



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل چهاردهم / تابستان ۱۴۰۲ / صفحات: ۱-۲۶

DOI: 10.30488/CCR.2023.394308.1127

## پهنه‌بندی خطر سیلاب تحت تاثیر تغییرات اقلیمی با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قره‌سو، استان گلستان)

صالح آرخی<sup>۱\*</sup>، سمیرا گرکز<sup>۲</sup>، سمیه عمادالدین<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه گلستان، رشته مخاطرات محیطی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۱۷

### چکیده

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی پهنه سیل در شرایط تغییر اقلیم براساس سناریوهای پنجمین گزارش ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در حوضه قره‌سو (استان گلستان) انجام شد. داده‌های روزانه شبیه‌سازی شده برای آینده را می‌توان به عنوان ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی لحاظ کرده و نتایج آن را در برنامه‌های بلندمدت توسعه منابع آب منظور نمود. این تحقیق شامل دو فاز اقلیمی و هیدرولوژی است. در فاز اقلیمی، داده‌های روزانه دمای حداقل، حداکثر، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد گرگان در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۰ با استفاده از مدل آماری LARS-WG شبیه‌سازی شد و پس از اطمینان از کارایی این مدل در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی مذکور در حوضه آبخیز قره‌سو استان گلستان، جهت بررسی تاثیر پدیده تغییر اقلیم بر رواناب منطقه مورد مطالعه، داده‌های سه سناریوی A2 (سناریوی حداکثر)، A1B (سناریوی حد وسط) و B1 (سناریوی حداقل) مدل HadCM3 در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ با مدل آماری LARS-WG کوچک مقیاس گردید. در فاز هیدرولوژیکی، بارش- رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT شبیه‌سازی و پس از واسنجی (از ۱ ژانویه ۲۰۱۲ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۶) و اعتبارسنجی این مدل (۳۰ دسامبر ۲۰۱۶ تا ۲۹ دسامبر ۲۰۱۸)، داده‌های دما و بارش خروجی مدل LARS-WG به مدل SWAT وارد شده و تغییرات رواناب تبعی تغییر اقلیم در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که بر اساس برآورد مدل LARS-WG برای سناریوهای مورد بررسی در دوره‌های آتی میانگین دمای حوضه آبخیز قره‌سو به میزان ۰/۵۶ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. مقدار بارش نیز در مقایسه با دوره پایه به میزان ۱۰ تا ۲۴ درصد کاهش نشان می‌دهد. در پایان نیز سیلاب حوضه مورد مطالعه با تلفیق نقشه متوسط رواناب تحت سناریو A2، فاصله از رودخانه و ضریب شکل حوضه با استفاده از روش Fuzzy-AHP در محیط GIS پهنه‌بندی شده است. با توجه به پهنه‌بندی، ۴۴ درصد در خطر زیاد و بسیار زیاد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** خطر، سیلاب، تغییرات اقلیم، مدل SWAT، GIS.

### مقدمه

برخوردار است، چرا که سیستم‌های انسانی وابسته به عناصر اقلیمی مانند کشاورزی، صنایع و امثال آن بر مبنای ثبات و پایداری اقلیم طراحی شده و عمل می‌نمایند. تغییرات معنی‌دار دمای کره زمین یا گرمایش جهانی به عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر

فرایند تغییر اقلیم به ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی می‌باشد. این پدیده به دلیل ابعاد علمی و کاربردی (اثرات محیطی و اقتصادی- اجتماعی) آن از اهمیت فزاینده‌ای

\*نویسنده مسئول: s.arekhi@gu.ac.ir

اقلیم در قرن حاضر مورد توجه قرار گرفته است (IPCC, 2007).

طبق گزارش‌های IPCC تغییر اقلیم می‌تواند باعث افزایش احتمال وقوع رخداد‌های اکستریم اقلیمی مانند سیلاب و افزایش فرکانس و شدت آن در بعضی از مناطق کره زمین شود (IPCC, 2001). یکی از نشانه‌های بارز تغییر اقلیم، پدیده‌های شدید آب و هوایی است. با توجه به روند تغییرات آب و هوا و گرمایش جهانی به وجود آمده، احتمال بارش‌های سنگین (بیش از ۳۰ میلی‌متر بر ساعت) و به تبع آن خطر سیل بر اثر سیستم زهکشی نادرست و عوامل فیزیکی و محیطی و ... افزایش یافته است (Falconer et al., 2008). چند سالی است که سیل‌ها یکی پس از دیگری و به گفته کارشناسان خیلی زودتر از دوره‌های بازگشت طبیعی به وقوع می‌پیوندند. بزرگترین سیل‌های تاریخ جهان در هزاره اخیر، اگرچه گستردگی وسیعی دارد و از کشورهای متعدد در شمال اروپا تا شرق چین را در بر می‌گیرد، اما نکته این است که در یکصد سال اخیر بیشتر سیل‌های ویرانگر جهان در کشورهای جهان سوم یا در حال توسعه به ویژه در آسیا به وقوع پیوسته و هزاران نفر را به کام مرگ کشانده است.

در زمینه سیل، تهیه نقشه خطر و آسیب‌پذیری ناشی از آن بدلیل تغییر اقلیم مطالعات بسیاری در جهان و ایران انجام شده است که می‌توان به مواردی چند از آنها اشاره نمود: Wang و Melesse (۲۰۰۵)، با ارزیابی هیدرولوژی ذوب برف با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز مینه‌سوتا شمالی نشان دادند که برای حوضه مورد مطالعه، مدل SWAT عملکرد خوبی در شبیه‌سازی متوسط دبی ماهانه، فصلی و سالانه و عملکرد رضایت‌بخش در پیش‌بینی دبی روزانه دارد. هنگامی که به تنهایی تجزیه و تحلیل‌ها را در نظر بگیریم، جریان روزانه در فصل بهار که عمدتاً از ذوب برف ایجاد شده است، می‌تواند با دقت قابل قبول پیش‌بینی شده و متناظر با میانگین ماهانه و فصلی می‌تواند به خوبی شبیه‌سازی شود. علاوه بر این، مدل یک عملکرد کلی بهتر برای ارزیابی سال‌های با توده

برف بزرگتر از آنهایی که با توده برف کوچکتر بود، ارائه کرد و تمایل به انجام نسبتاً بهتر یکی از ایستگاه‌های تست شده نسبت به دیگر ایستگاه‌ها وجود داشته است. Lutz و Fernandez (۲۰۱۰) با کمک GIS و سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره اقدام به ارزیابی و پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری در یکی از استان‌های کشور آرژانتین کردند. این دو با استفاده از پارامترهای فاصله تا کانال‌های زهکشی، ارتفاع منطقه، شیب منطقه، عمق آب زیرزمینی و کاربری اراضی کردند. ایشان با وزندهی به هر یک از این عوامل پنجگانه و به کمک سیستم تصمیم‌گیری چندمعیاره، منطقه مورد نظر خود را در پنج پهنه با خطر زیاد، خطر متوسط تا زیاد، خطر متوسط، خطر کم و خطر خیلی کم پهنه‌بندی کردند. بارش سالانه، شیب حوضه، شبکه زهکشی و نوع خاک از جمله عوامل مؤثر بر جاری شدن سیل در نظر گرفتند. میزان بارش بیشترین و نوع خاک کمترین درصد خطر را به خود اختصاص دادند. در نهایت نقشه خطر سیل را بدست آوردند. Sperotto و همکاران (۲۰۱۶) که در شهر ونیز ایتالی با انجام تحلیل ریسک منطقه‌ای RRA و مدل اقلیمی - منطقه‌ای RegCM4 تحت سناریو RCP8.5 در دوره ۲۰۴۱-۲۰۵۰ به بررسی سیلاب ناشی از تغییر اقلیم در محیط GIS پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که عامل عمده در بروز سیل تغییرات اقلیمی، به دلیل شیب و نفوذپذیری کم مناطق شهری ونیز می‌باشد. Iqbal و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شدت و فرکانس سیل در حوضه رودخانه کابل برای دو دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ و ۲۱۰۰ - ۲۰۸۱ با چهار مدل اقلیمی MIROC5، EC-EARTH، INM-CM4 و IPSL-CM5A تحت سناریو RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. برای شبیه‌سازی رواناب‌های سالانه حداکثر از مدل SWAT استفاده کردند. برای انجام تحلیل فرکانس از مدل HEC-SSP استفاده کردند. نتایج نشان از افزایش دما و بارش بود. همچنین بررسی فرکانس سیل، افزایش شدت و کاهش دوره بازگشت سیل را نشان داد که در RCP8.5 این مقادیر بیشتر از RCP4.5 بود.

چای مشکین‌شهر با استفاده از مدل منطق فازی پرداختند. برای این منظور از ۸ پارامتر شامل: تراکم پوشش گیاهی، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه، لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، ارتفاع و شیب استفاده کردند. در این مدل ابتدا تمامی لایه‌ها با فرمت رستر وارد نرم‌افزار ArcGIS شد. سپس فازی‌سازی معیارها با توجه به توابع موردنظر صورت گرفته و در مرحله بعد با استفاده از عملگردهای مختلف مدل فازی، اقدام به پهنه‌بندی سیل‌گیری حوضه موردنظر شده است. نتایج نشان داد که دره‌ها، خط‌القعرها با دامنه‌های مقعر و مناطق پایین‌دست مؤثرترین سطح سیل‌گیری حوضه بودند. حسن‌زاده نفوتی و بافقی (۱۳۹۵) به بررسی میزان پتانسیل زیرحوضه‌های آبخیز شیپور بافق در ایجاد سیلاب پرداختند. برای این منظور از لایه‌های مساحت، شیب، شیب آبراهه اصلی، تراکم زهکشی، ضریب شکل حوضه، بارندگی سالانه، کاربری اراضی و نفوذپذیری زیر حوضه‌ها استفاده کردند سپس با استفاده از AHP اقدام به وزن‌دهی لایه‌ها در GIS کردند. در نتایج زیرحوضه‌ای که به عنوان عامل اصلی خطر شناسایی شده بود، مشخص شد. محمودزاده و باکویی (۱۳۹۷) به منظور پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی شهر ساری از روش تصمیم‌گیری چند معیاره و فازی استفاده نمودند. نتایج مطالعه آنها حاکی از این است که خطر وقوع سیل در قسمت‌های مرکز و جنوب شهر ساری از بیشترین مقدار برخوردار می‌باشد. آبیل و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با انتخاب عوامل ساختاری تأثیرگذار در وقوع سیل، نقشه پهنه‌بندی خطر سیل شهر زاهدان را تهیه نمودند.

مدل‌های هیدرولوژیکی چهارچوبی را برای ارزیابی رابطه مابین هواشناسی، فعالیت‌های انسان و منابع آب فراهم می‌کنند (Jothityangkoon et al., 2001). این مدل‌ها به سه دسته تجربی یا جعبه سیاه، مفهومی یا خاکستری و مدل‌های با مبنای فیزیکی توزیعی یا جعبه سفید تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول این مدل‌ها بصورت واضح قوانین فیزیکی فرایندها را لحاظ نکرده و فقط با تابع تبدیلی، ورودی را به خروجی

آشفته و مساح‌بوانی (۱۳۸۹) تأثیر تغییر اقلیم را بر دبی‌های حداکثر حوضه آیدوغموش بررسی کردند. ابتدا مقادیر دما و بارش ماهانه مدل HADCM3 را تحت سناریوی A2 برای حوضه فراهم نموده و با استفاده از روش کوچک مقیاس نمایی مکانی تناسبی و عامل تغییر داده‌ها را برای حوضه مورد مطالعه ریزمقیاس نمودند. نتایج حاکی از افزایش ۱/۵ تا ۴ درجه‌ای دما و تغییرات ۳۰ تا ۴۰ درصدی بارندگی دوره ۲۰۶۹-۲۰۴۰ نسبت به دوره مشاهداتی ۱۹۷۱-۲۰۰۰ داشت و شدت دبی‌ها حداکثر برای دوره بازگشت‌های تا ۵۰ سال تفاوت چندانی نکرده بود اما با افزایش دوره بازگشت شدت آن در دوره آتی افزایش یافته بود. در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل SWAT به تغییرات رژیم رودخانه گاماسیاب تحت سناریوهای تغییر اقلیم پرداخته شد. نتایج نشان داد، رژیم جریان رودخانه تحت سناریوهای مختلف تغییر خواهد کرد. شدت این تغییرات در آینده نزدیک کم و هر چه به سمت پایان قرن حاضر پیش رویم، بیشتر خواهد شد (Zare Zadeh et al., 2018). (Maghsood et al., 2019) اثرات تغییر اقلیم بر فراوانی سیل تحت سناریوهای گزارش پنجم در شمال ایران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان بارش سالانه در آینده نزدیک، بیش از ۲۰٪ افزایش می‌یابد و این افزایش به احتمال زیاد منجر به افزایش جریان دبی اوج خواهد شد. مزیدی و خوش‌روش (۱۳۹۵) تأثیر تغییر اقلیم بر فراوانی سیل حوضه گرگانرود با استفاده از آنالیز مرتبه اول مدل هیدرولوژیکی بارش رواناب استفاده کردند. برای بررسی تغییر اقلیم دو سناریو برای تغییرات تعریف کردند: سناریو اول ۲۵ درصد افزایش در میانگین و انحراف استاندارد عمق بارش منطبق بر توزیع گامبل و سناریو دوم افزایش ۵۰ درصدی عمق بارش می‌باشد. مقایسه منحنی فراوانی سیل نشان می‌دهد که با وجود کاهش بارش در آینده، بارش‌های حدی با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهند داد که نشان از افزایش سیلاب در دوره‌های آینده است. قنواتی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری حوضه خیاو

توسط بشر، میزان مداخله بشر در طبیعت بیشتر گردیده و در اغلب موارد این بهره‌برداری به شکل بهره‌برداری ناپایدار از منابع طبیعی همراه بوده که این مسائل در دراز مدت ریسک وقوع سیلاب را بالا برده است. پهنه‌بندی خطر سیلاب در واقع ابزاری اساسی برای مدیریت کاهش خطرات سیل است و وسیله‌ای قانونی در دست دولت و مسئولان برای کنترل و مدیریت کاربری اراضی و برنامه‌های توسعه همزمان با کاهش خطرات سیل و حفاظت محیط زیست است. با تعیین مناطقی که ریسک بالای سیل دارند، می‌توان از توسعه در این مناطق جلوگیری کرد و یا در صورت نیاز به توسعه در این مناطق از ابتدا راهکارهای مدیریتی برای ساخت‌وساز در این بخش‌ها لحاظ شود.

با توجه به موارد ذکر شده و اهمیت پیش‌بینی این روند برای تشخیص خطر (به منظور جلوگیری از عواقب سیل مانند سرریز شدن سدهای موجود در حوضه، خسارت‌های جانی و مالی و ...)، در این تحقیق سعی می‌شود تا تأثیرات تغییر اقلیم بر روی رژیم هیدرولوژیکی حوضه آبریز و وضعیت سیلاب‌های آن در آینده مورد بررسی قرار گیرد. مدل اقلیمی HADCM3 تحت سناریوهای A1B1، A2 و B2 و مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG و پس از آن از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) برای آنالیز خطر و رتبه‌بندی آن‌ها، برای این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. نقشه‌های پتانسیل سیل‌خیزی حاصل شده می‌توانند ابزار مناسبی برای برنامه‌ریزی‌های منقله‌ای در آینده باشند. بنابراین، اهداف این تحقیق به شرح زیر می‌باشد: (۱) شبیه‌سازی رواناب حوضه آبخیز قره‌سو با استفاده از مدل فیزیکی SWAT، (۲) پهنه‌بندی خطر سیلاب حوضه آبخیز قره‌سو با استفاده از مدل FUZZY-AHP.

### مواد و روش‌ها

**معرفی منطقه مورد مطالعه:** حوضه آبخیز قره‌سو با مساحتی معادل ۱۸۱۳ کیلومتر مربع در دامنه‌های

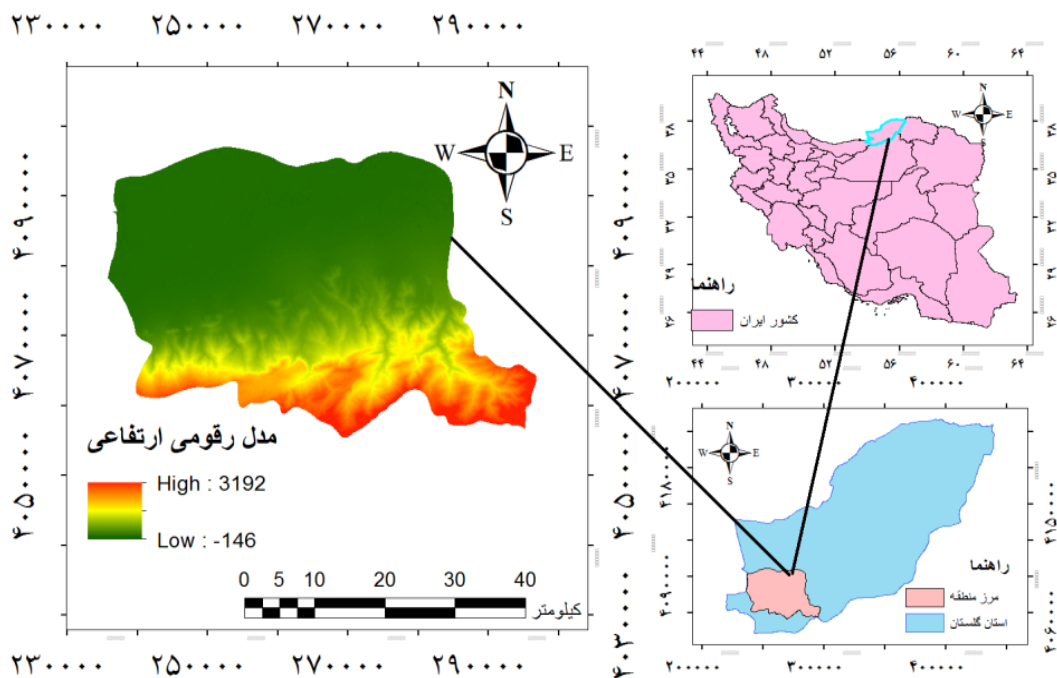
ارتباط می‌دهد. دسته دوم مدل‌های مفهومی که مبتنی است بر مطالعات محدود فرآیندهای موجود در سامانه هیدرولوژی حوضه آبریز، در مقایسه با مدل‌های توزیعی با پایه فیزیکی، شکل‌گیری آنها بر اساس تمام فرآیندهای فیزیکی نبوده ولی مبتنی است بر درک رفتار سامانه طراح مدل. دسته سوم مدل‌های با مبنای فیزیکی توزیعی می‌باشند که در این مدل‌ها تلاش می‌شود همه فرآیندهای موجود سامانه هیدرولوژی موردنظر از طریق اعمال معانی فیزیکی ارائه گردد. بدین ترتیب، با درک فرآیندهای فیزیکی رویداد بارش، پیش‌بینی رفتار سامانه تحت هر شرایط ممکن می‌گردد. در این نوع مدل‌ها، به دلیل تعیین رفتار سامانه بر پایه فرآیندهای فیزیکی و خصوصیات مشاهداتی سامانه، از دیدگاه تئوری امکان تامین داده‌های ورودی مورد نیاز مدل مستقیماً از طریق اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و صحرایی وجود دارد (Moore et al., 1988).

مدل‌های فیزیکی تا حدود زیادی مشخصات مهم زمین از قبیل: مدل رقوم ارتفاع، شیب زمین، پوشش زمین و نوع خاک و همچنین مشخصات آب و هوایی شامل توزیع بارش، درجه حرارت و تبخیر و تعرق را در نظر می‌گیرند. زیرا که پارامترهای مدل مستقیماً به این عوامل بستگی دارد. مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی در تفسیر و پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم و تغییر کاربری بر جریان بسیار اهمیت دارند (Andersen et al., 2001; Calder et al., 1995). در این تحقیق ما از مدل توزیعی ارزیابی آب و خاک<sup>۱</sup> برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه در حوضه آبریز قره‌سو و پهنه‌بندی خطر سیل استفاده کرده‌ایم.

سیلاب، یکی از پدیده‌های پیچیده و مخرب طبیعی است که هر ساله خسارت‌های فراوانی را به دنبال دارد. در ایران به دلیل وسعت زیاد، اقلیم متعدد، تراکم زمانی و مکانی بارش‌ها در اکثر حوضه‌های آبریز همه ساله سیلاب‌های عظیمی در اکثر نقاط کشور رخ داده است. از دیگر سو به دلیل رشد روز افزون بهره‌برداری از منابع آب و خاک و دیگر منابع طبیعی

1. SWAT: Soil and Water Assessment Tool

حوضه آبخیز قره‌سو ۵ درصد و طول رودخانه اصلی حدود ۱۰۸ کیلومتر برآورد شده است. بر اساس اقلیم نمای آمبرزه آب و هوای بخش عمده‌ای از محدوده مورد مطالعه، مرطوب معتدل و نیمه‌معتدل می‌باشد که به تدریج از نواحی غربی به نواحی شرق و جنوب‌شرقی حوضه، اقلیم نیمه‌خشک معتدل و نیمه‌خشک سرد و در شرقی‌ترین نواحی حوضه آب و هوای خشک سرد، حاکم است. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز قره‌سو در استان گلستان را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نقشه موقعیت حوضه آبخیز قره‌سو در استان گلستان و ایران

بین روابط بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده) و متغیرهای سطحی محلی (پیش‌بینی شده‌ها) است. در واقع پیش‌بینی شده‌ها به‌عنوان تابعی از پیش‌بینی کننده‌ها مطرح می‌شوند. در فرمول ۱ رابطه کلی مربوط به ریزمقیاس نمایی آماری نشان داده شده است.

$$(1) \quad R=f(L)$$

در این رابطه،  $R$  متغیر پیش‌بینی شده و  $L$  متغیر پیش‌بینی کننده است.  $F$  تابعی برای  $L$  بوده که براساس روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری برقرار می‌شود. جهت اجرای مدل LARS-WG دو فایل

شمالی البرز شرقی واقع است و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۲ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۳۷ درجه عرض شمالی و ۵۴ درجه و ۲ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد. از جنوب به ارتفاعات شمالی البرز و از شمال به دشت ترکمن صحرا و بالاخره از طرف غرب به خلیج گرگان محدود می‌گردد. بلندترین نقطه حوضه (قله پیرگردکوه) با ارتفاع ۳۲۰۴ متر از سطح دریای آزاد در جنوب شرق و پست‌ترین منطقه آن با ارتفاع ۱۴۶- متر در شمال غرب حوضه در سواحل دریای خزر واقع شده است و متوسط شیب

داده‌های پایه مورد استفاده در این تحقیق جهت واسنجی و اجرای مدل آماری ریزمقیاس گردانی شامل دمای حداقل، حداکثر، بارش و ساعات آفتابی ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد گرگان در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی می‌باشد. در این تحقیق سه سناریو انتشار A2، A1B و B1 مدل HadCM3 در دوره آماری ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ با کمک داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه سینوپتیک هاشم‌آباد گرگان، ریزمقیاس شد. در مدل‌های آماری علاوه بر داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، داده‌های دیدبانی شده نیز مورد نیاز است. در واقع زیر مقیاس نمایی آماری، شامل توسعه روابط

محیط GIS به صورت رستر (Grid) استفاده در مدل SWAT قرار گرفتند. شکل ۲ مراحل انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

**مدل اقلیمی و سناریوی انتشار:** در حال حاضر از روش‌های مختلفی برای تولید سناریوی اقلیمی در دوره‌های آتی استفاده می‌شود. این روش‌ها عبارتند از: تولید سناریوهای مصنوعی، استفاده از داده‌های گذشته متغیر اقلیمی منطقه و استفاده از مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو که بعد از این در این متن به آن AOGCM اطلاق می‌شود (مساح بوانی، ۱۳۸۵). در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو می‌باشد (Wilby, Mitchell, 2003; AOGCMs. (and Harris, 2006 ابزاری معتبر برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیم و تهیه ورودی‌های مدل هیدرولوژیکی می‌باشند.

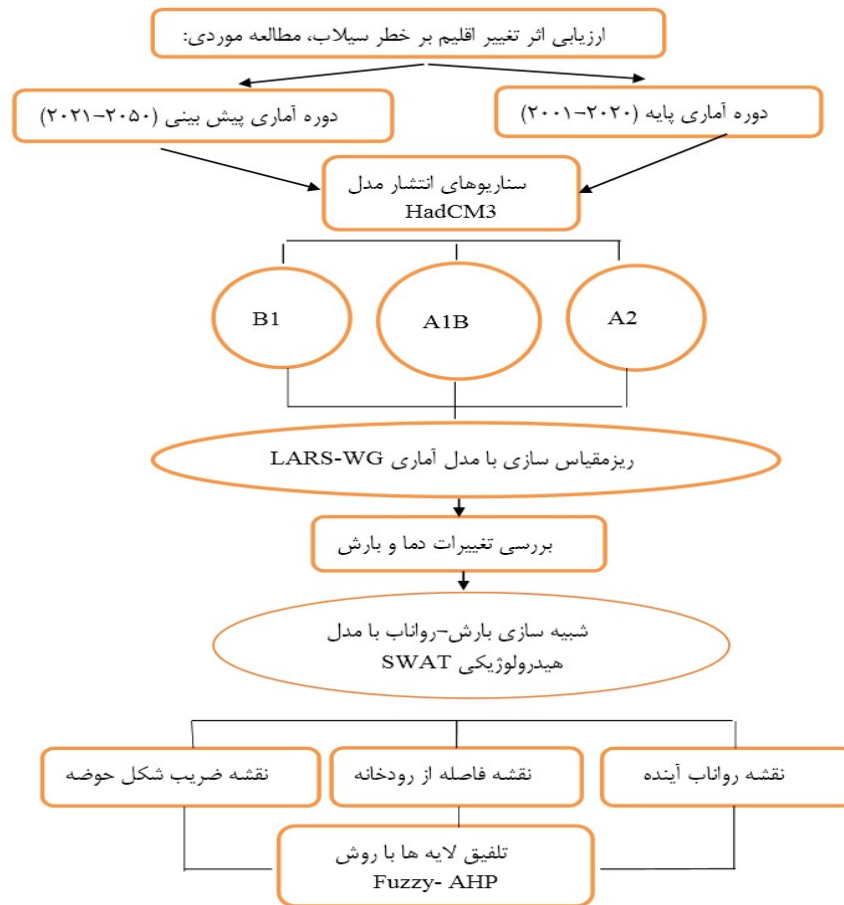
اخیراً تحقیقاتی در باره اثرات تغییرات اقلیم بر رواناب سطحی بوسیله ترکیب نمودن خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی و مدل‌های هیدرولوژیکی انجام شده است (Jiang, 2007; Wilby and Harris, 2006). اولین اقدام مقتضی برای ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی حوضه آبخیز نیاز به شبیه‌سازی مدل‌های AOGCM در مقیاس حوضه آبخیز است. در این تحقیق برای شبیه‌سازی آینده (۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰) از خروجی‌های مدل HadCM3 زیر مجموعه‌ای از چهارمین گزارش ارزیابی (AR4) IPCC از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم هادلی انگلستان (Hadley Centre Coupled Ocean-Atmosphere Model) با قدرت تفکیک اتمسفری  $2/5 \times 3/75$ ، تحت سناریوی انتشار A2 از مجموع سناریوهای SRES استفاده می‌شود. در این سناریو از رشد زیاد جمعیت و وابستگی کمتر به پیشرفت سریع اقتصادی با دیدگاه منطقه‌ای در جهت تعیین میزان گازهای گلخانه‌ای استفاده شده است (IPCC-TGCI, 2007).

ورودی تهیه شد که یکی شامل نام، مختصات جغرافیایی، و ارتفاع ایستگاه اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی می‌باشد و فایل دیگر شامل داده‌های هواشناسی ورودی به مدل که به ترتیب از سال کم به زیاد مرتب شده و محتوی سال، شماره روز ژولینوسی، حداقل دما، حداکثر دما، بارش و ساعات آفتابی روزانه می‌باشد که در این تحقیق داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک گرگان به عنوان داده‌های هواشناسی ورودی به مدل معرفی شده و مدل در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ اجرا شد.

### روش تحقیق

در پژوهش حاضر برای نقشه پهنه‌بندی خطر سیل در اثر تغییرات اقلیمی از سه نقشه فاصله از رودخانه، ضریب شکل حوضه و متوسط رواناب حداکثر در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ استفاده شده است. برای پیش‌بینی متغیر دما و بارش آینده از مدل HadCM3 تحت سناریو A2 با مدل LARS-WG ریزمقیاس گردانی شده‌اند، و پیش‌بینی رواناب روزانه در دوره آینده از مدل SWAT استفاده شده است. برای تکمیل نقشه‌ها از خروجی‌های مدل SWAT شامل ساخت خطوط آبراهه از نقشه که DEM، تقسیم‌بندی زیرحوضه‌ها و رواناب هر زیرحوضه که سایر اطلاعات نقشه‌های خاک، کاربری و بارش ... در آن دخیل هستند، استفاده شده است. در نهایت لایه‌ها با الحاقیه AHP باهم ترکیب شده و نقشه نهایی خطر سیل در اثر تغییر اقلیم حاصل شده است.

داده‌های مورد نیاز برای واسنجی مدل SWAT عبارت‌اند از توپوگرافی، آب و هوا، پوشش گیاهی، خاک و داده‌های مدیریتی. اطلاعات توپوگرافی به صورت مدل ارتفاع رقومی (DEM) و نقشه خاک منطقه به مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ (اندازه پیکسلها  $50 \times 50$ ) از مؤسسه حفاظت خاک و آبخیزداری جهاد کشاورزی تهیه گردید. نقشه کاربری اراضی منطقه نیز از تصاویر ماهواره‌ای استخراج شد. این اطلاعات بعد از پردازش در



شکل (۲): مراحل روش تحقیق

داده‌های روزانه آینده به صورت مصنوعی و داده‌سازی در بازه‌های زمانی یا در ایستگاه‌های فاقد آمار به کار می‌رود. فرآیند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی توسط مدل در سه مرحله صورت می‌گیرد که در ادامه به صورت خلاصه بیان می‌گردد:

**الف) واسنجی مدل:** در این مرحله داده‌های مشاهداتی روزانه (بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش) و مختصات جغرافیایی ایستگاه مورد مطالعه به مدل معرفی می‌شود. پس از آن داده‌های مشاهداتی به منظور تعیین مشخصه‌های آماری آن‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند (Chen et al., 2013).

**ب) اعتبارسنجی مدل:** نرم‌افزار LARS-WG به منظور پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی به بررسی آماری داده‌های مشاهداتی می‌پردازد تا پارامترهای آماری نظیر میانگین، انحراف معیار و واریانس این سری از داده‌های موجود تعیین شوند. سپس بر اساس

ریزمقیاس نمائی مدل‌های اقلیمی: یکی از محدودیت‌های عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آنهاست که به لحاظ مکانی و زمانی با دقت مورد نظر مدل‌های هیدرولوژیکی مطابقت ندارد. روش‌های مختلفی جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از سناریوهای اقلیمی مدل‌های AOGCM وجود دارد که به این روش‌ها، ریزمقیاس نمائی گفته است. در این مطالعه، از مدل ریزمقیاس نمائی LARS-WG استفاده گردید که یکی از مدل‌های مشهور در این ارتباط می‌باشد.

مدل LARS-WG یکی از مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوایی است که برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود (Semenov and Barrow, 1997). مدل LARS-WG با هدف تولید

توسط مدل هستند.  $\mu_x$  و  $\mu_y$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در جامعه آماری و  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \mu_y)^2}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

**مدل بارش - رواناب SWAT:** مدل‌های زیادی برای ارزیابی هیدرولوژیکی حوضه وجود دارند که توسط مدیران منابع آب، تصمیم‌گیرنده‌ها و محققین بکار می‌روند. این مدل‌ها کمک بزرگی در تخمین و تعیین کیفیت تأثیر بر رواناب از یک برنامه توسعه خاص ایجاد می‌کنند. مدل‌های پیوسته جریان می‌توانند درک بهتری از پاسخ هیدرولوژیکی حوضه آبخیز در اثر تغییرات اقلیم و تغییر پوشش گیاهی ناشی از آن ایجاد کنند. مدل‌های حوضه آبی را می‌توان براساس نحوه مواجهه با مولفه‌های مکانی مربوط به هیدرولوژی حوضه به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود. مدل‌های توده‌ای<sup>۲</sup> کل حوضه را بدون احتساب تغییرات مکانی در فرآیندها، ورودی، شرایط مرزی، یا ویژگی‌های هیدرولوژیکی حوضه، به عنوان یک واحد یکپارچه در نظر می‌گیرند. در مقابل، مدل‌های توزیعی با حل معادلات حاکم برای هر پیکسل در شبکه حوضه، تغییرات مکانی را نیز لحاظ می‌کنند (Wood et al., 1988).

در این تحقیق برای ارزیابی بیلان آبی حوضه آبخیز از مدل SWAT استفاده شده است. مدل SWAT یک مدل فیزیکی و توزیعی است که برای پیش‌بینی اثر تغییر کاربری، تغییر اقلیم و مدیریت‌ها در حوضه‌های آبخیز بزرگ و پیچیده توسعه داده شده است (Verbeeten and Barendregt, 2007).

این مدل یک مدل فیزیکی است و به جای آنکه از معادلات رگرسیونی جهت توصیف رابطه بین متغیرهای ورودی و خروجی استفاده نماید، اطلاعات ویژه‌ای راجع

پارامترهای آماری مذکور اقدام به بازتولید داده‌های مشاهداتی می‌نماید تا بتواند توانایی نرم‌افزار را در پیش‌بینی داده‌های آینده و شبیه‌سازی آن‌ها بسنجد. به این منظور پس از بازتولید داده‌های مصنوعی و پیش از تولید داده‌های پیش‌بینی با کمک روش‌های آماری به مقایسه داده‌های مشاهداتی و مصنوعی دوره پایه می‌پردازد. برای مقایسه و تحلیل مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده از آزمون‌های  $t$ -test،  $F$ -test و  $\chi^2$ -square استفاده می‌شود (Semenov and Barrow, 2002). تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و بازتولید شده، نشان‌دهنده توانایی مدل در تولید داده‌های دوره‌های آینده است (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۲).

**ج) تولید داده‌های مصنوعی:** مدل در این مرحله برای اجرا نیاز به دو نوع اطلاعات دارد. داده‌های روزانه مشاهداتی پردازش‌شده در مرحله واسنجی (مربوط به ایستگاه مورد مطالعه) و نیز خروجی یکی از مدل‌های گردش عمومی جو. در حقیقت به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم در آینده مدل با استفاده از رفتار اقلیم در دوره پایه و کوچک مقیاس‌سازی آماری داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، پارامترهای اقلیمی آینده را در حد مقیاس منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های هواشناسی) شبیه‌سازی می‌کند (Semenov and Barrow, 2002).

**معیارهای ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG:** در تحقیق حاضر جهت ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG و اطمینان بیشتر از توانایی آن در پیش‌بینی پارامترهای آب و هوایی دما و بارش، شاخص‌های عملکردی، ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE) و مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به کار گرفته شده است. ضریب تبیین معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار برای آن برابر یک است (خلیلی، ۱۳۹۱). میانگین خطای مدل و مجذور میانگین مربعات خطا، نشان‌دهنده میزان خطای مدل می‌باشند و بهترین مقدار برای آن‌ها برابر صفر است (صداقت‌کردار و فتاحی، ۱۳۸۷). در روابط فوق  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب آمین داده مشاهداتی و شبیه‌سازی شده



می‌شود که مقدار تابع هدف به عنوان معیار اندازه‌گیری کارایی مدل، بهینه شود. پس از کالیبراسیون، اعتبار مدل با پارامترهای به دست آمده در مرحله کالیبراسیون، با استفاده از داده‌های مشاهداتی که در قسمت کالیبراسیون مورد استفاده قرار نگرفته است، سنجیده می‌شود. در صورت شبیه‌سازی قابل قبول، مدل برای کاربرد آماده است (Reynard, 2003). واسنجی اتوماتیک مدل نیاز به تغییر سیستماتیک پارامترهای غیرقطعی و بعد از شبیه‌سازی مدل نیاز به داده‌ای مشاهداتی خروجی مرتبط با داده‌های حاسباتی دارد. مهم‌ترین تابع فراهم نمودن تداخل ارتباط ما بین ورودی-خروجی، برنامه واسنجی و مدل می‌باشد.

SWAT-CUP یک برنامه بهینه‌ساز ارتباط دهنده می‌باشد که برای مدل SWAT توسعه داده شده است. با استفاده از آن واسنجی و عدم قطعیت‌ها در ارتباط با SWAT به راحتی انجام‌پذیر است (2008). (Abbaspour,

در نهایت داده‌های کوچک مقیاس شده حاصل از مدل HadCM3 به مدل بارش-رواناب معرفی شده و دامنه تغییرات رواناب حوضه قره‌سو در اثر تغییر اقلیم در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ شبیه‌سازی می‌شوند. برای ارزیابی و واسنجی مدل از شاخص‌های ضریب تعیین ( $R^2$ ) در کنار R-factor و P-factor استفاده می‌شود. کیفیت برازش با تعیین درصد مربوط به متغیرهای مشاهده شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند (P-factor) و همچنین متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین (R-factor) تعیین می‌شوند. مقدار تئوری فاکتور P بین صفر تا 1 و فاکتور R بین صفر تا بینهایت است. بهترین نتایج در شرایطی رخ خواهد داد که فاکتور P برابر با یک و فاکتور R برابر با صفر شود (Abbaspour, 2007).

**تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP):** فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی بر تجزیه مسائل پیچیده به سلسله مراتب استوار است که در رأس آن هدف کلی قرار دارد. در مرحله بعدی معیارها و زیرمعیارها قرار می‌گیرند و در پایین‌ترین رده، سلسله‌مراتب گزینه‌ها قرار دارند. بعد از تجزیه مسئله به سلسله مراتب،

به هوا، خاک، توپوگرافی، پوشش گیاهی و پوشش اراضی در حوضه آبریز دریافت می‌کند. در این مدل زیرحوضه‌ها به بخش‌های پاسخ هیدرولوژیکی (HRUs) تقسیم می‌شوند که بخش‌هایی از زیرحوضه‌ها با پوشش‌ها، مدیریت و خصوصیات خاک می‌باشد. SWAT از روش شماره منحنی اصلاح شده (USDA Soil Conservation Service, 2001) یا روش نفوذ (Green and Ampt) جهت محاسبه حجم رواناب سطحی برای هر HRU استفاده می‌کند. برای هر HRU از رابطه شماره ۲ محاسبات در مدل SWAT انجام می‌گیرد.

$$\Delta SW = \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

در این رابطه  $\Delta SW$  = آب ذخیره شده در خاک،  $R_{day}$  = بارش روزانه،  $Q_{surf}$  = رواناب سطح،  $E_a$  = تبخیر و تفرق واقعی،  $W_{seep}$  = آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می‌شود و  $Q_{gw}$  = جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه می‌باشد. این مدل به علت پیچیدگی، توزیعی بودن و لحاظ کردن اکثر عوامل مؤثر در فرایند بارش-رواناب دارای پارامترهای متعددی است که تعدادی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی عبارتند از:

- ۱) پارامترهای مهم در شبیه‌سازی فرایند ذوب برف
- ۲) پارامترهای مهم در مشخصات رودخانه‌ها
- ۳) پارامترهای مؤثر در تعیین رواناب سطحی
- ۴) پارامترهای بکار رفته جهت تعریف و شناسایی وضعیت واحدهای هیدرولوژیکی
- ۵) پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی.

برای واسنجی مدل، قسمتی از داده‌های اقلیمی و آبی مشاهداتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این ترتیب پس از ورود داده‌ها به مدل و شبیه‌سازی جریان رودخانه، اقدام به مقایسه با جریان مشاهداتی جریان رودخانه می‌گردد. در این مرحله، مقادیر پارامترها، به روشی هدفمند، آنقدر تغییر داده می‌شود که جریان شبیه‌سازی شده تا حد مطلوب به جریان مشاهداتی نزدیک گردد. اجرای مدل هنگامی موفقیت‌آمیز تلقی

بردار ویژه که در حال حاضر دقیق‌ترین روش است، استفاده می‌کند.

با وجود مزایای قابل توجه روش تحلیل سلسله مراتبی، نقایصی نیز بدان مترتب است. از آن جمله، تصمیم‌گیرندگان اغلب به علت طبیعت فازی مقایسات زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری معیارها بیان کنند، به همین دلیل در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را به جای یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند. بدین ترتیب جهت مدل‌سازی این نوع از عدم اطمینان‌ها، تئوری مجموعه‌های فازی که اولین بار توسط لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ مطرح شده بود، با مقایسات زوجی در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ترکیب و درک دقیق‌تری از فرآیند تصمیم‌گیری ارائه شد و نتایج بهتری به دست آمد. بنابراین به منظور استفاده از مزایای هر دو تکنیک فازی و AHP و نیز غلبه بر نقاط ضعف آن‌ها، Van Laarhoven و Pedrycz (۱۹۸۳) اولین بار اصول منطق فازی را در تحلیل سلسله مراتبی بکار بردند. این روش دامنه‌ای از مقادیر را برای بیان عدم قطعیت تصمیم‌گیرندگان به کار می‌گیرد. چانگ در سال ۱۹۹۶ روش فازی-تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) را ارائه نمود. خلاصه این روش شامل (۱) رسم نمودار سلسله مراتبی، (۲) مرحله تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسات زوجی (که در این مرحله نیاز به تعریف اعداد فازی و طیف‌های فازی است)، تشکیل ماتریس مقایسه زوجی با به‌کارگیری اعداد فازی، (۳) محاسبه اعداد فازی برای سطرهای ماتریس، (۴) محاسبه درجه بزرگی اعداد فازی نسبت به همدیگر، (۵) محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها (در صورت وجود) در ماتریس‌های مقایسه زوجی و (۶) محاسبه بردار وزن نهایی می‌باشد.

عناصر سطوح مختلف به صورت دوتایی با هم مقایسه می‌شوند (Saaty, 2000). سپس بر اساس میزان ارجحیت دو معیار، ارزش‌گذاری صورت می‌گیرد (علیجانی و همکاران، ۱۳۸۴). تحلیل سلسله مراتبی ۴ مرحله دارد:

- ۱- ایجاد درخت سلسله‌مراتبی: انتخاب معیارها و عوامل مؤثر بر هدف
- ۲- مقایسه زوجی: مقایسات زوجی توسط گروه کارشناس خبره و نرم‌افزار Expert-Choice انجام می‌شود. در این مرحله با توجه به عوامل مؤثر، ماتریس وزن جهت مقایسه تشکیل، و عوامل مؤثر دوجه‌دو با هم مقایسه می‌گردند. تمام مقایسات در تحلیل سلسله‌مراتبی به صورت زوجی انجام می‌پذیرد. در این مقایسه‌ها، تصمیم‌گیرندگان از قضاوت شفاهی استفاده می‌نمایند. این قضاوت‌ها در سال ۲۰۰۰ توسط ساعتی<sup>۳</sup> به مقدار کمی بین صفر الی ۹ تبدیل شده است (جدول ۱).
- ۳- نرمال‌سازی و تعیین اولویت‌ها: برای تعیین میزان تأثیر عامل، از مفهوم نرمال‌سازی<sup>۴</sup> و میانگین موزون استفاده می‌شود. یعنی گزینه‌های مختلف بر اساس نتایج به دست آمده از نظر هر معیار با هم مقایسه شده و سپس توسط میانگین وزنی، نرمال می‌گردند. بدین صورت اولویت هر گزینه به دست می‌آید.
- ۴- محاسبه وزن یا میزان اثربخشی هر یک از عوامل: روش‌های مختلفی برای به دست آوردن میزان تأثیر و وزن هر عامل ارائه شده است که اهم آن‌ها عبارت‌اند از: روش حداقل مربعات، روش حداقل مربعات لگاریتمی، روش بردار ویژه و روش تقریبی شامل جمع سطرها، جمع ستون‌ها و روش میانگین هندسی. نرم‌افزار Expert-Choice از روش

۳. Saaty

۴. Normalization

جدول (۱): مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت) شفاهی
۹	کاملاً ارجح
۷	ارجحیت خیلی زیاد
۵	ارجحیت زیاد
۳	ارجحیت نسبتاً زیاد
۱	ارجحیت یکسان
۲ و ۴ و ۶ و ۸	ترجیحات بینابینی

سیل همچون سایر پدیده‌های طبیعی نتیجه تأثیر متقابل عوامل گوناگون است. برای پهنه‌بندی خطر سیل یک منطقه، بایستی میزان تأثیر هر یک از عوامل در وقوع آن تعیین شود، از میان روش‌هایی که تاکنون به کار گرفته شده است، روش‌های کمی به دلیل تجزیه و تحلیل دقیق‌تری که از میزان نقش عوامل مختلف در وقوع سیل دارند، نتایج بهتری را ارائه می‌نمایند.

### نتایج و بحث

ارزیابی مدل LARS-WG: با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE)، ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهده شده) موجود در دوره پایه، انجام شد (جدول ۲). نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های واقعی دوره پایه را نشان می‌دهد. چنانچه در جدول مشاهده می‌شود، مقدار ضریب تعیین در همه موارد از میزان قابل توجهی برخوردار می‌باشد و نزدیکی این مقدار به یک، دقت مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

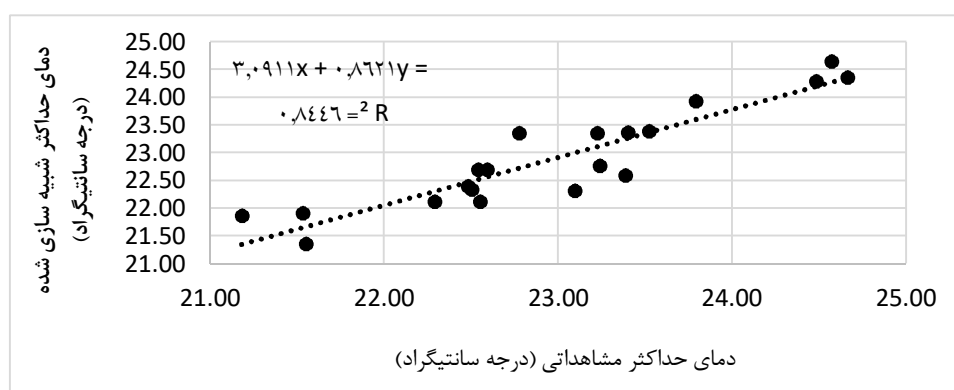
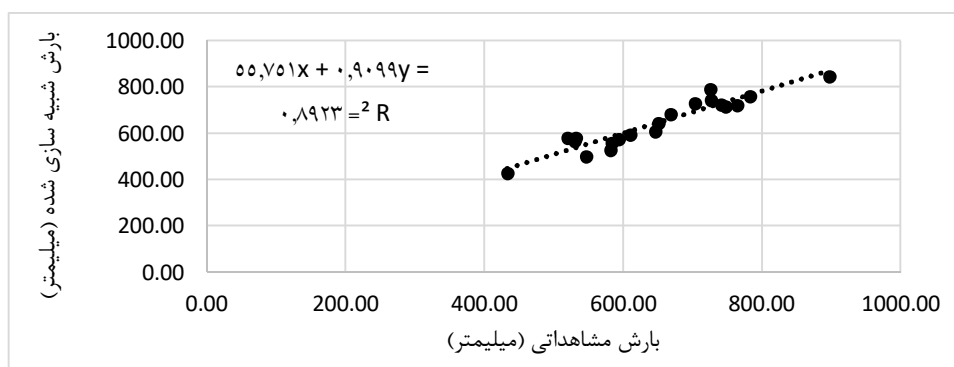
**روش فازی:** مفهوم منطق فازی اولین بار توسط دکتر لطفی‌زاده استاد دانشگاه کالیفرنیا در مقاله‌ای با عنوان "مجموعه‌های فازی"، در سال ۱۹۶۵ ارائه گردید. منطق فازی یک منطق چند مقداری است، یعنی پارامترها و متغیرهای آن، علاوه بر اختیار اعداد ۰ یا ۱، می‌توانند تمامی مقادیر بین این دو عدد را نیز اختیار کنند. تعلق هر عضو مجموعه مرجع به یک عضو زیرمجموعه خاص، به صورت قطعی نیست یعنی با قاطعیت نمی‌توان گفت که عضو مورد نظر متعلق به این مجموعه هست یا نه. این عدم قطعیت با نسبت دادن یک عدد بین ۰ و ۱ به این عضو انجام می‌گیرد. اگر این عدد برابر صفر باشد می‌توان با قطعیت گفت که عضو مورد بحث متعلق به آن مجموعه نبوده و اگر این عدد ۱ باشد می‌توان ادعا کرد که عضو مورد بحث متعلق به آن مجموعه است. به این ترتیب می‌توان زیرمجموعه‌های یک مجموعه فازی را با نسبت دادن عددهای ۰ و ۱ به هر عضو مجموعه بازنمایی کرد. هدف از ارائه مجموعه‌های فازی ایجاد روشی نوین در بیان عدم قطعیت‌ها و ابهامات روزمره است. این نظریه از زمان ارائه تاکنون گسترش و تعمق زیادی یافته و کاربردهای گوناگونی در زمینه‌های مختلف برای آن از جمله علوم زمین متصور شده است.

جدول (۲): مقادیر آماره‌های واسنجی جهت ارزیابی مدل Lars-WG در دوره پایه (۲۰۰۱-۲۰۲۰)

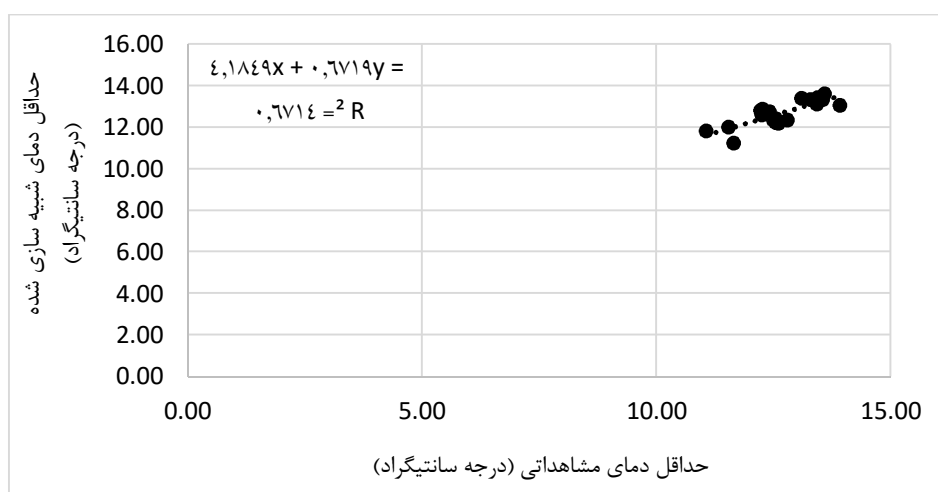
پارامترهای آماری	بارش (mm)	دمای حداقل ( $^{\circ}\text{C}$ )	دمای حداکثر ( $^{\circ}\text{C}$ )
MAE	۴/۶۰	۰/۱۷	۰/۲۶
RMSE	۶/۸۰	۰/۴۱	۰/۵۱
$R^2$	۰/۸۹	۰/۸۴	۰/۶۷

می‌باشد که موید انطباق نسبی و قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده دوره پایه است. لذا با توجه به این موارد، قابلیت و توانایی مدل در داده‌سازی مورد تایید قرار گرفت و پس از آن شبیه‌سازی داده‌ها برای دوره آینده صورت گرفت.

شکل‌های ۳ تا ۵، مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه هاشم‌آباد گرگان برای پارامترهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر را نشان می‌دهد. همان گونه که این نمودارها نشان می‌دهند، مقادیر ضریب تعیین برای تمامی متغیرهای اقلیمی بالاست. همچنین مقادیر شاخص‌های خطاسنجی در جدول ۲، نیز نسبتاً پایین



شکل (۴): مقایسه دمای حداکثر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

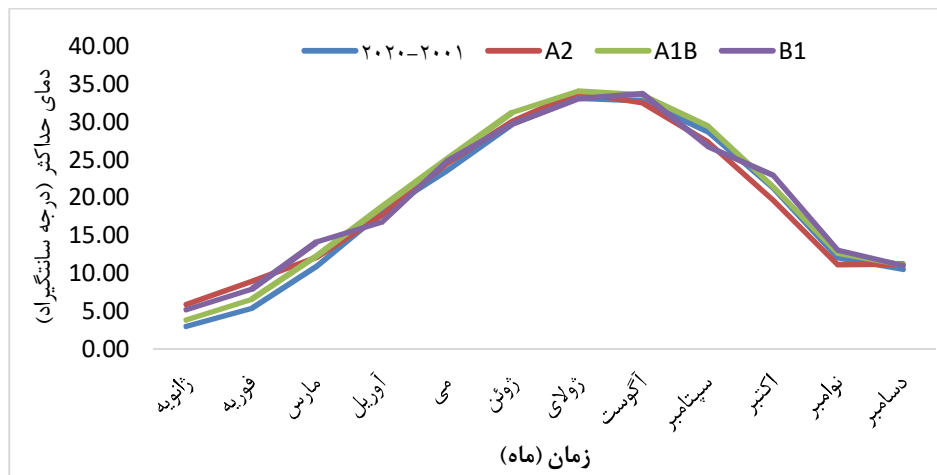


شکل (۵): مقایسه دمای حداقل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده

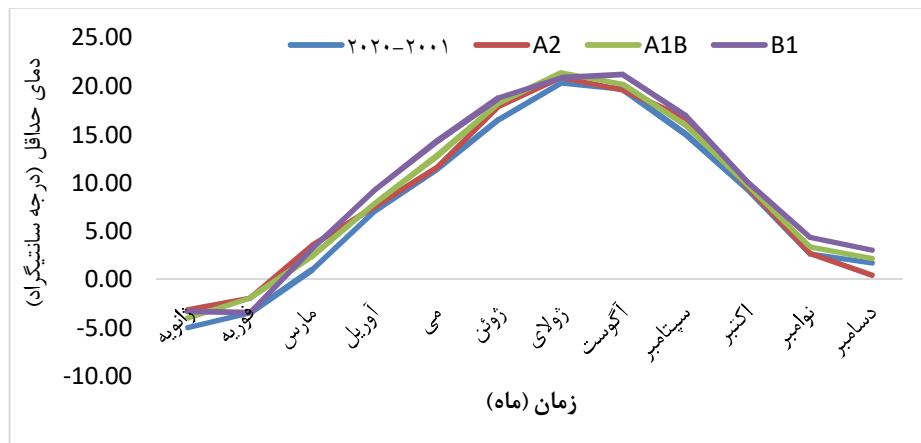
و میانگین مدل فوق تحت سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته شد.

شکل‌های ۶ و ۷، روند تغییرات دمای حداکثر و حداقل را در دوره پایه و آتی تحت سه سناریو نشان می‌دهند. در این اشکال به خوبی نتایج ذکر شده قابل رویت می‌باشد. طبق نمودارهای بالا، دمای حداقل و حداکثر در تمامی ماه‌های سال افزایش می‌یابد. افزایش دما با افزایش تبخیر و تعرق و تاثیرگذاری روی ذوب برف می‌تواند پیامدهای متعددی در بیلان حوضه داشته باشد.

نتایج ریز مقیاس کردن و تولید داده برای دوره آینده: پس از تعیین سناریوها و مدل‌های اقلیمی موردنظر، تولید داده برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ انجام شد و پس از آن خروجی‌های مدل برای هر متغیر اقلیمی (درجه حرارت حداقل، درجه حرارت حداکثر و بارش) به صورت ماهانه میانگین‌گیری شد. در ابتدا از داده‌های اقلیمی تولید شده توسط مدل اقلیمی HADCM3 تحت سه سناریو B1, A1B و A2 میانگین‌گیری صورت گرفت



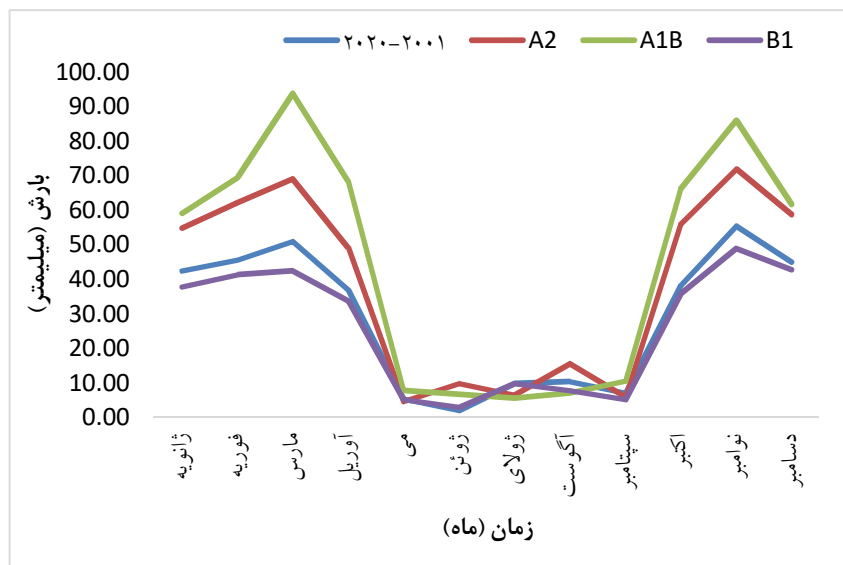
شکل (۶): دمای حداکثر دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو



شکل (۷): دمای حداقل دوره پایه و دوره آینده تحت سه سناریو

انتهای فصل سرد جابه‌جا می‌شود. همچنین کاهش بارش در انتهای فصل پاییز و ابتدای فصل زمستان خطری جدی در اثر تغییر اقلیم برای منطقه می‌باشد.

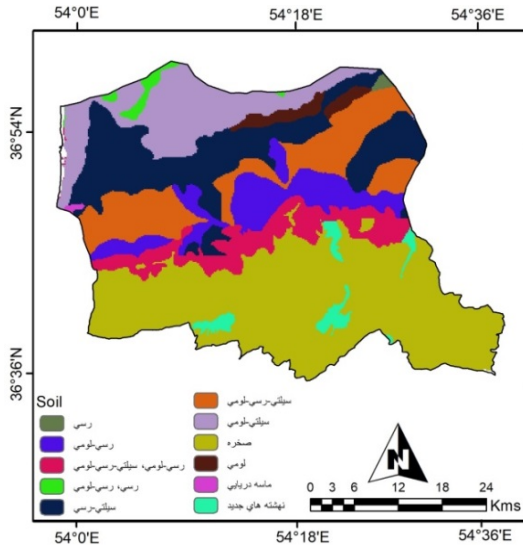
شکل ۸، نمودار بارش در دوره پایه و دوره آتی تحت سه سناریو و در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. طبق این شکل در رفتار و الگوی بارش تغییراتی مشاهده می‌شود. به طوری که ماکزیمم بارش به



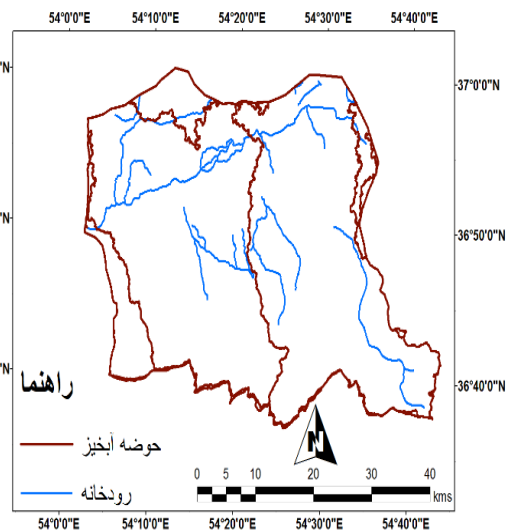
شکل (۸): بارش شبیه سازی شده تحت سه سناریو و مشاهداتی

واحد پاسخ های هیدرولوژیکی کاربری، خاک و شیب به ترتیب ۱۰، ۵ و ۱۰ درصد تعریف شد. همچنین باند ارتفاعی برای تشکیل hrus ۵۰۰ متر در نظر گرفته شد. در نهایت حوضه با ۷۸ hrus تشکیل شد. شکل ۱۳ حاصل ترکیب نقشه‌ها با شرایط فوق را نشان می‌دهد. در مرحله بعد اطلاعات دما و بارش ۲۰ ساله در ایستگاه منتخب حوضه از سال ۲۰۰۱-۲۰۲۰ به مدل معرفی شد و از نزدیک‌ترین ایستگاه سینوپتیک منطقه (هاشم‌آباد گرگان) برای فایل wgn استفاده شد. بعد از وارد کردن پارامترها برای مدل، مدل آماده اجراست. در این تحقیق چهار سال اول (۲۰۰۱ تا ۲۰۰۴) برای دوره آماده‌سازی گرم کردن مدل استفاده شد. شبیه‌سازی به صورت روزانه انجام گرفت. کالیبراسیون مدل با پنج سال (۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶) برای واسنجی و سه سال (۲۰۱۶ تا ۲۰۱۸) برای صحت‌سنجی در قالب نرم‌افزار SWAT و با استفاده از الگوریتم SUFI انجام پذیرفت.

**اجرای مدل SWAT:** برای شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM به محیط نرم‌افزار فراخوانده می‌شود. سپس حداقل مساحت ممکن برای تشکیل زیرحوضه‌ها تعریف می‌گردد. در این مطالعه حداقل مساحت ۵۰۰ هکتار در نظر گرفته شد. در این مرحله، محدوده حوضه آبخیز و زیرحوضه‌ها و خصوصیات فیزیکی حوضه آبخیز به وسیله مدل محاسبه می‌شود. نقشه زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها ترسیم شده توسط مدل برای حوضه آبخیز قره‌سو در شکل ۹ نشان داده شده است که شامل ۵ زیرحوضه می‌باشد. در مرحله بعد، با استفاده از نقشه خاک (شکل ۱۰)، کاربری اراضی (شکل ۱۱) و طبقات شیب (شکل ۱۲) که با استفاده از نقشه DEM در پنج طبقه از ۰-۷، ۷-۱۴، ۱۴-۲۱، ۲۱-۳۵ و بیشتر از ۳۵ درجه با استفاده از مدل SWAT در محیط ArcGIS تهیه شد، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف شدند که حاصل کار این مرحله، همان تشکیل HRU بوده است. آستانه برای تولید

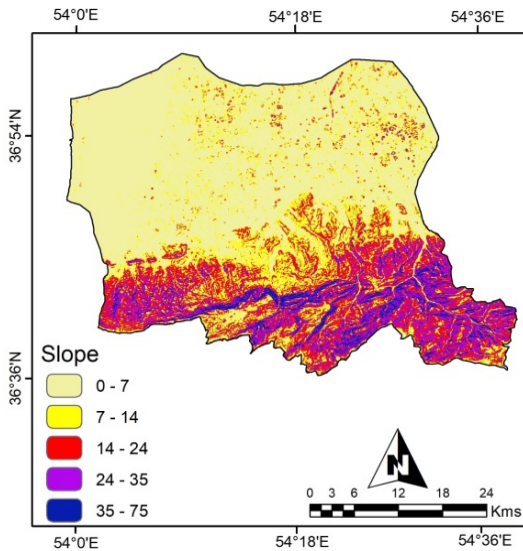


شکل (۱۱) نقشه خاک در مدل SWAT



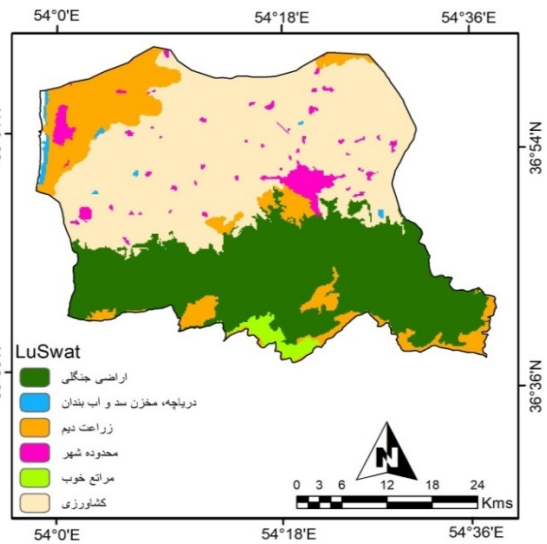
شکل (۱۰): ساختن مرز حوضه و تقسیم بندی زیرحوضه ها در

مدل SWAT

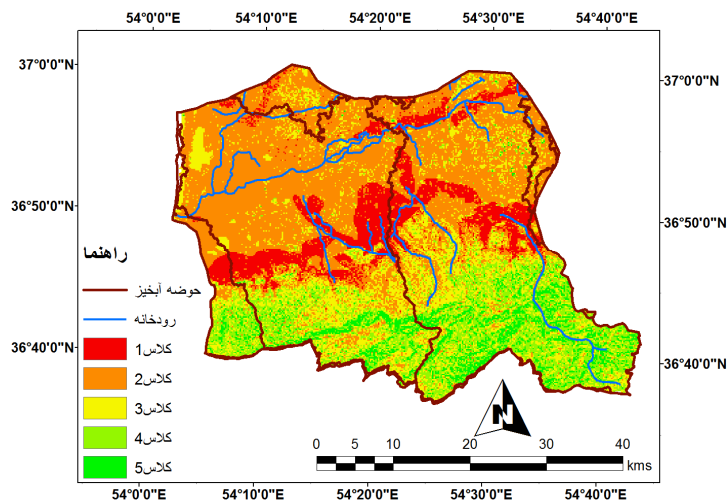


Error! No text of specified style in

SWAT در مدل (۱۳): نقشه کاربری اراضی در مدل



شکل (۱۲): نقشه شیب در مدل SWAT



شکل (۱۳): همپوشانی نقشه‌های خاک، شیب و کاربری اراضی و تشکیل hruها در مدل SWAT



SWAT انجام شده، در جدول ۳ قابل مشاهده هستند. در این جدول، ترتیب میزان تاثیرگذاری پارامترها از بالا به پایین به صورت نزولی می‌باشد که رتبه‌بندی آنها توسط دو مقدار p-value و t-state مشخص می‌شود، به این صورت که هر مقدار قدر مطلق t-state بیشتری و p-value آن نزدیک به صفر باشد، آن پارامتر تاثیر بیشتری دارد.

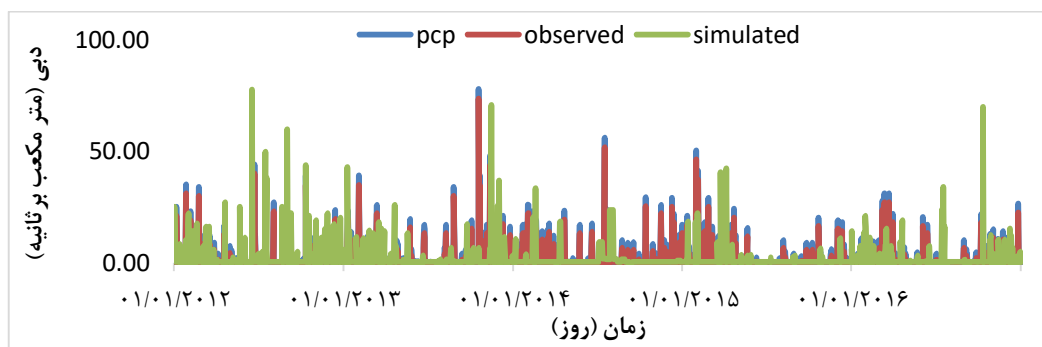
**آنالیز حساسیت:** مطالعه تغییرات کمی و کیفی پارامترهای خروجی مدل بر حسب پارامترها و اطلاعات ورودی به آن و تعیین اهمیت این پارامترها در نتایج، موضوع بحث آنالیز حساسیت می‌باشد. در آنالیز حساسیت، پارامترهای مؤثر در مدل بر حسب نقش آنها در میزان عدم قطعیت کلی مدل مرتب می‌شوند. نتایج این مرحله از محاسبات که توسط نرم‌افزار

جدول (۳): نتایج تحلیل حساسیت مدل و مقادیر p-value و t-state مربوط به هر کدام از پارامترها

ردیف	پارامتر	P-value	t-state
۱	شماره منحنی	۰/۰۶	۵/۳۵
۲	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی	۰/۱۰۳	۳/۲۹
۳	رطوبت قابل استفاده لایه های خاک	۰/۱۱۵	-۲/۴۸
۴	ضریب آلفای آب زیرزمینی	۰/۲۸۶	-۱/۶۳
۵	ضریب تبخیر خاک	۰/۲۲۲	۱/۴۶
۶	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰/۴۶۱	-۲/۴۸
۷	هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی	۰/۵۵۴	۱/۰۶
۸	نرخ تغییرات بارش در ارتفاع در هر زیر حوضه	۰/۶۶۷	۰/۹۵
۹	دمای ذوب توده برف	۰/۷۷۶	-۰/۱۱
۱۰	ضریب هدایت هیدرولیکی	۰/۸۸۲	۰/۶۶
۱۱	نرخ تغییرات دما در ارتفاع در هر زیر حوضه	۰/۸۹۶	۰/۱۶
۱۲	آب نگهداشته شده توسط پوشش گیاهی (برگاب)	۰/۹۷۱	۰/۲۸

مشاهداتی و شبیه‌سازی رواناب حوضه به همراه بارش برای دوره موردنظر نشان داده شده است. همچنین نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی مدل در جدول ۵ قابل مشاهده است.

**واسنجی مدل:** بعد از تحلیل حساسیت مدل، واسنجی آن توسط مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI با تعداد تکرار ۵۰۰ مرتبه انجام گرفت و در نهایت مقدار پارامترهای مؤثر در رواناب به صورت جدول ۴ بدست آمد. در شکل ۱۴ هیدروگراف



شکل (۱۴): مقایسه سری زمانی روزانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به همراه بارش برای دوره واسنجی ایستگاه هاشم آباد گرگان

جدول (۴) پارامترهای حساس به کار رفته در مدل SWAT، محدوده

تغییرات و مقدار بهینه آنها

ردیف	پارامتر	محدوده	مقدار بهینه
۱	شماره منحنی	۴۳-۹۳	۷۱
۲	زمان تأخیر انتقال آب از آخرین پروفیل لایه خاک به سطح آب زیرزمینی	۱۰۰-۲۸۰	۲۵۶
۳	رطوبت قابل استفاده لایه های خاک	-۰/۲ - ۰/۴	۰/۲۱
۴	ضریب آلفای آب زیرزمینی	۰/۱۵-۰	۰/۹۴
۵	ضریب تبخیر خاک	۰/۹-۱	۳/۱۸
۶	ضریب مانینگ رودخانه اصلی	۰-۰/۵	۰/۲۷
۷	هدایت هیدرولیکی مؤثر بستر رودخانه اصلی	۵-۱۵۰	۱۲۵/۴۲
۸	نرخ تغییرات بارش در ارتفاع در هر زیر حوضه	۱۰۰-۱۰۰	۱۰۰
۹	دمای ذوب توده برف	-۱- -۳	-۰/۲۶
۱۰	ضریب هدایت هیدرولیکی	۲۰۰-۰	۲/۰۱
۱۱	نرخ تغییرات دما در ارتفاع در هر زیر حوضه	-۶-۶	-۰/۶۵
۱۲	آب نگهداشته شده توسط پوشش گیاهی (برگاب)	۵-۶۰	۲۳/۵۹
۱۳	ضریب تأخیر رواناب سطحی	۱-۲۴	۷/۵۶

جدول (۵) معیارهای عملکرد مربوط به مرحله واسنجی مدل SWAT

R <sup>2</sup>	R-factor	P-factor	مقدار ارزیابی شده
۰/۷۲۹	۰/۶۳۳	۰/۵۵۴	

مقادیر رضایت بخش معرفی کرده اند. نتایج جدول فوق نشان دهنده دقت بالای مدل در برآورد رواناب در دوره واسنجی می باشد.

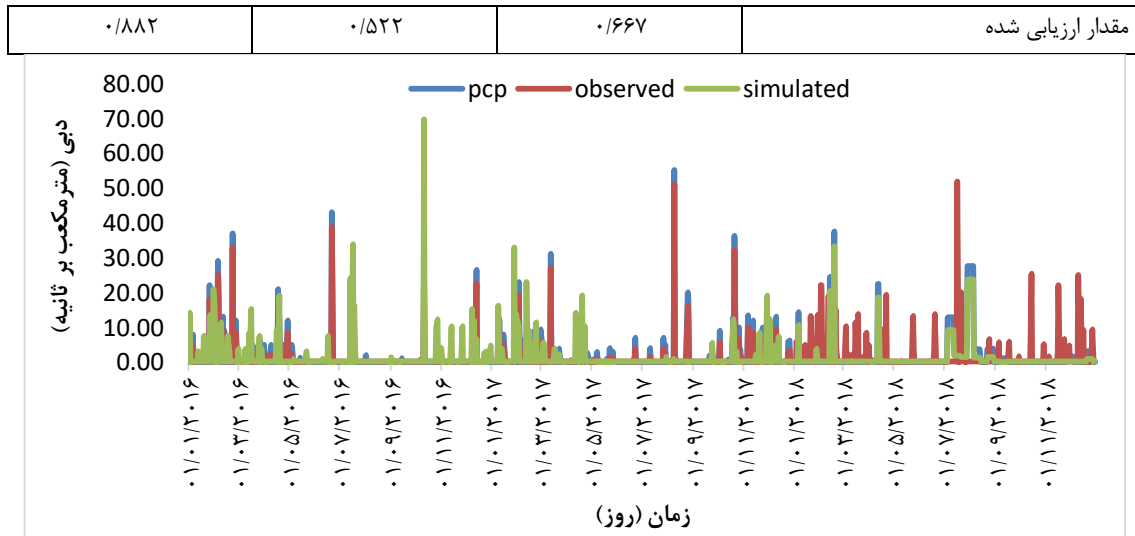
اعتبارسنجی مدل

در این مرحله با استفاده از داده‌های مدل در دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ به اعتبارسنجی مدل پرداخته خواهد شد. نتایج حاصل از ارزیابی معیارهای عملکرد در جدول ۶ ارائه شده است. مشاهده می شود که تمامی پارامترهای ارزیابی شده در محدوده مورد قبول قرار گرفته است. همچنین در شکل ۱۵ مقایسه سری زمانی روزانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به همراه بارش برای دوره اعتبارسنجی ایستگاه هاشم‌آباد گرگان نشان داده شده است.

نتایج شبیه‌سازی دبی خروجی حوضه و دبی مشاهداتی اندازه‌گیری شده توسط معیار R<sup>2</sup> و همچنین پارامترهای عدم قطعیت p-factor و r-factor مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفت. به لحاظ تئوری p-factor و r-factor به ترتیب در بازه‌های ۰ تا ۱ و ۰ تا بی‌نهایت تغییر می‌کنند. p-factor برابر ۱ r-factor برابر صفر نشان‌دهنده تطابق کامل مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهداتی است. ولی بدلیل عدم قطعیت‌های مختلف مؤثر بر نتایج خروجی، هیچ گاه این ضرایب بهینه نمی‌باشند. یکی از اهدافی که مدل SUFI دنبال می‌کند کاهش عدم قطعیت می‌باشد. به طوری که اکثر داده‌های مشاهداتی در سطح ۹۵ درصد قرار گیرند. در تحقیقات صورت گرفته ضریب r-factor بیشتر از ۰/۵ و p-factor بیشتر از ۰/۵ را به عنوان

جدول (۶) معیارهای عملکرد مربوط به مرحله اعتبارسنجی مدل SWAT

R <sup>2</sup>	R-factor	P-factor	
----------------	----------	----------	--



شکل (۱۵): مقایسه سری زمانی روزانه دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به همراه بارش برای دوره اعتبارسنجی ایستگاه هاشم‌آباد گرگان

استفاده از مدل واسنجی شده گردید. مقایسات برای ایستگاه هاشم‌آباد گرگان انجام گرفت. در جداول ۷ و ۸ درصد تغییرات سالانه و ماهانه و در شکل ۱۶ نمودار تغییرات میانگین ماهانه نشان داده شده است.

پیش‌بینی رواناب آینده با مدل SWAT: پس از اطمینان نسبی به شبیه‌سازی با استفاده از بارش و دمای آینده به دست آمده از مدل Lars-WG تحت سناریوهای اقلیمی A2، A1B و B1 در ایستگاه منتخب حوضه اقدام به شبیه‌سازی رواناب آینده با

جدول (۷) میزان مجموع رواناب سالانه و درصد تغییرات آن در دوره مشاهداتی و آینده

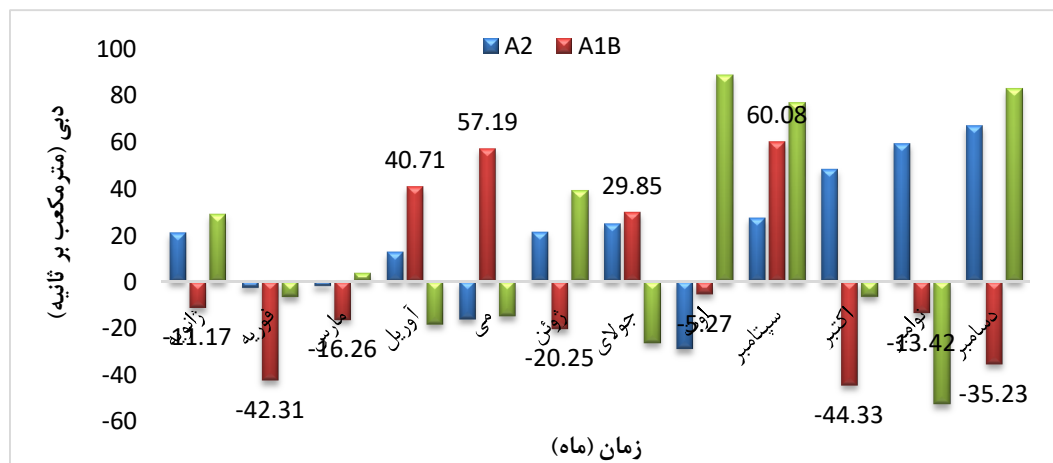
دبی (m <sup>3</sup> /s) و میزان درصد تغییرات دبی دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) مدل HadCM3						دبی دوره مشاهداتی (۲۰۲۰-۲۰۰۱)	ایستگاه هاشم‌آباد گرگان
B1		A1B		A2			
۱۶۴/۸۳	٪-۴/۲	۱۶۳/۰۳	٪-۲/۴	۱۷۸/۴۰	٪-۳/۱	۱۸۱/۲۹	

طور مستقیم با افزایش دما و افزایش بارش‌های حدی در دوره آبی مرتبط است. افزایش دما باعث افزایش نرخ ذوب برف در منطقه خواهد شد و به مرور زمان منابع آب موجود در ارتفاعات و مناطق سرد ذوب شده که منجر به سیلاب در منطقه می‌گردد.

میزان کاهش رواناب در ماه‌های گرم سال و اوایل پاییز و اواخر بهار می‌باشد. البته کاهش در فصل گرم روند یکنواخت‌تری را دنبال می‌کند. در سناریوهای مختلف استثناهایی نیز وجود دارد. در اواخر زمستان و اوایل بهار افزایش دیده می‌شود. دلیل این افزایش به

جدول (۸) درصد تغییرات میانگین ماهانه رواناب تحت سناریو انتشار در دوره مشاهداتی و آینده

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	جولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
۱۹/۷۴	۱۹/۲۹	۱۸/۱۸	۲/۱۹	۴/۹۸	۴/۹۸	۷/۴۵	۱۹/۹۶	۲۰/۰۹	۲۱/۶۰	۲۰/۲۷	۱۹/۶۹	A2
۱۷/۳۸	۱۶/۲۳	۱۶/۴۸	۴/۲۸	۴/۴۸	۳/۴۵	۴/۷۵	۱۷/۹۷	۱۸/۱۹	۲۱/۰۸	۲۰/۰۳	۱۸/۷۲	A1B
۱۷/۰۹	۱۸/۱۳	۱۳/۱۵	۴/۶۸	۳/۹۷	۴/۷۹	۵/۷۱	۱۹/۵۹	۱۹/۶۸	۲۱/۹۳	۱۸/۸۷	۱۷/۲۳	B1



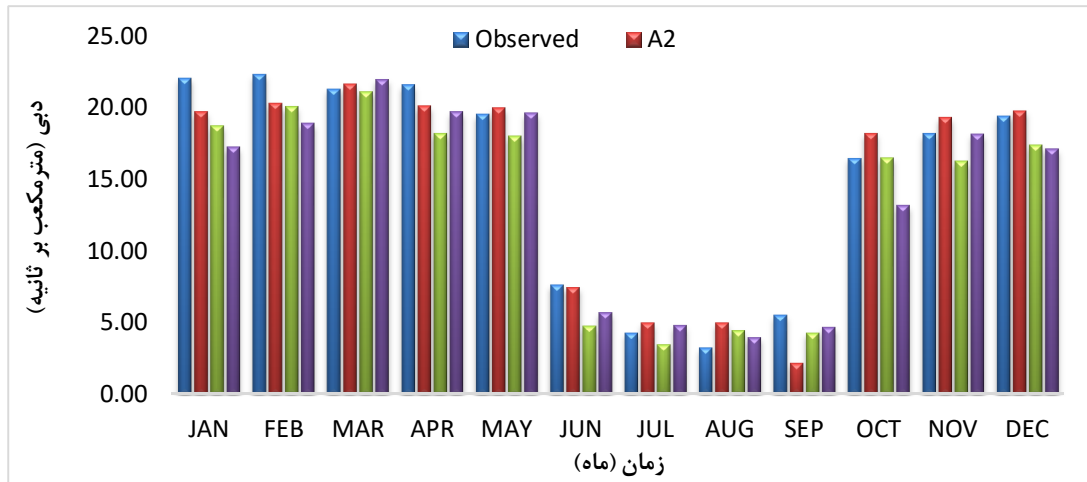
شکل (۱۶): نمودار تغییرات میانگین ماهانه رواناب تحت سناریوهای اقلیمی مختلف و مشاهداتی ایستگاه هاشم آباد گرگان

داشتن بیشترین بارش حدی معادل با  $89/2$  میلی‌متر بیشترین رواناب را به خود اختصاص داد. استثنایی که در این روند وجود داشت در سناریو A1B بود که با وجود داشتن بارش بیشتر نسبت به سناریو B1 رواناب کمتری تولید شده بود که پس از بررسی مشهود شد، این بارش‌ها در ماه‌های سپتامبر و اکتبر رخ داده‌اند که با توجه به روند افزایشی دما و کاهش بارش در این ماه‌ها به تبع رواناب کمتری نیز حاصل شده و قابل توجیه است. اکثر رواناب‌های رخ داده مربوط به اواخر زمستان و اوایل بهار (ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل) می‌باشد. به طوری که پیک در A2 در ماه مارس (اسفند ماه) رخ داده که با توجه به افزایش دما و همزمان بودن با ذوب برف در حوضه این پیک قابل توجیه است. همچنین دلیل نوسان کاهش سناریو A1B نسبت به هر دو سناریو، بیشتر بارش‌های حدی رخ داده در این سناریو در ماه‌های تابستان و پاییز بوده اما در A2 علیرغم کاهش رواناب نسبت به B1 رواناب افزایش یافته که به دلیل وقوع اثر بارش‌های جدی در ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت بوده است. شکل ۱۷ تغییرات نسبی رواناب در دوره سی ساله آینده و پایه را نشان می‌دهد.

به طور کلی افزایش بارش و رواناب‌های حدی دلیل بر پرآب شدن منطقه نمی‌باشد. علی‌رغم افزایش رواناب، دبی پایه کاهش و روزهای خشک بدلیل تبخیر بالا افزایش یافته است. از این رو افزایش رواناب نشان از افزایش وقایع حدی دارد که منجر به سیل در منطقه می‌گردد.

با بررسی تغییرات، انتظار می‌رود با افزایش سناریوها رواناب کاهش یابد که این روند در A1B با اینکه مقدار بارش حدی آن نیز افزایش داشته، کاهش یافته است و در A2 (با بارش حدی بیشتر) رواناب افزایش یافته است. دلیل این تغییر این است که رخداد بارش حدی در A1B در فصل تابستان و اوایل پاییز بوده است که با وجود تبخیر بالا و عدم ذوب برف (بر خلاف A2 که در فصل بهار همزمان با ذوب برف) رواناب کمتر از سناریو بعدی شده است. اما به طور کلی روند افزایش رواناب نسبت به دوره پایه و کاهش آنها نسبت به B1 حفظ شده است.

رواناب‌های به دست آمده از مدل SWAT تحت سناریوهای اقلیمی مختلف به صورت نزولی مرتب شدند و بیشترین مقدار رواناب در هر دوره پایه و آینده به دست آمد. نتایج نشان از افزایش رواناب در هر سه سناریو بود. با این تفاوت که در سناریو A2 به دلیل



شکل (۱۷): مقایسه متوسط رواناب مشاهداتی (۲۰۰۱-۲۰۲۰) و پیش‌بینی شده توسط مدل Lars-WG تحت سناریوهای A2، A1B و B1 در ایستگاه هاشم آباد گرگان برای دوره آینده

استفاده از روش منطق فازی در محیط ArcGIS10.8 استانداردسازی شدند. کلیه مراحل مربوط به ایجاد ماتریس‌ها و مقایسات زوجی و محاسبات مربوط به آنها در نرم‌افزار Expert Choice انجام شد و در نهایت وزن هر کدام از پارامترها به دست آمد. در شکل ۱۸ وزن نهایی معیارهای اصلی محاسبه شده در نرم‌افزار Expert Choice را نشان می‌دهد.

پهنه‌بندی خطر سیل در اثر تغییرات اقلیمی: در این تحقیق برای پهنه‌بندی خطر سیل خیزی حوضه آبخیز قره‌سو، از ۳ متغیر فاصله از رودخانه، متوسط رواناب سالانه و ضریب شکل حوضه استفاده شد. برای تعیین ضریب تأثیر هر یک از این پارامترها در سیل خیزی از مدل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد و سپس هر کدام از لایه‌ها با

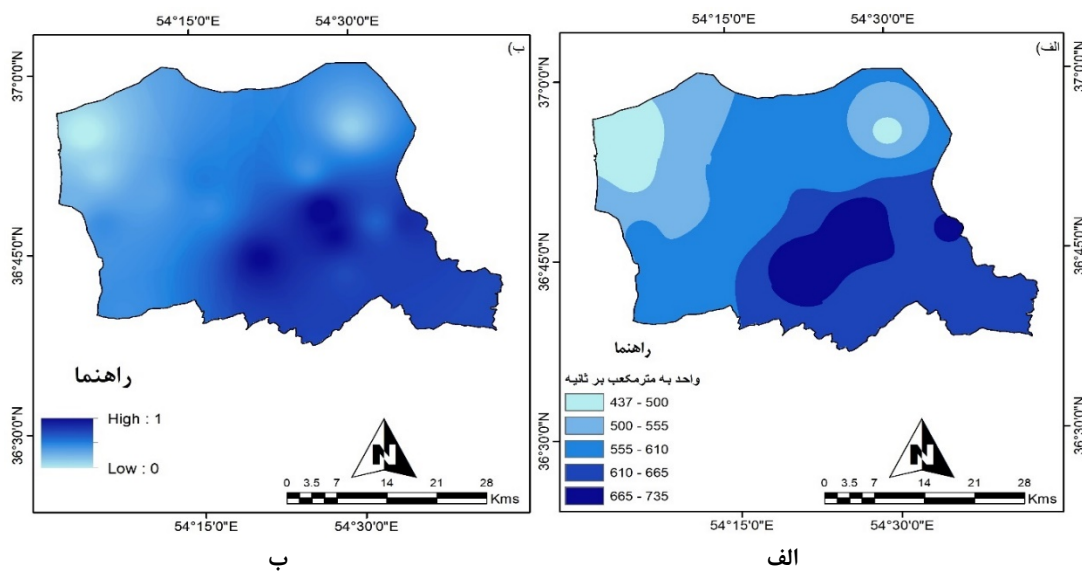


شکل (۱۸): وزن محاسبه شده معیارهای اصلی در نرم‌افزار Expert Choice

زیرحوضه خروجی از مدل SWAT حساب شده است. این نقشه در واقع حاصل ترکیب ۵ نقشه تأثیر گذار در مقدار رواناب می‌باشد. پنج طبقه‌بندی خطر از کمتر از ۵ تا بیش از ۲۰ مترمکعب بر ثانیه از رواناب شد. این نقشه مربوط به بدبینانه‌ترین سناریو یعنی A2 است، به این دلیل که مقدار دبی‌های به دست آمده در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ بیشتر و شدت دبی‌های حداکثر طبق تحلیل فرکانس سیل بیشتر رخ خواهد داد. شکل (۱۹) الف و ب)، نقشه پهنه‌بندی خطر بر اساس فقط عامل رواناب متوسط و فازی شده آن را نشان می‌دهد.

طبقه‌های موردنظر با توجه به هدف تحقیق به پنج طبقه خطر بسیار کم، خطر کم، خطر متوسط، خطر زیاد و خطر خیلی زیاد اولویت‌بندی شدند. نقشه‌های مورد استفاده در تحلیل خطر در زیر شرح داده شده است.

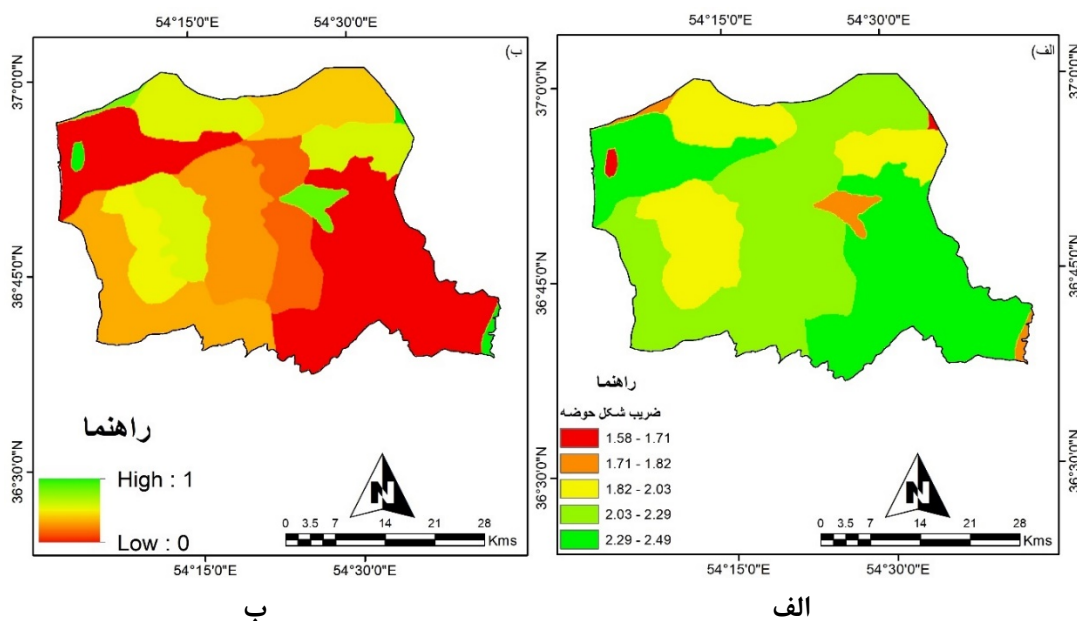
نقشه رواناب مشاهداتی: این نقشه در واقع از ترکیب نقشه‌های نوع خاک، کاربری اراضی، شیب، بارش و دما که در مدل SWAT ترکیب شده‌اند به دست آمده است. برای این منظور متوسط رواناب روزانه در هر سال طی دوره ۳۰ ساله آینده در هر



شکل (۱۹): (الف) نقشه طبقه بندی متوسط رواناب سالانه (ب) نقشه فازی شده آن

گرفت. بین مقدار ضریب فشردگی و میزان سیل خیزی رابطه معکوس وجود دارد، در نتیجه با توجه به تحلیل‌ها، طبقه‌هایی که کمترین میزان ضریب فشردگی را دارند، دارای بیشترین میزان اهمیت در رابطه با خطر وقوع سیل هستند. برای ۵ زیر حوضه خروجی از مدل SWAT این ضریب حساب شد. شکل (۲۰ الف و ب)، پهنه‌بندی خطر سیل را با در نظر گرفتن تنها یک عامل (شکل زیرحوضه) و فازی شده آن را نشان می‌دهد.

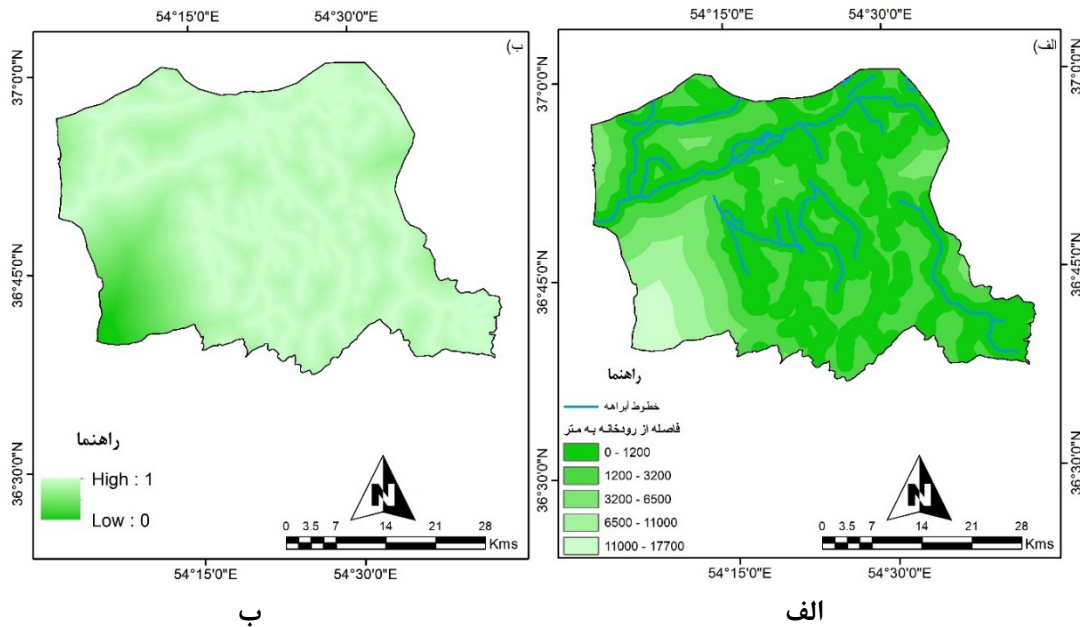
نقشه ضریب شکل حوضه (ضریب فشردگی): این ضریب ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه (برای مثال شکل هیدروگراف) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یک حوضه باریک طویل با داشتن نسبت انشعاب بالا، پیکی پایین اما ثابت را به وجود می‌آورد. در حالی که حوضه‌های گرد با نسبت انشعاب پایین، یک هیدروگراف تیز را به وجود خواهند آورد (خیری‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). برای تعیین شکل حوضه، ضریب فشردگی یا ضریب گراویلیوس مورد استفاده قرار



شکل (۲۰): نقشه طبقه بندی ضریب شکل حوضه (ب) نقشه فازی شده آن

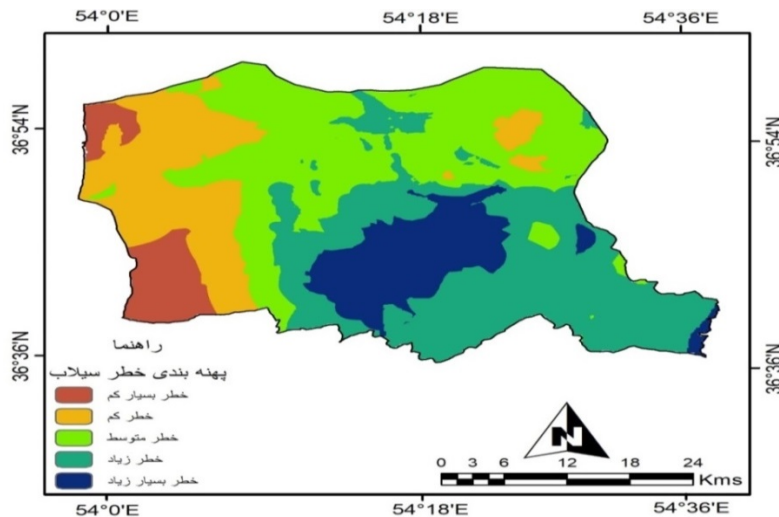
طبقه‌بندی شد. شکل (۲۱ الف و ب)، نقشه پهنه‌بندی خطر فاصله از رودخانه و فازی شده آن را نشان می‌دهد.

نقشه فاصله از رودخانه: نقشه پهنه‌بندی فاصله از رودخانه با توجه به خطوط آبراهه ترسیم شده از مدل SWAT به دست آمد. این نقشه در پنج کلاس از حدود صفر کیلومتر تا بیش از ۱۷ کیلومتر فاصله



شکل (۲۱: الف) نقشه طبقه‌بندی فاصله از رودخانه (ب) نقشه فازی شده آن

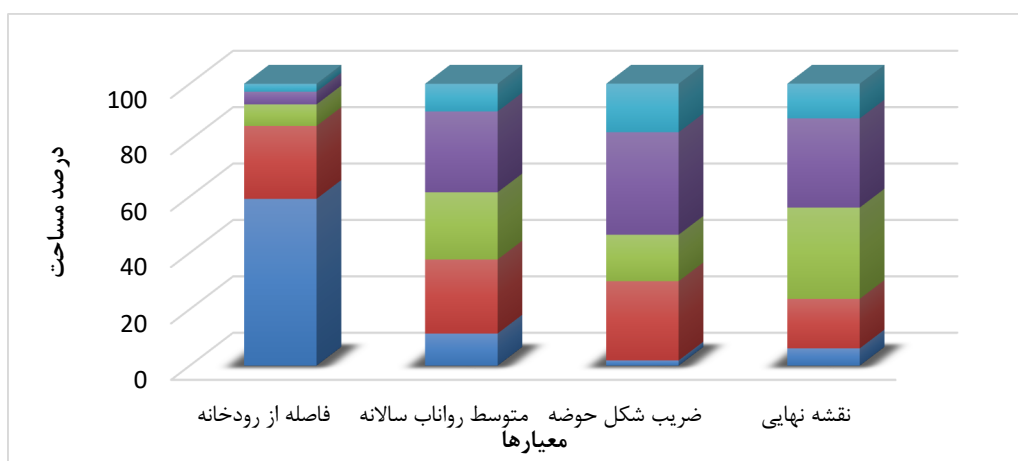
شکل ۲۲، نقشه ترکیب لایه‌ها و پهنه‌بندی خطر سیل ناشی از تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. جدول ۹ و شکل ۲۳، درصد مساحت تحت خطر را برای نقشه خطر متوسط رواناب، فاصله از رودخانه، ضریب فشردگی و نقشه نهایی خطر را نشان می‌دهد.



شکل (۲۲): نقشه نهایی پهنه بندی خطر سیلاب حوضه آبخیز قره‌سو

جدول ۹) درصد مساحت خطر هر یک از نقشه‌های تأثیر گذار و نهایی در سیل حوضه آبخیز قره‌سو

نقشه نهایی	ضریب شکل حوضه		متوسط رواناب سالانه		فاصله از رودخانه		معیار کلاس	
	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد	مساحت (کیلومتر مربع)	درصد		
۶/۱۳	۱۱۰/۹۳	۱/۸۶	۱۹/۳۹	۱۱/۴۱	۲۰۶/۹۳	۵۹/۱۶	۱۰۷۳/۱۱	خطر بسیار کم
۱۷/۵۷	۳۱۷/۷۷	۲۸/۰۹	۶۳۰/۱۸	۲۶/۲۵	۴۷۶/۱۹	۲۵/۸۵	۴۶۸/۷۲	خطر کم
۳۲/۳۸	۵۸۵/۶۵	۱۶/۴۹	۳۶۹/۸۳	۲۳/۸۳	۴۳۲/۲۵	۷/۶۵	۱۳۸/۷۷	خطر متوسط
۳۱/۶۱	۵۷۱/۶۵	۳۶/۳۶	۸۱۵/۵۲	۲۸/۶۸	۵۲۰/۱۸	۴/۵۱	۸۱/۹۶	خطر زیاد
۱۲/۳۱	۲۲۲/۵۹	۱۸/۱۹	۴۰۷/۸۵	۹/۸۲	۱۷۸/۱۵	۲/۸۲	۵۱/۱۵	خطر بسیار زیاد



شکل (۲۳): درصد مساحت خطر هر یک از نقشه‌های تأثیر گذار و نهایی در سیل حوضه آبخیز قره‌سو

اهمیتی که آب در اقتصاد ایران دارد و خرابی‌هایی که هر سال از سیلاب‌ها به بار می‌آید و آب‌هایی که بدون استفاده از کشور خارج یا به کویر سرازیر می‌شود، هنوز آنچنان که باید برنامه‌ریزی اصولی در این زمینه صورت نگرفته است. با توجه به افزایش این رخدادها و ضرورت بررسی آن نیاز به تحلیل ریسکی که حاصل از تغییر اقلیم و وقایع حدی است، برای کنترل و انجام اقدامات مدیریتی می‌باشد. یکی از راه‌هایی که می‌توان خسارات ناشی از سیلاب را کاهش داد، تعیین مناطق مولد سیلاب و اعمال روش‌های مناسب کنترل آن می‌باشد. از آنجا که امروزه یکی از مسائل مهم در پروژه‌های مهار سیلاب کشور، اولویت‌بندی حوضه‌ها برای تخصیص بودجه و عملیات سازه‌ای و غیرسازه‌ای می‌باشد، فقدان ایستگاه‌های هیدرومتری در بسیاری از زیرحوضه‌ها، تعیین میزان مشارکت زیرحوضه‌های مختلف یک حوضه آبخیز در ایجاد سیلاب خروجی را با مشکل مواجه می‌سازد. لذا بررسی پارامترهای مؤثر

با توجه به شکل از بین سه عامل، لایه فاصله از رودخانه بیشترین درصد مساحت خطر زیاد و خیلی زیاد با ۸۵ درصد را به خود اختصاص داده است. نقشه خطر نهایی نشان می‌دهد ۲۴ درصد از مساحت حوضه در خطر بسیار کم و کم، ۳۲/۳۸ درصد خطر متوسط و ۴۴ درصد در خطر زیاد و بسیار زیاد در محدوده اطراف رودخانه اصلی که روستاهای زیادی در مجاورت آن است، می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم در صد سال آینده با تغییرات قابل توجهی در الگوی بارش همراه است که به تبع آن خطرات سیل و خشکسالی را در پیش دارد. بروز سیلاب‌های سهمگین در اثر تغییرات آب و هوایی طی دهه‌های اخیر سبب بروز خسارت‌های فراوانی در نواحی مختلف دنیا شده است و در نواحی خشک تأثیر این تغییرات محسوس‌تر است. از طرفی با تمام



با مشخص شدن بحرانی‌ترین سناریو اقلیمی در وقایع حدی و دبی‌های حداکثر، پهنه‌بندی خطر سیلاب منطقه انجام گرفت. به این منظور از سه نقشه متوسط رواناب حداکثر ۳۰ ساله، ضریب شکل حوضه و فاصله از رودخانه با استفاده از رویکرد AHP تلفیق و به پنج کلاس طبقه‌بندی شدند. با توجه به پهنه‌بندی خطر سیلاب ۲۴ درصد از مساحت حوضه در خطر بسیار کم و کم، ۳۲/۳۸ درصد خطر متوسط و ۴۴ درصد خطر زیاد و بسیار زیاد در محدوده اطراف رودخانه اصلی که روستاهای زیادی در مجاورت آن است، می‌باشد.

نتایج به دست آمده به مدیران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا تدابیر لازم جهت سازگاری با خطر بارش‌های حدی و سیلاب ناشی از تغییرات اقلیمی اتخاذ نمایند و اقدامات لازم را جهت مهار سیلاب در محدوده حوضه (به ویژه در پهنه‌های با خطر بالای وقوع سیل) مانند کاهش شیب به صورت پلکانی در قسمت‌های مختلف حوضه (که در سرعت رواناب تاثیر مستقیم دارد) ساماندهی بستر آبراهه اصلی، آبخیزداری، سازه‌های سیل‌بند و مانند آن می‌تواند خطرات وقوع سیلاب‌های آینده را به حداقل رساند. با نتایج این تحقیق می‌توان مناطق مستعد سیل را اولویت‌بندی کرد و در مقابل وقایع حدی متأثر از تغییر اقلیم سازگاری‌های لازم را انجام داد تا شاهد خسارت‌های ناشی از آن نباشیم. نتایج این تحقیق نیز همانند سایر تحقیقات پیشین، این موضوع را تصدیق می‌کند که تغییر اقلیم امری جدی است، لذا دولت، سازمان‌ها، مراکز آموزشی بایستی در جهت اقدامات مناسب نسبت به از بین بردن و یا کاهش اثرات ناشی از تغییر اقلیم همت ورزند.

در بروز سیل در زیرحوضه‌ها از طریق مدل‌هایی نظیر سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره در تعیین نقش هر یک از زیرحوضه‌ها در بروز سیلاب راهگشا است. از این رو در این تحقیق به بررسی اثر تغییر اقلیم بر سیلاب و پهنه‌بندی خطر سیل در حوضه آبخیز قره‌سو پرداخته شد. به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش حوضه از مدل HADCM3 به عنوان مدل منتخب AOGCM و سه سناریوی انتشار A2، A1B و B1 از سری سناریوهای گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم و مدل ریزمقیاس‌سازی آماری Lars-WG برای دوره آینده ۲۰۲۱-۲۰۵۰ استفاده شد. بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی دما نشان دهنده افزایش دمای حداقل و حداکثر متوسط سالانه نسبت به دوره پایه می‌باشد. بیشترین افزایش دما مربوط به سناریوی A2 می‌باشد. نتایج بارش نیز کاهش متوسط سالانه برای ایستگاه هاشم‌آباد گرگان را پیش‌بینی کرد. با تبدیل بارش پیش‌بینی شده در دوره آینده به رواناب توسط مدل SWAT دبی آینده ایستگاه هاشم‌آباد گرگان در دوره‌های آبی مشخص شد و نتایج افزایش متوسط دبی سالانه را نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت این افزایش رواناب بیانگر عدم خشکسالی منطقه نیست و مرتبط با دبی‌های حداکثر حوضه می‌باشد، زیرا اکثر دبی‌های روزانه صفر در فصول گرم و خشک هستند و با وقایع و بارش‌های حدی افزایش می‌یابند. به عبارتی سال‌های خشک متمادی زیادی در این دوره ۳۰ ساله وجود دارد که در برخی از سال‌ها با افزایش شدت وقایع حدی دبی‌های حداکثری ایجاد می‌شود که گاهی با همراه شدن با ذوب برف در منطقه دبی‌های سیلابی زیانباری را ایجاد می‌کنند.

## منابع

۱. آبیبل، ابوالفضل، طاوسی، تقی، خسروی، محمود. ۱۳۹۸. تحلیل مناطق بالقوه در معرض مخاطره سیلاب شهری (مطالعه موردی: شهر زاهدان)، فصلنامه جغرافیا و توسعه. سال ۱۷. شماره ۵۴، صص ۹۱-۱۰۶.
۲. آقاشاهی، م.، اردستانی، م.، و هـ فهمی. ۱۳۹۲. تغییر اقلیم در دریاچه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده محیط‌زیست. دانشگاه تهران.
۳. حسن‌زاده‌نقوتی، محمد، خواجه‌بافقی، حبیب‌اله. ۱۳۹۵. پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره (مطالعه موردی: حوضه

13. Andersen, J., Refsgaard, J.C. and Jensen, K.H. 2001. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin—model construction and validation. *Journal of Hydrology* 247, 200–214.
14. Ashofteh, P. and Massah Bouani, A.R. 2010. Impact of Climate Change on Maximum Discharges: Case Study of Aidoghmouth Basin. *East Azerbaijan. JWSS*. 14(53), 28-38. (In Persian).
15. Calder, I.R., Hall, R.L., Bastable, H.G., Gunston, H.M., Shela, O., Chirwa, A. and kafundu, R. 1995. The impact of land use change on water resources in sub-Saharan Africa: a modelling study of Lake Malawi. *Journal of Hydrology* 170, 123–135.
16. Chen, H., Guo, J., Zhang, C. and Xu, C. 2013. Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future. *Springer*, 113: 363-375.
17. Falconer, R., Smyth, P., and Maani, L. 2008. Pluvial extreme event risk appraisal techniques with recent applications in Ireland and the UK, In *Irish National Hydrology Conference* (pp. 43 52).
18. Fernandez, D.S., Lutz, M.A. 2010. Urban Flood Hazard Zoning in Tucum Province, Argentina, Using GIS and Multicriteria Decision Analysis. *Research Engineering Geology*, 111: 90-98.
19. IPCC. 2001. *The Scientific Basis of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, 67-68.
20. IPCC. 2007. *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
21. IPCC-TGCI. 1999. *Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment*. Eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Version 1, 69pp. Intergovernmental Panel on
- آبخیز شیطور بافق)، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، صص ۲۹-۳۷.
۴. خلیلی‌اقدام، نبی، مساعدی، ابوالفضل، سلطانی، افشین، کامکار، بهنام. ۱۳۹۱. ارزیابی توانایی مدل LARS-WG در پیش‌بینی برخی از پارامترهای جوی سنج، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد نوزدهم، شماره ۴، صص ۸۵-۱۰۲.
۵. خیری‌زاده آروق، منصور، ملکی، جبرائیل، عمونیا، حمید. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع سیلاب در حوضه آبریز مردق‌چای با استفاده از مدل ANP. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، صص ۳۹-۵۶.
۶. صداقت‌کردار، عبدالله، فتاحی، ابراهیم. ۱۳۸۷. شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۱: ۵۹-۷۶.
۷. علیجانی، بهلول، قهرودی، منیژه، امیراحمدی، ابوالقاسم. ۱۳۸۴. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در دامنه‌های شمالی شاه‌جهان با استفاده از GIS (مطالعه موردی: حوضه اسطرخی شیروان). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۸۴: صص ۱۳۱-۱۱۸.
۸. قنواتی، عزت‌اله، بابائی‌اقدام، فریدون، همتی، طاهر، رحیمی، مسعود. ۱۳۹۴. پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌گیری با استفاده از مدل منطق فازی در محیط GIS (مطالعه موردی: حوضه رودخانه خیاوچای مشکین شهر)، هیدروژئومورفولوژی، ۳: صص ۱۲۱-۱۳۵.
۹. مساح‌بنوانی، علیرضا، مرید، سعید. ۱۳۸۵. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب. رساله دکتری. دانشگاه تربیت مدرس.
۱۰. محمودزاده، حسن، باکوپی، مائده. ۱۳۹۷. پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از تحلیل فازی. مجله مخاطرات محیط طبیعی. دوره ۷، شماره ۱۸، صص ۵۱-۶۷.
11. Abbaspour, K.C. 2007. *User Manual for SWAT-CUP. SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 95 p.
12. Abbaspour, K.C. 2008. *SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland, , 95pp.

- the development of climate change scenarios. *Clim Chang* 35(4):397–414.
32. Semenov, M.A., Barrow, E.M. 2002. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies. <http://www.rothamsted.ac.uk/masmodels/larswg.php> User Manual: 1–27.
  33. Sperotto, A., Torresan, S., Gallina, V., Coppola, E., Critto, A. and Marcomini, A. 2016. A multi disciplinary approach to evaluate pluvial floods risk under changing climate: The case study o the municipality of Venice (Italy), *Science of The Total Environment*, 562, 1031-1043.
  34. USEPA. 2001. Our Built and Natural Environments: A Technical Review of the Interactions between Land Use, Transportation and Environmental Quality, p.4.
  35. Van Laarhoven, P.J. and Pedrycz, W. 1983. A fuzzy extension of Saaty's priority theory. *Fuzzy sets and Systems*, 11(1-3), 229-241.
  36. Verbeeten, Elke and Barendregt. Anne. 2007. The Impacts of Climate Change on Hydrological Services Provided By Dry Forest Ecosystems in West Africa, 4th International SWAT Conference .
  37. Wang, X. and Melesse, A.M. 2005. Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a northwestern Minnesota watershed. *Transactions of the ASAE*. 48(4), 1-18.
  38. Wilby R.L. and Harris, I. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42, W02419, DOI: 10.1029/2005WR004065.
  39. Wood, E.F., Beven, M.K. and Band, L. 1988. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. *Journal*.
  40. Zare Zadeh, S.H., Khorani, A., Bazrafshan, J. and Bazrafshan, O. 2018. Gamasiab river flow regime changes under climate change scenarios. *J. Environ. Sci.*, 4(44), 587-602 [In Persian].
  - Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
  22. Iqbal, M.S., Dahri, Z.H., Querner, E.P., Khan, A. and Hofstra, N. 2018. Impact of Climate Change on Flood Frequency and Intensity in the Kabul River Basin. *Geosciences*. 8(4), 114-130.
  23. Jiang, T., Chen, Y.D., Chong-yu, Xu. Xiaohong, Chen. Xi, Chen. And Vijay P, Singh. 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China, *Journal of Hydrology* (2007) 336, 316– 333.
  24. Jothityangkoon, C., Sivapalan, M., and Farmer, D.L. 2001. Process controls of water balance variability in a large semi arid catchment: downward approach to hydrological model development. *Journal of Hydrology* 254, 174–198.
  25. Maghsood, F.F., Moradi, H., Bavani, M., Reza, A., Panahi, M., Berndtsson, R. and Hashemi, H. 2019. Climate change impact on flood frequency and source area in northern Iran under CMIP5 Scenarios. *Water*, 11(2), 273 .
  26. Mazidi, M. and Khoshravesh, M. 2016. The Effect of Climate Change on the Flood Frequency of Gorganrood Basin using Analysis of the First Order of Hydrologic Rainfall-Runoff Model. *Applied Research of Water Sciences*. 2(2), 35-44. (In Persian)
  27. Mitchell, T.D. 2003. Pattern Scaling: An Examination of Accuracy of the Technique for Describing Future Climates. *Climatic Change* 60: 217-242.
  28. Moore, I.D., O'Loughlin, E.M. and Burch, G.J. 1988. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. *Earth Surface Processes Landforms*, 13: 305-320.
  29. Reynard, N.S. 2003. Impact of climate change on flood flows in river catchments – interim report.
  30. Saaty, T.L. 2000. Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process (Vol. 6). RWS publications.
  31. Semenov, M.A and Barrow E.M. 1997. Use of a stochastic weather generator in