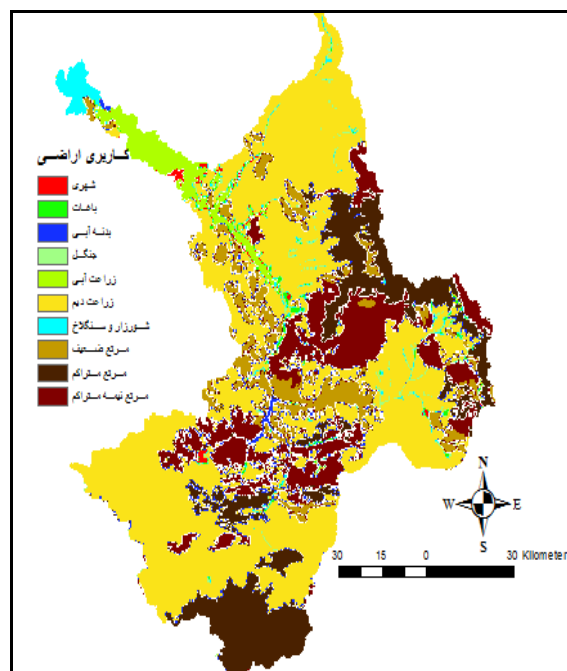
با توجه به اثرات مختلف تغییر اقلیم در نقاط مختلف دنیا، ایران نیز از تغییرات بزرگ مقیاس مستثنی نبوده و اثرات آن در بسیاری از حوضه‌های آبریز کشور مشاهده شده است. در این میان حوضه دریاچه ارومیه (یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران)، دست کم طی یک دهه گذشته با خشکسالی‌ها و کم بارشی‌های پیاپی مواجه بوده و این حوضه پهنه ساخت انواع سازه‌های آبی و توسعه کشاورزی قرار گرفته است. این عوامل منجر به خشک شدن دریاچه ارومیه شده است. به دلیل حساسیت قابل توجه حوضه دریاچه ارومیه به خشکسالی‌ها، این حوضه می‌تواند به شدت نسبت به تغییرات آب و هوایی محتمل ناشی از پدیده تغییر اقلیم در آینده آسیب‌پذیر باشد. با توجه به وابستگی قابل توجه محیط زیست دریاچه ارومیه به میزان جریان ورودی از رودخانه زربنه رود به این دریاچه، در این مطالعه به ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب این حوضه با استفاده از میانگین نتایج ۱۴ مدل گردش عمومی و سناریوهای انتشار مربوط به گزارش چهارم IPCC (multi-model ensembles) و مدل<sup>۱</sup> SWAT می‌پردازیم.



شکل ۱- موقعیت حوضه زرينه رود و زيرحوضه های آن



شکل ۳- موقعیت ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در مدل SWAT



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوضه زرينه رود

صورت میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی، از جمله بارش، حداقل و حداکثر درجه حرارت و تابش برای دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ در دسترس است.

### ریز مقیاس نمایی

مدل‌های GCM نشان‌دهنده مهارت‌های متفاوت در شبیه‌سازی الگوهای چرخش و تغییر و تنوع فصلی و درون فصلی هستند (۲۰ و ۸). با این حال، قدرت تفکیک فضایی کم نتایج GCM منجر به اشتباهات عمده و عدم قطعیت زیاد در خروجی آنها در مقیاس محلی، به ویژه برای بارش می‌شود. منبع خطاها مربوط به این واقعیت است که بسیاری از فرآیندهای کوچک مقیاس را نمی‌توان به روشنی در مدل‌های آب و هوا نشان داد و باید تقریب زد. این امر به دلیل محدودیت در قدرت محاسباتی، محدودیت درک ما از فرآیندهای کوچک مقیاس و عدم مشاهدات دقیق مورد نیاز برای اعتبارسنجی است.

### تولید سناریوهای اقلیمی ماهانه با استفاده از مدل‌های AOGCM

در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده گردش عمومی اتمسفر-اقیانوس (AOGCM) می‌باشد. نسخه ۶ LARS-WG شامل پیش‌بینی‌های ۱۵ مدل GCM بکار رفته در گزارش چهارم IPCC است (۲۵). جدول ۲ خلاصه ویژگی‌های مهم ۱۴ مدل چرخش عمومی مورد استفاده در این مطالعه می‌باشد (۱۸). برای بسیاری از مدل‌های GCM پیش‌بینی‌های آب و هوا برای ۳ سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای (SRA1B، SRA2 و SRB1) در دسترس هستند. پیش‌فرض‌های کلیدی سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش غلظت CO<sub>2</sub> در جدول ۳ ارائه شده است. همه مدل‌های GCM ارائه شده، ترکیبی از دو دسته مدل‌های AGCMs که بر هم کنش اتمسفر را در نظر می‌گیرند و مدل‌های OGCMs که تأثیر متقابل اقیانوس‌ها را در نظر می‌گیرند (AOGCM)، می‌باشند. خروجی این مدل‌ها به

جدول ۲- مشخصات مدل‌های جهانی آب و هوا مربوط به گزارش ارزیابی چهارم IPCC گنجانده شده در نسخه ۶ LARS-WG.

T3: ۲۰۸۱-۲۱۰۰، T2: ۲۰۶۵-۲۰۴۶، T1: ۲۰۱۱-۲۰۳۰

دوره زمانی	سناریو انتشار	قدرت تفکیک	مدل	کشور	مرکز تحقیق
T1,T2,T3	SRA1B, SRB1	1.9 × 1.9°	CSMK3	Australia	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
T1,T2,T3	SRA1B	2.8 × 2.8°	CGMR	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis
T1,T2,T3	SRA1B, SRB1	2.8 × 2.8°	FGOALS	China	Institute of Atmospheric Physics
T1,T2,T3	A1B, A2	1.9 × 1.9°	CNCM3	France	Centre National de Recherches Meteorologiques
T1,T2,T3	SRA1B, SRA2, SRB1	2.5 × 3.75°	IPCM4	France	Institute Pierre Simon Laplace
T1,T2,T3	SRA1B, SRA2, SRB1	1.9 × 1.9°	MPEH5	Germany	Max-Planck Institute for Meteorology
T1,T2,T3	SRA1B, SRB1	2.8 × 2.8°	MIHR	Japan	National Institute for Environmental Studies
T1,T2,T3	SRA1B, SRB1	1.9 × 1.9°	BCM2	Norway	Bjerknes Centre for Climate Research
T1,T2,T3	SRA1B, SRA2, SRB1	2.5 × 3.75°	HADCM3	UK	UK Meteorological Office
T1, T2	SRA1B, SRA2	1.3 × 1.9°	HADGEM	UK	UK Meteorological Office
T1,T2,T3	SRA1B, SRA2, SRB1	2.0 × 2.5°	GFCM21	USA	Geophysical Fluid Dynamics Lab
T1,T2,T3	SRA1B, SRB1	3 × 4°	GIAOM	USA	Goddard Institute for Space Studies
T1, T2	SRA1B, SRB1	2.8 × 2.8°	NCPCM	USA	National Centre for Atmospheric Research
T1, T2,T3	SRA1B, SRA2, SRB1	1.4 × 1.4°	NCCCS	USA	National Centre for Atmospheric Research

جدول ۳- خصوصیات سناریوهای A1B، B1 و A2 و غلظت CO<sub>2</sub> (ppm) در دوره‌های آتی (۱۸)

سناریو	فرضیات	غلظت CO <sub>2</sub>
		۲۰۱۱-۲۰۳۰ ۲۰۴۶ ۲۰۸۱-۲۱۰۰ ۲۰۶۵
B1 (جهان پایدار)	تغییر سریع در ساختارهای اقتصادی، بهبود نگرانی‌های زیست محیطی (یک نگرانی جهانی در مورد پایداری زیست محیطی و اجتماعی و تلاش بیشتر در معرفی فن‌آوری‌های پاک وجود دارد)، جمعیت جهان در سال ۲۱۰۰ به ۷ میلیارد می‌رسد.	۴۱۰ ۴۹۲ ۵۳۸
A1B (جهان با رشد اقتصادی)	رشد سریع اقتصادی، رشد جمعیت پایین، مقدمه تکنولوژی‌های جدید و کارآمد، ظرفیت‌سازی، همگرایی اقتصادی و فرهنگی در سطح جهان، کاهش قابل توجهی در اختلاف‌های منطقه‌ای در درآمد سرانه.	۴۰۶ ۴۸۶ ۵۸۱
A2	جدا کردن هویت فرهنگی مناطق مختلف، جهان ناهمگن و احتمال کمتر همکاری‌های بین‌المللی، تأکید بر ارزش‌های خانوادگی، سنت‌های محلی و در نتیجه رشد جمعیت بالا، تمرکز کمتر بر رشد اقتصادی.	۴۱۴ ۵۴۵ ۷۵۴

مقدار  $v_i$  منطبق با احتمال  $P_i$  به صورت زیر محاسبه شده است:

$$v_i = \min(v : P(v_{obs} \leq v) \geq P_i) \quad i = 0, \dots, n \quad (1)$$

در این رابطه  $P_0$  احتمال بر پایه داده‌های مشاهده شده  $\{V_{obs}\}$  را مشخص می‌کند. برای هر متغیر اقلیمی، دو مقدار  $P_n$  و  $P_0$  برابر  $P_0 = 0$  و  $P_n = 1$  با مقادیر متناظر  $\{V_{obs}\}$  و  $V_0 = \min\{V_{obs}\}$  و  $V_n = \max\{V_{obs}\}$  ثابت در نظر گرفته شده‌اند. برای تقریب به دقت مقادیر حدی متغیرهای اقلیمی، بعضی  $P_i$  ها برای مقادیر مینیمم متغیر نزدیک به صفر و برای مقادیر ماکزیمم نزدیک به یک تعیین شده‌اند، مقادیر باقیمانده  $P_i$  به طور هموار روی مقیاس احتمال توزیع شده است. برای بارندگی، سه مقدار نزدیک به یک استفاده شده‌اند:  $P_{n-1} = 0/999$ ،  $P_{n-2} = 0/995$  و  $P_{n-3} = 0/985$  این مقادیر اجازه تقریب بهتر از حوادث بارندگی روزانه فوق‌العاده زیاد که با احتمال خیلی پایین اتفاق می‌افتد را می‌دهند، به‌عنوان مثال بارندگی در مدت فعالیت هاریکن‌ها. از آنجا که احتمال بارندگی خیلی پایین روزانه (کمتر از ۱ میلی‌متر) معمولاً نسبتاً بالاست و چنین بارندگی پایین تأثیر خیلی کمی در روش مبتنی بر مدل‌های شبیه‌سازی دارد، از دو مقدار  $V_1 = 0/5 \text{ mm}$  و  $V_2 = 1 \text{ mm}$  برای تقریب بارندگی درون بازه  $[0, V_{obs}]$  منطبق با احتمالات محاسبه شده،  $i = 1, 2$ ؛  $p(V_{obs} \leq v) = P_i$  استفاده می‌شود. برای محاسبه دوره‌های به شدت خشک و تر دو مقدار نزدیک به یک  $(P_{n-1} = 0/999)$ ،  $(P_{n-2} = 0/998)$  استفاده می‌شود. برای دمای حداقل و حداکثر دو مقدار نزدیک به صفر و دو مقدار نزدیک به یک  $(P_2 = 0/01)$ ،  $(P_3 = 0/98)$  و  $(P_{n-1} = 0/99)$ ،  $(P_{n-2} = 0/98)$  برای محاسبه دماهای به شدت بالا و پایین استفاده می‌شود (۲۴).

### شبیه‌سازی رواناب ماهانه توسط مدل بارش-رواناب

در این مرحله سناریوهای اقلیمی به دست آمده از مرحله قبل جهت شبیه‌سازی رواناب به کمک مدل SWAT که برای منطقه مورد نظر واسنجی و صحت‌سنجی شده است، استفاده گردید.

### ساختار مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی، پیوسته زمانی، نیمه توزیعی و با پایه فیزیکی است که توسط USDA-ARS توسعه یافته است (۳). در این مدل تعریف واحدهای همگن هیدرولوژیکی (HRU) جهت اجرای مدل و شبیه‌سازی متغیرهای مورد نظر (متغیرهای هیدرولوژیکی، عملکرد و غیره) بسیار اهمیت دارد. این واحدها با ترکیب لایه‌های DEM، کاربری اراضی و نوع خاک بوجود می‌آیند بطوری که در هر یک از این واحدها نوع خاک و کاربری اراضی یکسان می‌باشند و

به همین دلیل خروجی مدل‌های GCM نیاز به تکنیک‌های ریز-مقیاس نمایی دارند. برای این منظور در این مطالعه از مولد آب و هوای تصادفی LARS-WG استفاده شده است.

### توصیف مدل LARS-WG

LARS-WG یک مولد آب و هوای تصادفی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های جوی در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده استفاده شود. اولین نسخه LARS-WG در بوداپست در سال ۱۹۹۰ برای ارزیابی ریسک کشاورزی در مجارستان توسعه یافت (۲۱). سپس در سال ۱۹۹۸ توسط سمونوف بازنگری و تعدیل شد. LARS-WG سری‌های زمانی روزانه دمای حداقل و حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید می‌کند. یک مولد آب و هوای تصادفی از داده‌های روزانه مشاهده شده در یک ایستگاه برای محاسبه یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی، به علاوه ارتباط بین آنها استفاده می‌کند. این مجموعه از پارامترها برای تولید سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دلخواه از طریق انتخاب تصادفی مقادیر از توزیع‌های مناسب استفاده شده است. از طریق دخالت پارامترهای توزیع‌ها برای یک ایستگاه به همراه تغییرات پیش‌بینی شده اقلیمی که از مدل‌های اقلیم جهانی یا منطقه‌ای نتیجه شده، سناریوی اقلیم روزانه برای این ایستگاه می‌تواند تولید شود و در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و کشاورزی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم استفاده گردد. دامنه وسیعی از شبیه‌سازی‌های اقلیمی آینده با مدل‌های GCM وجود دارد. بنابراین در این مطالعه سعی گردید از میانگین ۱۴ مدل GCM (multi-model ensembles) و سناریوهای انتشار مربوط (گنجانانده شده در مدل LARS-WG) در ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دمای حداکثر و حداقل، بارش و رواناب در حوضه زربینه رود طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ (۱۴۱۰-۱۳۹۴) در مقایسه با دوره پایه ۱۳۸۵-۱۳۶۹ استفاده گردد. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG از داده‌های بارش، حداکثر و حداقل درجه حرارت روزانه شش ایستگاه سینوپتیک سقز، تکاب، زرینه، مهاباد، بنابو مراغه استفاده شد. این مدل برای مقایسه داده‌های تولید شده و تاریخی از معیارهای توزیع احتمال و میانگین‌ها به ترتیب از آزمون‌های  $(\chi^2)$  و  $t$  استفاده می‌کند.

LARS-WG از یک توزیع نیمه تجربی (SED) برای تقریب زدن توزیع‌های احتمال دوره‌های خشک و تر، بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشید روزانه استفاده می‌کند. SED همچون تابع توزیع احتمال تجمعی (CDF) تعریف شده است. تعداد طبقات استفاده شده در SED برابر ۲۳ می‌باشد. برای هر متغیر اقلیمی  $v$ ،

استفاده از معادله اصلی زیر مشخص می‌گردد (۱۹):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (2)$$

در این معادله،  $SW_t$  مقدار نهایی آب در خاک (mm) در روز  $t$ ،  $SW_0$  مقدار اولیه آب در خاک (mm)،  $t$  زمان بر حسب روز و  $R_{day}$  میزان بارندگی در روز  $i$  (mm)،  $Q_{surf}$  مقدار رواناب سطحی در روز  $i$  (mm)،  $E_a$  مقدار تبخیر و تعرق در روز  $i$  (mm)،  $W_{seep}$  مقدار آبی که در روز  $i$  از منطقه ریشه خارج می‌گردد (mm) و  $Q_{gw}$  مقدار جریان برگشتی در روز  $i$  (mm) می‌باشند. حجم رواناب سطحی ناشی از بارندگی یکی از متغیرهای اصلی جریان رودخانه است که مدل از روش شماره منحنی SCS بر اساس نوع کاربری اراضی، خاک، رطوبت پیشین خاک، وضعیت بارش و توپوگرافی زمین برای برآورد روزانه آن استفاده می‌کند (۱۹). همچنین مدل از معادله هوخهات (۱۰) جهت محاسبه مقدار جریان برگشتی از آب زیرزمینی ( $Q_{gw}$ ) استفاده کرده و در آخر با برآورد ذوب برف با استفاده از معادلات تجربی، مقدار کل رواناب را محاسبه می‌کند. همچنین در مدل فرایند کاملی جهت شبیه‌سازی مقدار تبخیر و تعرق واقعی ( $E_a$ ) و تغییرات رطوبت خاک (SW) وجود دارد که در این تحقیق بعلاوه حجم شدن مطالب از آوردن آنها صرف نظر شده است.

#### آنالیز حساسیت و واسنجی مدل SWAT

به دلیل زیاد بودن پارامترهای مدل SWAT و همچنین شبیه‌سازی همزمان بسیاری از متغیرهای هیدرولوژیکی و کشاورزی در این مدل، مدل جدیدی به نام SWAT-CUP جهت آنالیز حساسیت و واسنجی آن توسعه داده شده است (۲). در این مدل دو روش آنالیز حساسیت موضعی یا یک پارامتر در یک زمان و آنالیز حساسیت global یا سراسری وجود دارد که روش اول استفاده شده است.

مدل فرض می‌کند که رفتار هیدرولوژیکی آنها یکسان خواهد بود. با معرفی نقشه‌های مذکور حوضه به ۱۱۸ HRU تقسیم شد که این موضوع خود باعث افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها گردید. مدل SWAT مؤلفه‌های اقلیمی، هیدرولوژی، روندیابی مخازن و رودخانه‌ها، مدل رشد گیاه، درجه حرارت، خصوصیات خاک، مدیریت کشاورزی، فرسایش و مواردی از قبیل کیفیت آب سطحی و زیرزمینی را شامل می‌شود (۴). این مدل دارای یک پایگاه داده‌ای (database) جامع و قوی برای مولفه‌های مختلف مذکور می‌باشد. در این پایگاه داده‌ای تعاریف و محدوده مقادیر پارامترهای مربوط به بخش‌های مختلف مذکور مشخص گردیده و معرفی موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هواشناسی و داده‌های آنها و همچنین مدیریت‌های مختلف منابع آب و کشاورزی جاری در منطقه مورد مطالعه به مدل صورت می‌گیرد. در جدول ۴ ورودی‌های مدل SWAT نشان داده شده است. همانطور که در این جدول نیز آورده شده است داده‌های ورودی به این مدل را می‌توان به دو دسته کلی نقطه‌ای و لایه‌ای (مکانی) تقسیم‌بندی کرد. داده‌های نقطه‌ای شامل آمار و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌های هواشناسی، نقطه‌ای ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها و یا آب‌های زیرزمینی و غیره و اطلاعات مکانی شامل لایه‌های رقومی ارتفاع (DEM)، لایه کاربری اراضی و لایه نوع خاک می‌باشند. این لایه‌ها در واقع توزیع و پراکندگی مکانی مقادیر متغیرهای مورد نظر در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

بعد از تشکیل HRUها در ادامه پارامترهای مربوط به هر کدام از اجزای اصلی مدل شامل پارامترهای گیاهی (.Dat)، خاکشناسی (.Sol)، آب زیرزمینی (.Gw)، مدیریت (Mgt)، رودخانه (.Rte) بر اساس آمار و داده‌های موجود به آن معرفی می‌شوند.

#### شبیه‌سازی جریان رودخانه

رابطه بین اجزای بیلان هیدرولوژیکی در یک حوضه در مدل با

جدول ۴- ورودی‌های مدل SWAT

مدیریت آب و خاک	کیفی	خاکشناسی	توپوگرافی	پوشش زمین	اقلیمی	هیدرولوژیکی
عملیات کشاورزی (کاشت، برداشت، کوددهی و...)، آبیاری و ...	نقطه ورود آلاینده‌ها به رودخانه‌ها، غلظت نیترات‌ها و فسفات‌ها، میزان کوددهی ...	نقشه نوع خاک	لایه رقومی ارتفاع (DEM)	نقشه کاربری اراضی	بارش دما سرعت باد رطوبت نسبی ...	پارامترهای مربوط به سدها، رودخانه‌ها و ...
		نوع داده‌ها	مکانی	مکانی	نقطه‌ای	نقطه‌ای و مکانی



ایستگاه منتخب تولید گردید. که حاصل این عملیات ۳۲ اجرا از مدل‌های منتخب و سناریوهای انتشار بود. محدوده تغییرات ماهانه سری زمانی بلند مدت میانگین نتایج (ensemble) متغیرهای دما و بارش در دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۵) نسبت به دوره مشاهداتی بترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

نتایج مدل LARS-WG طی دوره آماری ۲۰۳۰-۲۰۱۵ حاکی از پیش‌بینی افزایش دمای حداقل در کلیه ماه‌ها به جز ماه دی در ایستگاه سقز، تکاب و زرینه، دی و بهمن در ایستگاه مهاباد، آذر و دی در ایستگاه بناب است و در ایستگاه مراغه در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، آبان، آذر و اسفند دمای حداقل افزایش یافته و در سایر ماه‌ها با کاهش دمای حداقل روبروست. همچنین دمای حداکثر در ایستگاه سقز در ماه‌های دی و بهمن، زرینه در ماه دی، تکاب در ماه‌های آذر، دی و بهمن و مهاباد و بناب در ماه‌های دی و بهمن کاهش یافته و در مابقی ماه‌ها افزایش یافته است. دمای حداکثر در ایستگاه مراغه در کلیه ماه‌ها افزایش داشته است. بطور کلی تغییر دما روند افزایشی دارد و این در حالی است که بالاترین افزایش برای فصل بهار و کمترین افزایش برای فصل زمستان پیش‌بینی شده است. همانگونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تغییرات متوسط بارش سالانه بین ۷/۲۴- تا ۲۶/۳+ درصد می‌باشد. به طور کلی سناریوی میانگین (ensemble) نشان‌دهنده روند افزایشی بارش بوده که بیشترین افزایش بارندگی مربوط به فصول تابستان و پاییز است. لازم به ذکر است که مقادیر منفی در این جداول نشان‌دهنده کاهش و مقادیر مثبت نشان‌دهنده افزایش می‌باشد.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

قبل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، ابتدا با انجام تحلیل حساسیت (با استفاده از نرم‌افزار SWAT CUP) پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر دبی خروجی از حوضه داشتند، مشخص شدند. نتایج این تحلیل در جدول ۷ نشان داده شده است.

در این روش با ثابت نگه داشتن کلیه پارامترها، یکی از پارامترها را در محدوده‌ای که قبلاً برای تغییرات آن تعریف شده است، تغییر داده و میزان تغییرات خروجی مدل با توجه به تغییرات در مقدار هر پارامتر مورد بررسی قرار می‌گیرد. هر پارامتری که مقدار قدرمطلق  $t$ -stat بیشتری داشته و همچنین مقدار  $p$ -value آن نزدیک به صفر باشد، تأثیر بیشتری بر متغیر مورد نظر دارد. همچنین لازم به ذکر است که در این تحقیق از روش  $sufi-2$  برای واسنجی مدل استفاده گردید که جهت ارزیابی نتایج از سه شاخص آماری ضریب تعیین  $R^2$ ، ضریب نش-ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

#### نتایج و بحث

##### تولید سناریوهای اقلیم روزانه توسط مدل LARS-WG

مراحل تولید سناریوهای اقلیمی روزانه توسط مدل LARS-WG در سه گام انجام شد. ابتدا مدل LARS-WG توسط داده‌های مشاهداتی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی ۶ ایستگاه سینوپتیک سقز، زرینه، تکاب، مهاباد، مراغه و بناب برای دوره (۱۳۸۵-۱۳۶۹) مورد واسنجی قرار گرفت سپس در مرحله صحت-سنجی توانایی مدل در شبیه‌سازی اقلیم ایستگاه‌ها بررسی شد. و در نهایت مشخصه‌های آماری داده‌های هواشناسی مشاهده شده و ساختگی برای تعیین اینکه آیا اختلاف معنی‌داری وجود دارد یا نه از طریق مقایسه دو فایل آماری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج مقایسه توزیع‌های احتمال و میانگین‌های ماهانه متغیرهای بارندگی، دمای حداقل و دمای حداکثر، نشان داد می‌توان از مدل LARS-WG برای پیش‌بینی داده‌های بارش و دما در دوره‌های آتی استفاده کرد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG، سری‌های زمانی روزانه دما و بارش در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ به صورت مستقیم با استفاده از پیش‌بینی‌های ۱۴ مدل AOGCM گنجانده شده در مدل LARS-WG تحت سناریوهای انتشار (A2, B1, A1B) برای هر یک از ۶

جدول ۵- میانگین دراز مدت تغییرات فصلی دمای شبیه‌سازی شده طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (۲۰۱۵)

نام ایستگاه	بهار		تابستان		پاییز		زمستان	
	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
سقز	۰/۹۷	۰/۹	۰/۸۷	۰/۸۳	۰/۸	۰/۹۳	۰/۳۳	-۰/۲۳
تکاب	۰/۵	۱/۰۳	۰/۸	۰/۷۳	۰/۵	۰/۴	۰/۱۷	۰/۱
زرینه	۰/۶	۰/۹	۰/۷۷	۰/۸۷	۰/۵۳	۰/۹۳	۰/۲	۰/۰۷
مهاباد	۰/۴۷	۰/۸۳	۰/۷	۰/۷۷	۰/۶	۰/۷۳	-۰/۱۳	-۰/۳
بناب	۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۷	۰/۴۳	۰	۰/۴۷	-۰/۴۳	-۰/۳۳
مراغه	-۰/۱۳	۱/۷۳	-۱/۶	۱/۰۳	۰	۱/۵	۰/۲۳	-۰/۲۳



جدول ۶- میانگین دراز مدت تغییرات بارش شبیه سازی شده طی دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۵ نسبت به مقادیر مشاهداتی در دوره پایه (فصلی و سالانه)

نام ایستگاه	بهار		تابستان		پاییز		زمستان		تغییرات سالانه
	میلی-متر	درصد	میلی-متر	درصد	میلی-متر	درصد	میلی-متر	درصد	
سقز	۵/۶	۳/۹	۳/۴	۴۰/۵	۱۱/۴	۱۰/۳	۲/۲	۱/۲	۵
تکاب	-۱۲/۷	-۱۰/۱	۷/۴	۷۸/۷	۷/۱	۸/۱	۱۸/۶	۱۷/۷	۶/۲
زرینه	-۱۴/۶	-۱۲/۸	-۱/۶	-۱/۱	-۱۳/۴	-۹/۶	۰	۰	-۷/۲۴
مهاباد	-۳۶/۳	-۲۷	۳/۲	۴۲/۷	۱۰/۹	۸/۸	۵/۷	۳/۷	-۳/۹۴
بناب	۴/۵	۴/۳	۳/۱	۶۰/۸	-۱/۶	-۲/۵	-۰/۵	-۰/۶	۲/۱۸
مراغه	-۰/۶	-۰/۵	۳	۳۲/۹	۴۲/۸	۵۷/۱	۳۵/۸	۳۵/۱	۲۶/۳

جدول ۷- نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر t-stat و p-value مربوط به هر کدام از پارامترها

نام پارامتر	توضیحات	واحد	t-stat	p-value	محدوده نهایی پارامترها
CN2	شماره منحنی نفوذ در شرایط متوسط رطوبتی	بدون بعد	۵/۰۴	۰/۰۰۴	۶۰-۷۲
GW-DELAY	زمان تأخیر نفوذ آب به سطح ایستابی	روز	۲/۹۳	۰/۰۳	۲۰-۳۵
GWQMN	حداقل ارتفاع سطح ایستابی لازم برای خروج آب زیرزمینی	میلی متر	۲/۴	۰/۰۶	۱۰۰۰-۲۴۰۰
SOL-AWC(1)	ظرفیت آب قابل دسترس خاک در لایه سطحی	میلی متر در میلی متر	۲/۳۴	۰/۰۶۶	۰/۱۹-۰/۲۴
SMFMN	فاکتور ذوب برف برای روز ۲۱ ماه سپتامبر	میلی متر بر درجه در روز	۲/۰۸۳	۰/۰۹۱۶	۴/۵
SOL-K(1)	هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در لایه سطحی	میلی متر در ساعت	۲/۰۸۱	۰/۰۹۱۸	۷/۲۲-۱۵/۶
SOL-BD(1)	چگالی ظاهری خاک در لایه سطحی	گرم در سانتی متر مکعب	۱/۹۵	۰/۱۰۸	۱/۲-۱/۶
ESCO	ضریب جبران تبخیر خاک	بدون بعد	۱/۲۷	۰/۲۵۷	۰/۹۵
CH-N2	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	بدون بعد	۱/۲۵۹	۰/۲۶۳	۰/۰۱۳-۰/۰۱۶
GW-REVAP	ضریب تبخیر از لایه بالایی سطح ایستابی	بدون بعد	۱/۱۸۷	۰/۲۸۸	۰/۰۲

۶ ایستگاه هیدرومتری واسنجی و اعتبارسنجی گردید. در این تحقیق جهت ارزیابی شبیه سازی های مدل از سه شاخص آماری ضریب تعیین  $R^2$ ، ضریب نش- ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مجذور مربعات خطا (RMSE) (مترمکعب در ثانیه) استفاده شد. نتایج این بخش در جدول ۸ ارائه شده است.

در این جدول درجه تأثیر بعضی از پارامترهای مهم دخیل در شبیه سازی دبی خروجی از زیرحوضه ها با مقادیر p-value و t-stat آنها مشخص شده است. هر پارامتری که مقدار قدرمطلق t-stat بیشتری داشته و همچنین مقدار p-value آن نزدیک به صفر باشد، تأثیر بیشتری بر روی دبی داشته است.

پس از انجام مرحله تحلیل حساسیت، مدل با استفاده آمار ماهانه

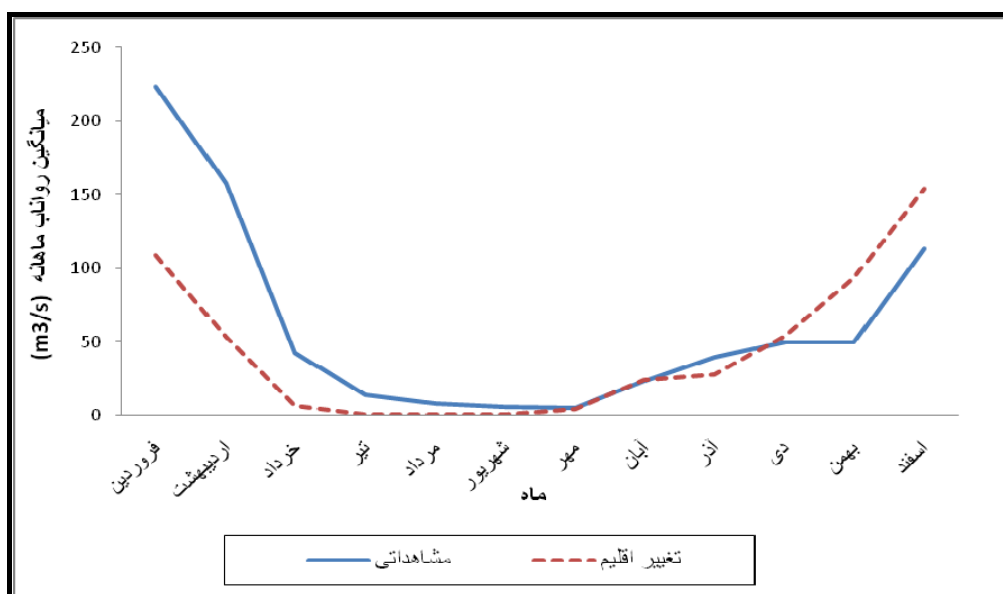
جدول ۸- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل برای هر یک از ایستگاه ها در دوره آماری مربوط

شماره ایستگاه	رودخانه	ایستگاه	دوره آماری			واسنجی			اعتبارسنجی		
			RMSE	NS	$R^2$	RMSE	NS	$R^2$	دوره آماری	RMSE	NS
۱	جیغاتوچای	پل آبیان	۱۹۸۷-۱۹۹۹	۰/۷	۰/۵	۸/۹۳	۲۰۰۰-۲۰۰۶	۰/۷۷	۰/۶۹	۱۱/۱	
۲	خرخره چای	سنه	۱۹۸۸-۱۹۹۹	۰/۶۳	۰/۶۱	۸/۶۹	۲۰۰۰-۲۰۰۶	۰/۷۲	۰/۶۶	۱۰/۵۶	
۳	ساروق چای	صفاخانه	۱۹۸۷-۱۹۹۹	۰/۶۱	۰/۵۳	۱۱/۹۶	۲۰۰۰-۲۰۰۶	۰/۵۴	۰/۵	۱۰/۰۲	
۴	زرینه رود	ورودی به سد زرینه زرینه	۱۹۸۷-۱۹۹۹	۰/۷۱	۰/۶۹	۴۷	۲۰۰۰-۲۰۰۶	۰/۶۶	۰/۶	۲۷/۵	
۵	آجرلو چای	چولوچه	۱۹۸۷-۱۹۹۷	۰/۴۹	۰/۱۴	۳/۹۱	۱۹۹۸-۲۰۰۲	۰/۶۵	۰/۴۷	۲/۰۷	
۶	زرینه رود	نظام آباد	۱۹۹۳-۲۰۰۱	۰/۷۱	۰/۶۹	۴۴/۹۴	۲۰۰۱-۲۰۰۶	۰/۵۵	۰/۵۳	۵۵/۷	

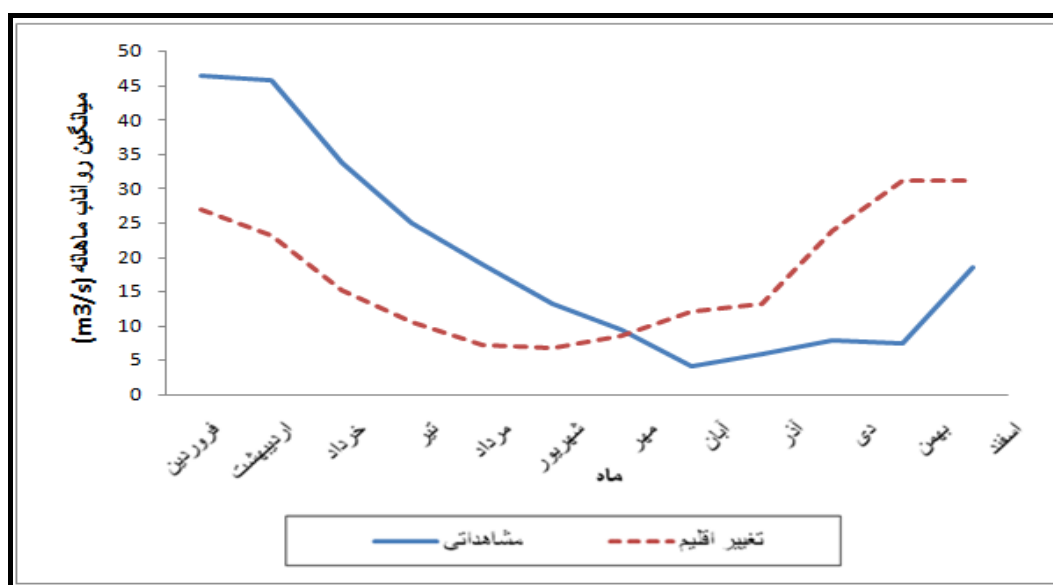
## شبیه‌سازی رواناب منطقه در دوره‌های آتی

در ادامه با معرفی میانگین سری‌های زمانی روزانه دما و بارش ریز مقیاس شده توسط مدل LARS-WG، به مدل SWAT، سری‌های زمانی ماهانه رواناب حوضه زرينه‌رود در ایستگاه‌های هیدرومتری سنته، پل آبیان، صفاخانه، ورودی سد زرينه‌رود، چوبلوچه طی دوره ۱۳۹۴-۱۴۰۹ شبیه‌سازی گردید. نمودارهای ارائه شده در شکل‌های ۴ و ۵ نشان‌دهنده افزایش رواناب در ورودی سد زرينه‌رود در ماه‌های بهمن و اسفند و کاهش آن در دیگر ماه‌ها و همچنین

افزایش آبدهی در حوضه میانی (حد فاصل سد زرينه‌رود تا بند نوروزلو) در فصول پاییز و زمستان و کاهش آن در دیگر ماه‌ها و فصول است (دو منبع اصلی تأمین آب حوضه زرينه رود). در کل نتایج نشان‌دهنده کاهش ۲۸ و ۱۶ درصدی رواناب به ترتیب در محل‌های ورودی به سد زرينه‌رود و حوضه میانی در دوره‌ی آتی نسبت به دوره‌ی پایه می‌باشد. در جدول ۹ درصد تغییرات رواناب دوره آتی نسبت به دوره پایه آورده شده است.



شکل ۴- میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی در ورودی سد زرينه رود



شکل ۵- میانگین رواناب ماهانه دوره مشاهداتی و دوره آتی در حوضه میانی

جدول ۹- میزان درصد تغییر میانگین رواناب دوره آتی نسبت به دوره پایه

محدوده مورد نظر	درصد تغییر
ورودی به سد زرينه رود	-۲۸/۴
حوضه میانی	-۱۵/۸

## جمع بندی و نتیجه گیری

همانگونه که پیشتر اشاره شد، نتایج تحقیقات انجام شده نشان داد ارزیابی اثرات تغییر اقلیم توسط منابع مختلف عدم قطعیت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در مجموع اکثر مطالعات نشان از تأثیر بالای عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژی دارد. بنابراین باید توجه داشت که استفاده تنها از یک مدل AOGCM برای تجزیه و تحلیل‌های تغییر اقلیم، نمی‌تواند تمامی محدوده عدم قطعیت‌های مربوط را پوشش داده و نتایج غیر کاربردی را به دنبال خواهد داشت. از طرف دیگر ارجحیتی بین عملکرد مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی اقلیم وجود نداشته به عبارت دیگر می‌بایست از تعداد حداکثری آنها در مطالعات استفاده کرد. از طرفی به کارگیری حداکثری این مدل‌ها باعث شده حجم محاسبات به طور فزاینده‌ای بالا رود. از این رو در این مطالعه اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه زرينه رود طی دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ با استفاده از میانگین نتایج ۱۴ مدل AOGCM گنجانده شده در مدل LARS-WG تحت سناریوهای انتشار (A2، B1، A1B) مورد مطالعه قرار گرفت که تغییرات بارندگی و درجه حرارت به عنوان دو متغیر معرف اقلیم بررسی شد. مطابق جدول ۵ میانگین نتایج کوچک مقیاس شده متغیر درجه حرارت حاصل از شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM در دوره ۲۰۱۵-۲۰۳۰ افزایش متوسط این متغیر نسبت به دوره پایه را نشان داد. افزایش دما نامطلوب‌ترین اثر تغییر اقلیم را که افزایش خشکی در منطقه است به همراه خواهد داشت. همچنین

## منابع

- ۱- مرکز آمار و اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی، تهران، ایران. ۱۳۹۰.
- 2- Abbaspour K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J. and Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333: 413-430.
- 3- Arnold J.G., Srinivasan P., Mutiah R.S. and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modelling and assessment. Part I. Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 73-89.
- 4- Arnold J.G., and Fohrer N. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3): 563-572.
- 5- Barrow E., Hulme M. and Semenov M.A. 1996. Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Clim Res* 7:195-211.
- 6- Bolin B.R. 1986. The greenhouse effect, climate change and ecosystems. *SCOPE Rep.*, 29, 541pp.
- 7- Cao L., Zhang Y. and Shi Y. 2011. Climate change effect on hydrological processes over the Yangtze River basin. *Quaternary International*, 244: 202-210.
- 8- Doblas-Reyes F.J., Hagedorn R. and Palmer T.N. 2006. Developments in dynamical seasonal forecasting relevant to agricultural management. *Clim Res* 33:19-2.

- 9- Gosling S.N., Taylor R.G., Arnell N.W. and Todd M.C. 2011. A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, 279–294.
- 10- Hooghoudt S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. *Versl. Landbouwkd. Onderz.* 46:515-707 .
- 11- IPCC. 2007. *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.*
- 12- IPCC. 2010. Stocker Th, Dahe Q, Plattner G.K, Tigner M, Midgley P. IPCC Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. National Center for atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- 13- Jones R.N. and Page C.M. 2001. Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquarie River Catchment, In: *Integrating Models for Natural Resources Management across Disciplines, issues and scales (part 2)*, eds. Ghassemi, F., Whetton, P., Little, R. and Littleboy, M., pp. 673-678. Modsim 2001 International Congress on Modeling and Simulation, Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand, Canberra.
- 14- Jung W., Moradkhani H. and Chang H. 2012. Uncertainty assessment of climate change impacts for hydrologically distinct river basins. *Journal of Hydrology*, 466–467: 73–87.
- 15- Kundzewicz Z.W., Mata L.J., Arnell N.W., D'oll P., Kabat P., Jim'enez B., Miller K.A., Oki T., Sen Z. and Shiklomanov I.A. 2007. *Freshwater resources and their management. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Parry, M. L. Canziani O. F. Palutikof J. P. van der Linden P. J. and Hanson C. E. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173–210, 2007.
- 16- Merritt W.S., Alila Y., Barton M., Taylor B., Cohen S. and Neilsen D. 2006. Hydrologic response to scenarios of climate change in subwatersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *Journal of Hydrology* 326, 79-108.
- 17- Najafi M.R., Moradkhani H. and Jung I.W. 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrol. Process.* 25 (18), 2814–2826.
- 18- Nakicenovic N. and Swart R. 2000. *Emissions scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.
- 19- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R. and Williams J.R. 2011. *Soil and water assessment tool theoretical document (version 2009)*, Texas water resource institute technical report.
- 20- Palmer T.N., Doblas-Reyes F.J., Hagedorn R. and Weisheimer A. 2005. Probabilistic prediction of climate using multimodel ensembles: from basics to applications. *Philos Trans R Soc B* 360:1991–1998.
- 21- Racsco P., Szeidl L. and Semenov M. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecol Model* 57:27–41.
- 22- Richardson C.W. and Wright D.A. 1984. WGEN: a model for generating daily weather variables. Report No. ARS-8, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- 23- Semenov M.A. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agric For Meteorol* 144:127–138.
- 24- Semenov M.A. and Stratonovitch P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41: 1-14.
- 25- Solomon S., Qin D., Manning M., Marquis M. and others (eds). 2007. *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge.
- 26- Wilks D.S. 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate changes studies. *Clim Change* 22: 67–84.
- 27- Wilks D.S. and Wilby R.L. 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Prog Phys Geogr* 23: 329–357.
- 28- Wilby R.L. and Harris I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.* 42, W02419.



## Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in Zarrinehrud Basin Using SWAT Model

B. Mansouri<sup>1\*</sup>- H. Ahmadzadeh<sup>2</sup>- A. Massah Bavani<sup>3</sup>- S. Morid<sup>4</sup>- M. Delavar<sup>5</sup>- S. Lotfi<sup>6</sup>

Received:27-05-2014

Accepted:29-09-2014

### Abstract

This paper evaluate impacts of climate change on temperature, rainfall and runoff in the future Using statistical model, LARS-WG, and conceptual hydrological model, SWAT. In order to the Zarrinehrud river basin, as the biggest catchment of the Lake Urmia basin was selected as a case study. At first, for the generation of future weather data in the basin, LARS-WG model was calibrated using meteorological data and then 14 models of AOGCM were applied and results of these models were downscaled using LARS-WG model in 6 synoptic stations for period of 2015 to 2030. SWAT model was used for evaluation of climate change impacts on runoff in the basin. In order to, the model was calibrated and validated using 6 gauging stations for period of 1987-2007 and the value of  $R^2$  was between 0.49 and 0.71 for calibration and between 0.54 and 0.77 for validation. Then by introducing average of downscaled results of AOGCM models to the SWAT, runoff changes of the basin were simulated during 2015-2030. Average of results of LARS-WG model indicated that the monthly mean of minimum and maximum temperatures will increase compared to the baseline period. Also monthly average of precipitation will decrease in spring season but will increase in summer and autumn. The results showed that in addition to the amount of precipitation, its pattern will change in the future period, too. The results of runoff simulation showed that the amount of inflow to the Zarrinehrud reservoir will reduce 28.4 percent compared to the baseline period.

**Keywords:** Climate Change, Zarrinehrud Basin, LARS-WG, AOGCM, Runoff, SWAT

1,3- M.Sc. Graduated and Associate Professor, Department of Water Engineering, Abouraihan Collage, University of Tehran

(\*- Corresponding Author Email: b\_mansouri84@ut.ac.ir)

2- PhD Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

4,5- Professor and Assistante Professor, Department of Water Resources Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University

6- M.Sc. Graduated of Irrigation and Drainage Engineering, Water Resources Group, Water Management Office, Ministry of Energy, Tehran, Iran