

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی (مطالعه موردی: بخشی از حوضه کارون)

میلاد مرادزاده^{۱*}، هادی پورحسین^۲

*۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب دانشگاه تبریز، ایران

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشگاه تهران، پردیس ابوریحان، تهران، ایران

ایمیل نویسنده مسئول: miladmoradzadeh1997@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۱

چکیده

امروزه پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی با تاثیر بر اقلیم کره زمین و سیستمهای دیگر از جمله منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، صنعت، بهداشت و اقتصاد به عنوان یکی از تهدیدات توسعه پایدار شناخته میشود. بنابراین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر سامانههای مختلف و ارائه راهکارهای تطبیقی در مقابله با تبعات منفی این پدیده در دوره-های آتی بسیار ضروری میباشد. بنابراین با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این پژوهش بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش، رواناب و در نهایت خشکسالی هیدرولوژیکی حوضه رود زرد در دوره آتی می باشد. برای این منظور داده های سالهای ۲۴۹۲-۲۲۲۲ به عنوان داده های پایه به مدل کوچک مقیاس سازی LARS-WG معرفی و داده های سالهای ۲۴۴۲-۲۴۴۹ جهت واسنجی و داده های سالهای ۲۴۹۹-۲۴۱۴ جهت صحت سنجی مدل بارش رواناب IHACRES مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین جهت بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی از شاخص SDI استفاده گردید. نتایج حاکی از افزایش میانگین دمای سالانه در منطقه مورد مطالعه به مقدار ۲۲/۲ درجه سانتیگراد همچنین میزان تغییرات مورد انتظار میانگین بارندگی سالانه در منطقه مورد مطالعه ۴۲/۲۲ درصد و به میزان ۹۱/۹۳ میلیمتر می باشد. نتایج مدل IHACRES در شبیه سازی بارش-رواناب منطقه مورد مطالعه نشان دهنده عملکرد مناسب این مدل می باشد. نتایج شبیه سازی رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم حاکی از افزایش میانگین رواناب خروجی در بعضی از ماهها از جمله ژانویه، فوریه و مارس و کاهش میانگین رواناب ماهانه خروجی از حوضه در ماههای سپتامبر، SDI نشان دهنده افزایش شدت خشکسالی در دوره آتی نسبت اکبر می باشد. همچنین نتایج بدست آمده از شاخص به دوره پایه می باشد. از نتایج این پژوهش می توان در مطالعات سازگاری با تغییر اقلیم به منظور ارائه راهکارهای مدیریتی مناسب در منطقه مورد مطالعه استفاده کرد.

کلمات کلیدی

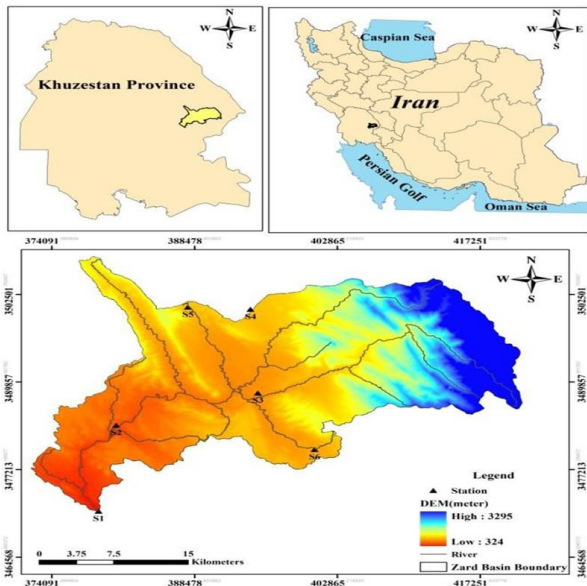
"بارش-رواناب"، "LARS-WG"، "تغییر اقلیم"، "ریز مقیاس سازی"، "شاخص SDI"

۱- مقدمه

از عوامل مهم و تاثیر گذار در گرمایش زمین و به تبع آن خشکسالی های سال های اخیر تغییرات اقلیمی بوده که عبارت است از تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده یا ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است (کاراموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۴) به بیان دیگر، تغییر اقلیم، معادل تغییرات معنی دار آماری برای متوسط وضع آب و هوا در یک دوره طولانی است. اقلیم می تواند گرمتر یا سردتر شود و مقادیر سالانه بارندگی یا برف می تواند افزایش و یا کاهش یابد (خلیلی، ۱۳۷۹). بدین منظور برای بررسی دقیق تر مسئله تغییر اقلیم در سال ۱۹۸۸ هیات بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) با هدف بررسی، شناخت و مطالعه جنبه های فنی، علمی، اجتماعی، اقتصادی و مخاطرات بوجود آمده بر اثر تغییر اقلیم بوجود آمد. به گزارش انجمن چند دولتی تغییر اقلیم (IPCC) دمای سطح زمین به دلیل انتشار گازهای گلخانه ای ۰/۳ تا ۰/۶ درجه سانتیگراد در طول قرن گذشته افزایش داشته است و طبق گفته IPCC مناطق آسیایی در

خشکی متفاوت از پدیده خشکسالی است. خشکی حالت دائمی از شرایط اقلیمی است که کمبود رطوبت مهمترین ویژگی آن می باشد و خشکسالی ویژگی موقتی هواشناسی یک منطقه است و در هر رژیم آب و هوایی حتی مناطق مرطوب نیز می تواند اتفاق افتد (جوانمرد آسیایی، ۱۳۸۳) این پدیده، پدیده ای طبیعی و تکرارشدنی است که در اثر کاهش میزان بارندگی در یک دوره زمانی مشخص به وجود می آید (شارما و اسماخین، ۲۰۰۴) خشکسالی از جمله بالیای طبیعی و بخش جدایی ناپذیر در اقلیم است (ویلپهیت و همکاران، ۲۰۰۵) که باعث فشار به منابع آب سطحی و زیر زمینی می شود (تیگاس و همکاران، ۲۰۱۲) افزایش رشد صنایع و به موجب آن افزایش بیش از حد استفاده از سوخت های فسیلی و در نتیجه افزایش گازهای گلخانه ای از عوامل مهم تغییر اقلیم و به تبع آن گرمایش زمین بوده است، گرمایش زمین از عوامل مهمی است که باعث تشدید خشکسالی ها می شود (صمدی و ابراهیمی ۱۳۹۰)

مشاهداتی دمای کمینه و بیشینه، بارش و رواناب ۶ ایستگاه هواشناسی حوضه رود زرد طی دوره آماری (۲۴۹۲-۲۲۲۲) که از اداره آب و برق استان خوزستان تهیه شده است. که مشخصات ایستگاهها در جدول شماره ۲-۳ (و در شکل ۳-۳) شکل ۲ موقعیت ایستگاهها را روی نقشه نشان می دهد.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

داده‌های مورد نیاز داده‌های مورد نیاز این مطالعه که شامل بارش و دبی ثبت شده در ایستگاه‌های درون حوزه آبخیز کارون بودند که از بخش آمار و اطلاعات وزارت نیرو و داده‌های دما از سازمان هواشناسی تهیه گردید. مقیاس زمانی داده‌های ایستگاه‌های موجود در این تحقیق روزانه می‌باشد. اطلاعات و نقشه‌های پایه حوزه آبخیز که شامل: مرز حوضه، شبکه آبراه‌های، خطوط توپوگرافی، محل مخازن و محل ایستگاهها واقع در حوزه آبخیز کارون بودند جمع آوری شده و برای تعیین موقعیت ایستگاه‌ها و انتخاب ایستگاههای مناسب در نظر گرفته شدند.

• روش انجام تحقیق

پس از آماده سازی داده هاز نظر کمیت و کیفیت این داده ها به نرم افزار الرس معرفی می گردند. با ورود داده ها به نرم افزار، خصوصیات آماریشان تعیین شده و تحلیل می شوند. در مرحله اجرا داده های مصنوعی که دارای خصوصیات آماری مشابه با داده های دوره پایه هستند، تولید می شوند. در این فرآیند می توان از سناریوهای توسعه داده شده و همچنین مدل های مختلف GCM بهره گرفت. در این پژوهش سناریو (A۲) و از بین مدل های اجرا شده مدل HADCM۳ با توجه به نتایج ارزیابی مورد استفاده قرار گرفتند.

مقابل تغییر اقلیم آسیب پذیر به نظر میرسند، همچنین بر اساس آخرین گزارش هیات بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) میانگین افزایش دما برای سال ۲۰۶۰ میلادی در حدود ۵/۲ درجه سانتیگراد پیش بینی شده است (IPCC۲۰۰۱). اثرات خشکسالی در وهله نخست بر بخش کشاورزی و منابع طبیعی، به دلیل وابستگی مستقیم به رطوبت ناشی از بارندگی تاثیر می گذارد و در نهایت آثارش بر منابع آب سطحی و زیرزمینی بروز می کند (معروفی ۲۲۲۳). همچنین سبب تلفات اقتصادی زیادی می شوند، که کاهش فراورده های کشاورزی، دامی، کالهای صنعتی و نیروی برق آبی از آن جمله است. خشکسالی ها افزون بر تاثیر مستقیم اقتصادی و اجتماعی در کشاورزی، ذخیره آب صنعتی و شهری، آثار ثانویه بیشتری را برجا می گذارند. مهمترین این آثار طوفانهای همراه با گرد و غبار، آتش سوزی جنگل ها، بیماری های ناشی از حشرات، کاهش سطح بهداشت عمومی، افزایش آلودگی هوا و خاک، کاهش کیفیت آب از آثار زبان آوری هستند که در سلامت عمومی و حیات وحش تاثیر خواهند گذشت (کریمی و همکاران ۲۳۱۲). مشکلات ناشی از کمبود آب و افزایش بالایی جهانی مربوط به آن، مطالعه تغییرپذیری رواناب و اثرات تغییر اقلیم بر آن را به صورت یک ضرورت در آورده است.

۲- روش انجام تحقیق

• محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، حوضه رودخانه زرد میباشد. این رودخانه در جنوب غربی ایران در استان خوزستان و در ناحیه های بین عرض جغرافیایی ۲۳-۳۲ تا ۳۲-۹۲ شمالی و طول جغرافیایی ۹۴-۹۲ تا ۵۲-۲۲ شرقی و در شمال شرقی شهرستان رامهرمز و جنوب شهرستان ایذه واقع شده است. مساحت حوضه آبریز تا محل سد جره حدود ۵/۱۲۲ کیلومتر مربع میباشد. بلندترین نقطه این حوضه حدود ۳۳۲۲ متر و ارتفاع متوسط حوضه ۲۲۲۲ متر از سطح دریا برآورد شده است. متوسط بارندگی سالانه در این حوضه حدود ۶۶۲ میلیمتر می- باشد. در پایین دست این حوضه، سد مخزنی جره قرار دارد که از جمله اهداف آن میتوان به تامین آب مورد نیاز زمینهای کشاورزی دشت رامهرمز به وسعت حدود ۲۲ هزار هکتار، کنترل سیلاب رودخانه زرد و امکان تولید انرژی برقآبی به میزان ۹۱ گیگاوات ساعت در سال اشاره کرد که با بهره برداری کامل این سد ۹ هزار فرصت شغلی در بخش کشاورزی، گردشگری و صنایع جانبی

ایجاد خواهد شد. لذا بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب در این حوضه از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق داده های

ایستگاههای قابل قبول، به عنوان ارزیابی کننده اقلیم آبی مورد استفاده قرار گیرد. در مدل‌های WG عمدتاً از دو روش آماری استفاده میشود: زنجیره مارکوف در نوع ریچاردسون و توزیع نیمه تجربی در نوع ZMF. LARS-WG نمونه‌ای از مدل‌های WG است که از روشهای توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند. این مدل توزیع نیمه تجربی را برای مدلسازی طول دوره روزهای خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش به کار می‌برد.

خالص‌های از فرآیند شبیه سازی غیر قطعی آب و هوا توسط مدل LARS-WG

فرآیند تولید داده‌های آب و هوای مصنوعی، میتواند به سه مرحله مجزا تقسیم شود - واسنجی مدل (تحلیل داده‌های برداشت شده): ۲ در این مرحله، داده‌های مشاهداتی آب و هوا به منظور تعیین خصوصیات آماریشان، مورد تحلیل و بررسی قرار میگیرند. این اطلاعات در دو فایل پارامتری ذخیره میگردد. صحت سنجی مدل (آزمون کیفیت): در این مرحله خصوصیات آماری داده‌های مصنوعی و مشاهداتی آب و هوا مورد بررسی قرار میگیرند تا اختلافهای قابل توجه آماری در آنها وجود نداشته باشد. تولید داده‌های مصنوعی آب و هوا (شبیه‌سازی): ۲ فایل‌های پارامتری که از داده‌های مشاهداتی آب و هوا که در طول فرآیند واسنجی مدل به دست آمد، برای تولید داده‌های آب و هوای مصنوعی، که دارای خصوصیات آماری مشابه با داده‌های حقیقی و مبنای روزانه متفاوت با آنها هستند، استفاده میشود. داده‌های مصنوعی مربوط به یک شرایط خاص تغییرات آب و هوا ممکن است با استفاده از مدل جهانی آب و هوا ۳ برگرفته شده از تغییرات بارندگی، دما و تابش خورشیدی در فایل‌های پارامتری مدل LARS-WG تولید شود.

شبیه‌سازی

بعد از کالیبراسیون مدل برای منطقه مورد نظر و اطمینان از عملکرد شبیه‌سازی با استفاده از آزمون Q-test اطلاعات مصنوعی آب و هوا با استفاده از Generator شبیه‌سازی میشوند. از این گزینه میتوان برای ساخت اعدادی با مشخصات آماری مشابه داده‌های مشاهداتی و یا ساخت اعدادی بر اساس مشخصات سناریوهای تغییر اقلیم استفاده نمود. در این مرحله ساختار و مبنای تولید داده‌های جدید مشخص میگردد که سه گزینه اصلی برای آن در نظر گرفته شده است: Baseline در صورت انتخاب این گزینه داده‌های مصنوعی بر اساس پارامترهای منتج از داده‌های مشاهداتی ساخته خواهند شد. در نتیجه مشخصه‌های آماری داده‌های تولید شده با داده‌های مشاهداتی یکسان خواهد بود. - Scenario ۲: file در این حالت کاربر میتواند در فایلی به طور دلخواه مشخص کند که مشخصات آماری داده‌های مصنوعی به چه میزان با داده‌های مشاهداتی متفاوت هستند. در این بخش آدرس فایل سناریو مجازی توسعه داده شده ارائه میشود. مدل LARS

در ادامه با تولید داده‌ها توسط مدل لارس این داده‌ها به مدل واسنجی مدل سال‌های مختلف در طول دوره آماری (۲۲۲۲-۲۳۹۵) مورد آزمون قرار گرفتند. دوره ۹ ساله (۲۴۴۲-۲۴۴۹) به عنوان بهترین دوره برای واسنجی TW) برابر ۲۲ روز و f برابر ۲۲/۲ در نظر گرفته شدند (انتخاب و مدل برای دوره آماری (۲۳۹۵-۲۴۱۴) مورد صحت سنجی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۳-۳ ذکر شده است.

	صحت سنجی			واسنجی		
	NSE	RMSE	R ²	NSE	RMSE	R ²
روزانه	۲/۹۲	۲/۲۲	۲/۹۹	۲/۶۶	۲/۲۱	۲/۶۱
ماهانه	۲/۴۲	۲/۲۹	۲/۴۲	۲/۱۲	۲/۳۲	۲/۱۳

معرفی نرم افزار ریز میاس سازی LARS-WG

از مدل LARS-WG میتوان برای شبیه‌سازی غیر قطعی آب و هوا برای یک منطقه خاص بر اساس شرایط موجود و یا آینده استفاده نمود نسخه اولیه LARS-WG در سال ۲۴۴۲ به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک‌های کشاورزی در کشور نسخه اولیه LARS-WG در سال ۲۴۴۲ به عنوان بخشی از پروژه ارزیابی ریسک‌های کشاورزی در کشور مجارستان ابداع شد. مهمترین هدف توسعه این مدل رفع ضعف زنجیره مارکوف در شبیه‌سازی بارش بود که برای بارش دو حالت خشک (بدون بارش) و تر (دارای بارش) در نظر میگرفت و تنها شرایط روز قبل را در شبیه‌سازی بارش لحاظ مینمود. این مدل قادر به شبیه‌سازی دقیق حداکثر دوره‌های خشک که خصوصاً در برنامه‌ریزی و مدیریت کشاورزی مهم هستند، نبود. در رویکرد جدید رویکرد سری مینا لحاظ گردید و در ابتدا طول دوره‌های تر و خشک شبیه‌سازی شدند. این مدل از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است و برای تولید بارش روزانه، تابش و ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت‌های روزانه در یک ایستگاه برای مدلسازی اقلیم حال و آینده به کار می‌رود. مدل LARS-WG پس از صحت سنجی میتواند در

کد	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه
S ^۱	ماشین	۳۲-۲۳	۹۴-۹۳	آبسنجی آبخیرسنجی
S ^۲	ده سادات	۳۲-۲۲	۹۵-۹۴	بارانسنجی
S ^۳	باغ ملک	۳۲-۲۳	۹۴-۵۲	تبخیرسنجی
S ^۴	قلعه‌تل	۳۲-۳۱	۹۴-۵۲	بارانسنجی
S ^۵	چشمه شیرین	۳۲-۳۱	۹۴-۹۹	بارانسنجی
S ^۶	گنداب	۳۲-۲۹	۹۴-۹۹	بارانسنجی

با تولید داده‌های قابل توجه سعی خواهد نمود تا مشخصات اعداد تولیدی را با مشخصات ارائه شده در فایل سناریو همسان نماید.

مدل بارش رواناب IHACRES

مدل بارش رواناب IHACRES های واحد و اجزای جریانهای ناشی از داده‌های بارش، تبخیر و جریان رودخانه (مشترکاً توسط هیدرولوژیستهای مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضه آبخیز (ICAM) دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی (CEH) انجمن تحقیقات زیستمحیطی انگلستان توسعه یافته بود که به صورت مستمر در مجالت مرتبط با هیدرولوژی توضیح داده شده است. این مدل، مدلی مفهومی و یکپارچه است که در مناطق آب و هوایی متفاوت، از جمله مناطق خشک و نیمه خشک کاربرد دارد (Jakeman ۲۰۰۸, Croke). هدف اصلی مدل IHACRES تعیین رفتار هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از تعداد کمی از پارامترها است. بر اساس رویکرد مفهومی مورد استفاده در مدل IHACRES، این مدل میتواند برای اهدافی مانند تغییرات بارش، دما و نیز تغییرات ضریب رواناب مورد استفاده قرار گیرد (al et ۲۰۰۸, Carcano). با توجه به کمبود ایستگاههای هیدرومتری در حوزههای کوچک یا بال دست، توسعه آزمونهایی که بتواند آبدهی جریان را در مقیاس زمانی روزانه و در مکان دلخواه برآورد نماید از موارد ضروری است که به بهبود اطلاعات مورد نیاز برای اهداف مدیریتی مرتبط با منابع آب منجر میگردد. اساس این روش از مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی آبگاشت تشکیل میشود. در ابتدا بارندگی با مدول غیرخطی، به K در هر گام زمانی $k(t)$ و دما $k(r)$ تبدیل و سپس به کمک مدول خطی uk بارندگی موثر آب -نگاشت واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود.

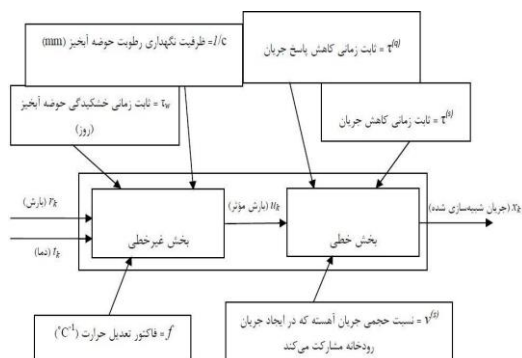
برآورد رواناب دوره‌های آبی

به منظور ارزیابی اثر تغییرات دما و بارندگی بر میزان رواناب در دوره‌های آبی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژی امری ضروری است. در این بین مدل‌های بارش - رواناب توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای داخل حوضه را دارا هستند و ابزاری مناسب جهت تعیین رواناب به شمار می‌آیند. به دلیل محدودیت امکان اندازه - گیری دبی جریان در زمان و مکان، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌تواند ابزاری برای پیشبینی و تخمین باشد که به تصمیم‌گیری مناسب در مدیریت منابع آب سطحی کمک خواهد نمود (Beven, ۲۰۰۱). شناخت روابط بارش و رواناب و همچنین اطلاع از توزیع زمانی و مکانی بارش و شناخت اثر آن روی دبی رودخانه از مواردی است که مدیران را در مدیریت صحیح منابع آب در یک حوزه آبخیز کمک می - نماید (صادقی و همکاران، ۱۳۱۲). پیشبینی رواناب و آگاهی پیش از موعد از میزان آب در دسترس میتواند در تقسیم بهینه آب برای آبیاری، تولید جریان برق، کنترل سیلاب، برنامه‌ریزی کاربرد آب در بخشهای

صنعت، کشاورزی و شرب، حفاظت زیستگاههای منطقه‌های طبیعی، کنترل آلودگی آب و نیز گسترش بهره - گیری تفرجگاهی از منابع و اراضی مفید بوده و منافع اقتصادی در بر داشته باشد. علاوه بر این، بهبود مدلها و افزایش دقت پیشبینی را با توجه به اثر گذاری یاد شده میتوان به عنوان درآمد اقتصادی که در این راستا فراهم میشود در نظر گرفت. بنابراین مطالعه و بررسی روشهای نوین و تعیین الگوریتمهای مناسب جهت پیشبینی و مدلسازی مقادیر دبی رودخانهها ضروری به نظر میرسد.

شبیه سازی بارش - رواناب

مدلهای هیدرولوژیکی که روابط آماری مناسبی بین پارامترهای خود و مشخصات فیزیکی حوضه برقرار میکنند، پایه و اساس مناسبی برای پیشبینی جریان در حوضه‌های آبخیز محسوب میشوند (Littlewood & al. ۲۰۰۷). در این بین مدل‌های بارش - رواناب، مدل IHACRES به علت داده‌های اندک مورد نیاز بدون صرف زمان و هزینه زیاد برای تهیه داده‌ها، به آسانی میتواند در بسیاری از حوضه‌های آبخیز بکار برده شود (Croke & al., et ۲۰۰۶). به طوریکه این مدل برای داده‌های با پایه زمانی ۶ دقیقه تا یک ماه و برای حوضه‌های در انگلستان استفاده شده است. مدل IHACRES در مناطق خشک به علت اینکه جریانهای زودگذر وجود دارند و واکنش به متغیرهای اقلیمی سریعتر صورت میگیرد، قابل اجرا است. هدف اصلی مدل IHACRES تعیین رفتار هیدرولوژیکی حوضه با استفاده از تعداد کمی از پارامترها است. مدل مذکور به دو سری داده‌های بارش (میتواند بر حسب میلیمتر و یا اینچ باشد) و درجه حرارت (میتواند بر حسب درجه سلسیوس، فارنهایت و یا کلون باشد) به عنوان ورودی و جهت شبیه‌سازی جریان و همچنین به داده‌های جریان مشاهداتی (بر حسب متر مکعب در ثانیه، میلی گرم لیتر در پایه زمانی، میلی متر در پایه زمانی، لیتر بر ثانیه یا فوت مکعب بر ثانیه) به منظور واسنجی مدل و بررسی دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیاز دارد. این مدل شامل دو بخش به هم پیوسته غیر خطی و خطی است که به ترتیب برای محاسبه تلفات و تبدیل بارش موثر به رواناب تعریف شده است (al., ۲۰۰۹, Al-Qurashi, & McIntyre ۲۰۰۵). شکل ۲-۳ ساختار کلی مدل مورد استفاده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ساختار کلی مدل هیدرولوژیکی IHACRES (Littlewood & al., et ۲۰۰۷)

تبدیل بارش موثر به رواناب (بخش خطی بخش خطی دارای سه پارامتر

بخش خطی دارای سه پارامتر τ_k ، τ_s و V_s می باشد. ترکیب دو مولفه جریان سریع $X_k^{(q)}$ و جریان آهسته $X_k^{(s)}$ منجر به تولید رواناب X_k می شود که با استفاده از روابط (۹ تا ۶) محاسبه میگردد (Taesombat & Sriwongsitanon, ۲۰۱۰)

(۱۰) $xk(q)+xk(s)=kx^9$ (رابطه)

(رابطه) $xk(q)=-\alpha q x k^{-1}(q)+\beta q u k \delta$

(رابطه) $xk(s)=-\alpha s x k^{-1}(s)+\beta s u k \delta$

که در آن، αq و βq به ترتیب، ثابت زمانی جریان سریع و αs و βs به ترتیب ثابت زمانی جریان آهسته می-

باشند که با استفاده از روابط ۹ و ۱ بهدست می آیند.

(رابطه) $\tau q=-\Delta \ln (-\alpha q)^9$

(رابطه) $\tau s=-\Delta \ln (-\alpha s)^1$

که در آن، Δ بازه زمانی و τq و τs ثابت زمانی فروکش برای جریان سریع و آهسته در مخازن متوالی (بر

حساب روز) میباشند. نسبت حجمی جریان سریع و آهسته به صورت رابطه ۴ در نظر گرفته میشوند.

(رابطه) $V q=1-V s=\beta q^1+\alpha q=1-\beta s^1+\alpha s^4$

۱۹۹

واسنجی و اعتبارسنجی مدل بارش رواناب IHACRES

در واسنجی مدل IHACRES مقادیر ثابت زمانی خشکی آبخیز τ_w و فاکتور تعدیل دما f در بخش غیر

خطی مدل به صورت دستی توسط کاربر انتخاب میشوند و سه پارامتر از پارامترهای αs و βs و αq و βq در

بخش روندیابی خطی مدل و پارامتر (۱ / c) ثابت میزان ذخیره آبخیز) توسط خود نرم افزار محاسبه میشود. در

این مرحله بهترین مدل بر اساس مقادیر معیارهای ارزیابی ضریب تعیین ساده و تبدیل شده (جزر، لگاریتم و

معکوس) انتخاب میگردد.

در ارزیابی نتایج شبیهسازی پیوسته جریان در مدل از معیارهای آماری مختلفی استفاده میشود که در روابط

۲۲ و ۲۲ ارائه شده است. در رابطه ۲۲، معیار ضریب تعیین ۲ براساس رابطه میان مجذور مربعات خطا و

واریانس مقادیر مشاهداتی بیان میگردد.

(رابطه) $R \text{ sqrt}=[1-\Sigma(QO-QM)^2 \Sigma(QO-QO)^2]^{1/2}$

(رابطه) $\text{Bias}=\Sigma(QO-QM) / n$

در رابطه ۲۲ R sqrt ضریب تعیین واسنجی مدل، QO جریان روزانه مشاهده شده، QM جریان روزانه شبیهسازی شده و QO متوسط جریان

روزانه مشاهداتی است. در رابطه ۲۲ (Bias) ارزیابی خطای کل در حجم جریان (mm/yr) و n تعداد دادهها میباشد.

پارامترهای R sqrt و Bias توسط خود مدل مورد محاسبه قرار گرفته، مقدار عددی R sqrt بین منفی بینهایت

تا ۲ متغیر است و مقدار یک نشان دهنده تطابق کامل می باشد (Norton & Blaker, ۲۰۰۷، مقادیر پارامتر

Bias هم نشان دهنده بیشتر یا کمتر بودن جریان شبیهسازی شده توسط مدل نسبت به جریان مشاهداتی

است. به عبارتی مشخص میکند که مدل جریان را بیشتر از واقعیت شبیهسازی نموده یا کمتر (Croke & et al., ۲۰۰۵)

۹۵ خشکسالی هیدرولوژیکی و شاخص خشکسالی جریان رودخانه (۲ - SDI)

خشکسالی هیدرولوژیکی با تأثیر دوره هایی از نقصان ریزش های جوی (شامل برف) بر منابع تأمین آب

های زیرزمینی یا سطحی همراه می شود (جریان رودخانه ها، مخازن، دریاچه ها و آب زیرزمینی). فراوانی و

شدت خشکسالی های هیدرولوژیکی اغلب در مقیاس یک آبخیز یا حوزه آبریز رودخانه بیان می شود. گرچه

همه خشکسالی ها از کمبود بارش منشأ می گیرند اما هیدرولوژیست ها بیشتر به این موضوع توجه دارند که

این کمبود چگونه در سیستم هیدرولوژیکی ظاهر می شود. خشکسالی های هیدرولوژیکی به طور معمول با

تأخیر بیشتری نسبت به خشکسالی های هواشناسی یا کشاورزی رخ می دهند (صمدی و ابراهیمی، ۲۳۴۲)

هرچند در بروز خشکسالی هیدرولوژیکی، اقلیم عامل اولیه می باشد، ولی سایر عوامل از جمله تغییر

کاربری اراضی، تخریب اراضی و ساخت سد ها، همگی روی خصوصیات هیدرولوژیکی حوضه اثر می گذارد.

امروزه این نوع خشکسالی به علت گسترش شهرسازی، صنعتی شدن و کمبود آب شرب، بصورت یک مشکل

پیچیده درآمده است.

یکی از شاخص های تعیین خشکسالی هیدرولوژیکی، شاخص خشکسالی جریان رودخانه می باشد که با

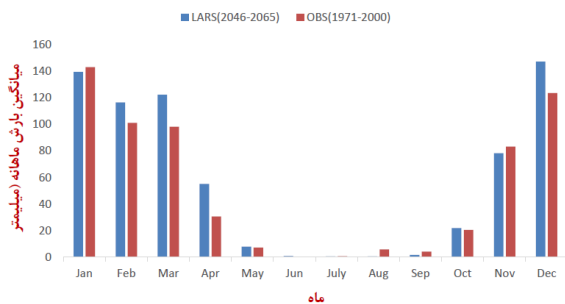
به کارگیری داده های دبی رودخانه می تواند تخمین خوبی از خشکسالی های هیدرولوژیکی را ارائه دهد.

چنانچه سری های زمانی از حجم جریانات رودخانه ای (Qij) موجود باشند در این صورت I سال

هیدرولوژیکی و J ماه مربوط سال هیدرولوژیکی را مشخص میکند، $J=1$ مهر، $I=12$ شهریور (این سری ها

را می توان با استفاده از فرمول بدست آورد، که در آن Vik حجم تجمعی جریانات رودخانه ای است .

به عنوان مثال در آن $k=1$ برابر حجم تجمعی جریانات رودخانه ای در سه ماه اول سال آبی برای I سال هیدرولوژیکی و k دوره مبنا می باشد

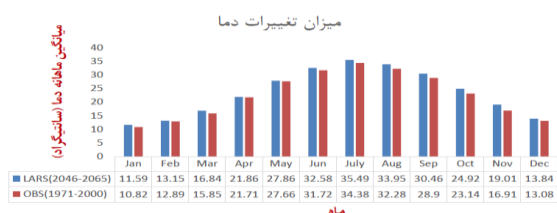


شکل ۱- بارش ریز مقیاس شده در دوره آتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی دوره پایه

در این شکل بطور همزمان میزان تغییرات کلی الگوی بارش در دوره پایه و دوره آتی نشان داده شده است. همانطور که پیداست در این حوضه میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. در این دوره (۲۲۹۶-۲۲۶۵) تغییرات میزان بارش در ماه های: می، ژوئن، جولای، سپتامبر و اکتبر ناچیز بوده است. اما افزایش آن در ماه های نوامبر، دسامبر، ژانویه، فوریه، مارچ و آوریل کامل مشهود می باشد. در دوره مشاهداتی بیشترین بارش در ماه

وضعیت خشکسالی	محدوده	حالت	احتمال
بدون خشکسالی	$SDI \leq 0$	۰	۵۰
خشکسالی مالیم	$-1 \leq SDI < 0$	۱	۳۴.۱
خشکسالی متوسط	$-1.5 \leq SDI < -1$	۲	۹.۲
خشکسالی شدید	$-2 \leq SDI < -1.5$	۳	۴.۴
خشکسالی خیلی شدید	$SDI < -2$	۴	۲.۳

ژانویه اتفاق افتاده است که با توجه به تغییرات الگوی بارش در اثر تغییر اقلیم اینمی توان دریافت که در فصلبطور کلی با توجه به این نمودار بیشینه به ماه دسامبر انتقال یافته است. تابستان و پاییز الگوی بارش در این منطقه بطور ناچیزی تغییر میکند اما این تغییرات در فصول زمستان و بهار به طور محسوس و چشمگیری خواهد بود. به منظور مشخص شدن تغییرات دما در دوره آتی و دوره پایه شکل (۲-۹) نمایش داده شده است همانطور که در نمودار نیز پیداست در دوره (۲۲۹۶-۲۲۶۵) در اکثر ماهها دما نسبت به دوره پایه افزایش می یابد. شدت این افزایش در ماه نوامبر و در حدود ۲.۲ درجه سانتیگراد است در این میان کمترین افزایش دما مربوط به ماه آوریل و حدود ۲.۲۵ درجه سانتیگراد است. با توجه به این نتایج و نتایج مشابه بسیار میتوان دریافت که بدلیل اثرات تغییر اقلیم، آینده ای گرمتر از زمان حال مورد انتظار است.



شکل ۲- تغییرات میانگین ماهانه دما در دوره آتی نسبت به دوره پایه

جدول ۱- طبقه بندی حالت های مختلف خشکسالی را برای شاخص SDI نشان می دهد.

ماه			
Jan	۲	۲/۴۴۱۴	۲/۴۴۱۴
Feb	۲	۲/۴۴۱۴	۲/۴۴۱۴
Mar	۲	۲	۲
Apr	۲	۲/۴۴۱۴	۲
May	۲	۲/۴۴۴۲	۲
Jun	$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_i}{s_k}$	$i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4$	۲
Jul	۲/۵۱۴۵	۲/۴۴۱۴	۲/۴۴۱۴
Aug	۲/۴۱۲۹	۲/۴۴۱۴	۲/۴۲۲۵
Sep	۲/۵۹۳۹	۲/۴۴۱۴	۲/۴۴۱۴
Oct	۲	۲/۴۴۱۴	۲
Nov	۲	۲	۲
Dec	۲	۲/۴۴۴۲	۲/۴۴۱۴

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,k} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad j = 1, 2, \dots, 12 \quad k = 1, 2, 3, 4$$

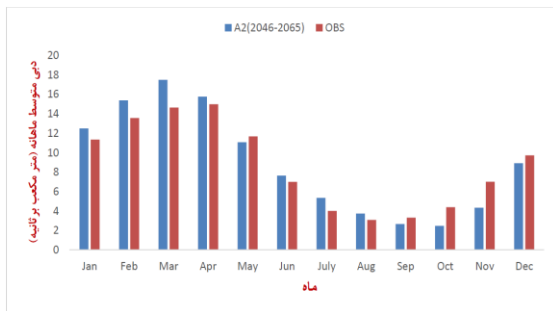
همچنین مقدار SDI از فرمول زیر قابل محاسبه است که در آن KV و KS کترتیب میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی برای دوره مبنا k در یک مدت طولانی می باشد. همچنین گام های زمانی قابل محاسبه برای شاخص SDI ۲۲ ماهه می باشند ۴، ۴، ۳، ۶، ۲۰۰۸ (Nalbantis and Tsakiris):

نتایج و بحث

بررسی تغییرات دما، بارش و عملکرد مدل LARS-WG تحت تاثیر تغییر اقلیم

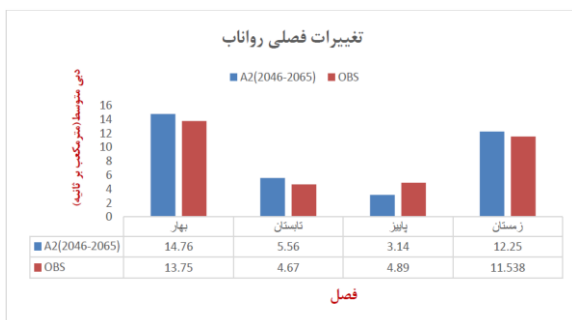
جهت مدلسازی اثرات تغییر اقلیم در حوضه با استفاده از مدل بارش - رواناب، ابتدا متغیرهای بزرگ مقیاس توسط مدل الرس ریز مقیاس شده و روند تغییرات بارش و دما محاسبه شده سپس با معرفی این داده ها به مدل هیدرولوژیک IHACRES میزان رواناب ناشی محاسبه می گردد. جهت اطمینان از خروجی های مدل الرس آزمون کای-اسکوئر توسط نرم افزار انجام گردید و مقادیر p-value بالای آماره ها این اطمینان را داد که می توان به نتایج مدل الرس اعتماد داشت.

جدول ۲- مقادیر p-value - نتایج آزمون کای اسکوئر برای توزیع احتمالاتی داده های بارش، دمای- حداقل و دمای حداکثر مشاهداتی و تولید شده توسط LARS-WG



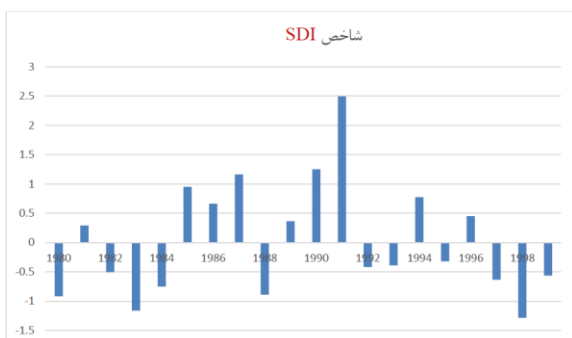
شکل ۵- مقایسه رواناب ماهیانه برای دوره آبی و دوره پایه

با توجه به نمودار میتوان دریافت که بیشترین افزایش رواناب در ماه مارس و حدود ۲۰۱ مترمکعب بر ثانیه رخ خواهد داد. بیشینه رواناب در دوره پایه در ماه آوریل است که با توجه به تغییرات اقلیمی این بیشینه به ماه مارس در دوره آبی انتقال خواهد یافت. با توجه به شکل نیز میتوان دریافت که کاهش رواناب را برای ماه های گرم سال داریم میتوان اینطور استنباط کرد که این کاهش رواناب میتواند در دوره های آبی متأثر از افزایش دما در این ماهها باشد. شکل ۶ تغییرات فصلی میزان رواناب را نشان می دهد، همانطور که مشاهده می شود بیشترین رواناب- در دوره های آبی مربوط به فصول بهار و زمستان می باشد. با توجه به این تغییرات میتوان انتظار سیلاب های این دو فصل و به خصوص سیلابهای بهاره را داشت.



شکل ۶- تغییرات فصلی رواناب در دوره آبی و دوره پایه

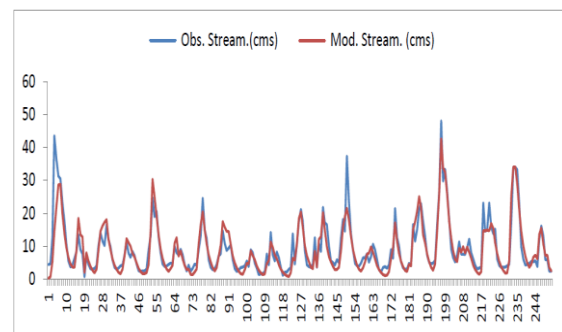
بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیکی با استفاده از شاخص SDI شکل ۷ نمودار خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره پایه با استفاده از شاخص SDI - را بصورت سالانه نشان می دهد، این نمودار نشان دهنده دوره های ترسالی و خشکسالی به طور متناوب می باشد. همانطور که مشخص است در سال ۲۴۴۱ خشکسالی متوسط به وقوع پیوسته است.



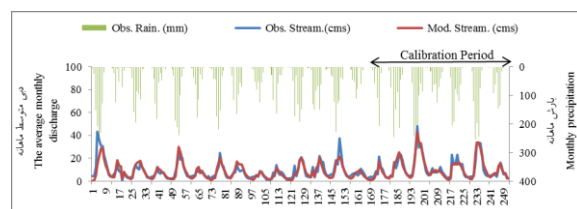
شکل ۷- نمودار شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره پایه

بررسی عملکرد مدل بارش-رواناب IHACRES

به منظور محاسبه میزان جریان رواناب در این منطقه از مدل IHACRES استفاده شد. قبل از هر چیزی باید مدل کالیبره شود بدین منظور اطلاعات روزانه دما و بارش میانگین حوضه و رواناب مشاهداتی به مدل معرفی شد. معرف ایستگاه های موجود در حوضه ایستگاه باغملک است که از داده های آن جهت صحت سنجی و کالیبراسیون استفاده گردید. پس از بررسی های متعدد و در نظر گرفتن دوره های مختلف جهت انجام کالیبراسیون و صحت سنجی، بهترین دوره کالیبراسیون برای منطقه دوره ۹ ساله (۲۴۴۲-۲۴۴۹) و بهترین دوره آماری (۲۴۱۴-۲۴۹۵) جهت صحت سنجی مورد استفاده قرار گرفت. طبق جدول ۲-۳ در این دوره ها بهترین و بیشترین مقدار ضریب تعیین و پایین ترین مقدار شاخص خطا (Bias) بین رواناب های مشاهداتی و شبیه سازی شده را دارا بودند. شکل های ۳-۶ مقایسه میزان رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده را در مقیاس روزانه و ماهانه نشان میدهند.



شکل ۳- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده در مقیاس روزانه

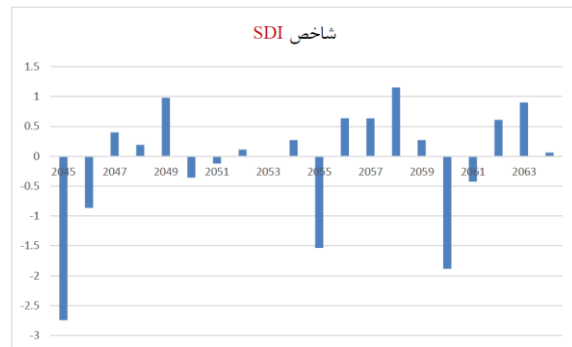


شکل ۴- مقایسه رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده در مقیاس ماهانه

با مشاهده شکل ۴ کاملاً مشهود است که روند تغییرات رواناب با روند تغییرات بارش در دوره های زمانی- مورد بررسی هماهنگی دارد. شکل ۵ میزان تغییرات رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم را نشان میدهد با مقایسه این شکل و شکل ۵ میت وان گفت افزایش میزان رواناب ارتباط مستقیمی با میزان افزایش بارش دارد بطوریکه در فصول زمستان و بهار که این افزایش بارش بیشتر است افزایش رواناب نیز بیشتر می شود.

آماری و سناریوهای ویژه تغییر اقلیم برای دوره آینده استفاده نمود و خروجیهای آن را جهت مطالعه تغییر اقلیم در مقیاس محلی و منطقه‌ای به کار برد. در مجموع در اکثر ماههای سال با افزایش دما در دوره های آتی مواجه هستیم دامنه افزایش دما در حوضه مورد مطالعه بین ۲.۲۵ تا ۲.۲ درجه سانتیگراد به ترتیب در ماه های آوریل و نوامبر خواهد بود. با توجه به مطالعات انجام شده در سطح جهان، اکثر مدل‌های اقلیمی برای نیمکره شمالی افزایش دما را تایید میکنند. مطالعات عباسی و همکاران (۲۳۱۴)، روشن و همکاران (۲۳۴۲) و دیگر مطالعات انجام شده در کشور افزایش میانگین دما برای دوره‌های آتی نشان دادند. در نهایت این نتیجه‌گیری کلی را میتوان ارائه نمود که، این افزایش دما میتواند باعث طولانیتر شدن فصل رشد و نمو گیاهان در حوضه شده و همچنین اثر دما بر منابع آب از طریق تشدید تبخیر افزایش یافته و از کم و کیف منابع آب خواهد کاست. در این تحقیق، جهت انجام بررسی تغییرات رواناب در دوره های آتی، از مدل بارش رواناب IHACRES استفاده شده است. پس کالیبراسیون و صحت سنجی مدل میزان افزایش رواناب در دوره های آتی متناسب با میزان افزایش بارش بود. میزان افزایش فصلی رواناب در آینده بیشتر در فصول زمستان و بهار رخ خواهد داد، این بیشینه رواناب در دوره پایه در ماه آوریل است که با توجه به تغییرات اقلیمی این بیشینه به ماه مارس در دوره آتی انتقال خواهد یافت. در دوره آتی بدلیل افزایش دما، با کاهش بارش به شکل برف و همچنین ذوب زودرس برف در سال مواجه خواهیم بود. این امر بر جریان رودخانه ها در فصل زمستان و بهار تاثیر خواهد گذاشت و سیالیهای زمستانه و بهاره دور از انتظار نخواهد بود.

شکل ۸ نشان دهنده تخمین خشکسالی های هیدرولوژیکی در دوره آتی با استفاده از این شاخص است. همانگونه که مشخص است احتمال وقوع خشکسالی بسیار شدید در سال ۲۲۹۵ به میزان $SDI = -2,74$ می باشد. همچنین احتمال وقوع خشکسالی شدید در سال های ۲۲۶۲ و ۲۲۵۵ و خشکسالی ملایم در سال ۲۲۹۶ نیز وجود دارد. با توجه به نمودارها و مقایسه آنها با یکدیگر می توان گفت شدت خشکسالی ها با توجه به تغییرات اقلیمی بیشتر می شود.



شکل ۸- نمودار شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره آتی

نتیجه گیری

در نهایت پس از انجام مطالعات و بررسی ها و آزمون و خطا نتایج زیر حاصل گردید: مدل الرس توانمندی خوبی در شبیه‌سازی سری زمانی متغیرهای هواشناسی ایستگاههای تحت بررسی را دارد. بنابراین میتوان از مدل الرس جهت تولید دادههای گمشده، تطویل دادههای روزانه بر اساس رفتار دوره دیدبانی و نیز برای تولید دادههای روزانه با استفاده از رفتار دوره

منابع

- Richardson, C.W. and Wright, D.A. (۱۹۸۴), WGEN: a model for generating daily weather variables, Report, United States Department of Agriculture, Agriculture Research Service, ARS-۸. ۸۳p.
- Salon S, Cossarini G, Libralato S, Gao X, Solidoro S, Giorgi F (۲۰۰۸) Downscaling experiment for the Venice lagoon. I. Validation of the present-day precipitation climatology. *Clim Res* ۳۸:۳۱-۴۱
- Semenov M. A. and Stratonovitch P. ۲۰۱۰. The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change. *Climate Research*. ۴۱(۱):۱-۱۴.
- Semenov, M., A. and Barrow, E., M. (۲۰۰۲), LARS-WG A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, Version ۳,۰, User Manual.
- Semenov, M., A. and Brooks, R., J. (۲۰۰۲), Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain, *CLIMATE RESEARCH*, Vol. ۱۱: ۱۳۷-۱۴۸.
- Semenov, M.A. ۲۰۰۸. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, ۳۵: ۲۰۳-۲۱۲.
- Semenov, M.A., and Barrow, E.M., ۲۰۰۲: LARS-WG a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User's manual, Version ۳,۰.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. and Richardson, C.W. (۱۹۹۸), "Comparison of the WGEN and LARS WG stochastic weather generators for diverse climates", *Climate Research*, ۱۰, pp. ۹۵-۱۰۷.

- Sharma, B.R., and Smakhtin, V.U. ۲۰۰۴. Potential of water harvesting as a strategic tool for drought mitigation, International Water Management Institute, ۲۴p. (In Persian). the Intergovernmental Panel on Climate Change. pp. ۲-۱۷.
- Smakhtin, V. U., and Hughes, D.A., ۲۰۰۴. Review, Automate Estimation and Analysis of Drought Indices in South Asia. IWMI Working Paper ۸۳.
- Steele- Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, Sh., Hanafin, J. and Nolan, P. (۲۰۰۸). "The impacts of climate change on hydrology in Ireland". Journal of Hydrology, ۳۵۶ (۱-۲): ۲۸-۴۵.
- Taesombat, W. and N. Sriwongsitanon. ۲۰۱۰. Flood Investigation in the Upper Ping river basin using mathematical models. Kasetsart Natural Science, ۴۴: ۱۵۲- ۱۶۶.
- Tigkas.D, Vangelis.H, Tsakiris.G(۲۰۱۲)Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds, Science of the Total Environment ۴۴۰ (۲۰۱۲) ۳۳-۴۱.
- Trambly, Y., Badi, W., Driouech, F., Adlouni, S. El., Neppel, L. and Servat, E., ۲۰۱۲, Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco, Global and Planetary Change, ۸۳, ۱۰۴-۱۱۴.
- Vaze, J., D.A. Post, F.H.S. Chiew, J.M. Perraud, N.R. Viney and J. Teng. ۲۰۱۰. Climate non- stationarity- validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. Hydrology, ۳۹۴: ۴۴۷-۴۵۷.
- Xu et al, ۱۹۹۹. Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments. October ۱۹۹۹, Volume ۱۳, Issue ۵, pp ۳۶۹-۳۸۲
- Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y. and Kanani, R., ۲۰۱۱, Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran, Global and Planetary Change, ۷۸, ۱۳۷- ۱۴۶.

Assessing the Impact of Climate Change on Drought (Case Study: Part of the Karoon Basin)

Milad Moradzadeh^۱ ; Hadi Pourhosein^۲

^۱ MSc, water resources engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

^۲ MSc., water resources engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

Introduction

Climate change, a global phenomenon driven by the relentless accumulation of greenhouse gases in the Earth's atmosphere, has emerged as a paramount threat to sustainable development. Its far-reaching consequences extend to various interconnected systems, including water resources, agriculture, the environment, industry, health, and the economy. Understanding the intricate interplay between climate change and these systems is crucial for devising effective adaptive strategies to mitigate and manage its adverse impacts. In this context, the Roude Zard watershed, a vital water resource region in Iran, serves as a compelling case study for scrutinizing the projected effects of climate change. The watershed's susceptibility to hydrological drought, a prolonged period of insufficient rainfall leading to water scarcity, underscores the urgency of assessing potential climate-driven changes in this crucial water resource. The primary objective of this study is to delve into the projected effects of climate change on temperature, precipitation, runoff, and ultimately, hydrological drought in the Roude Zard watershed. By employing a comprehensive methodology encompassing historical data analysis, climate modeling, rainfall-runoff modeling, and drought index assessment, we aim to unravel the intricate relationship between climate change and the watershed's water resources. To evaluate the intensity of hydrological drought, we employ the Standardized Precipitation Index (SPI), a drought index that quantifies the deviation of precipitation from its long-term average. By comparing SPI values to standardized drought thresholds, we can assess the severity of drought episodes and their potential impact on water resources availability.

Methodology

To achieve the study's objectives, a comprehensive methodology was employed, incorporating historical data analysis, climate modeling, rainfall-runoff modeling, and drought index assessment. Historical data from ۱۹۷۱ to ۲۰۰۰ served as a baseline for assessing future climate conditions under three representative concentration pathways (RCPs) – RCP۲,۶, RCP۴,۵, and RCP۸,۵ – which represent different greenhouse gas emission scenarios. The Local Adaptive Regional Climate Model (LARS-WG) was employed to project future temperature and precipitation changes in the Roude Zard watershed. LARS-WG is a state-of-the-art regional climate model that effectively simulates climate variables at a finer spatial scale than global climate models. The simulations were conducted using historical and projected emission scenarios to generate future climate projections for the study area. The IHACRES model, a well-established rainfall-runoff model, was utilized to simulate runoff under the projected climate conditions. IHACRES incorporates various factors, including topography, land use, and soil characteristics, to accurately predict runoff patterns. The model was calibrated using historical data from ۱۹۹۷ to ۱۹۹۰ and ۱۹۸۹ to ۱۹۷۴ to ensure its reliability for future projections. To assess the intensity of hydrological drought, the Standardized Precipitation Index (SPI) was employed. SPI is a drought index that quantifies the deviation of precipitation from its long-term average, providing a standardized measure of drought severity.

Conclusion

The study's findings reveal significant changes in temperature and precipitation patterns under the projected climate scenarios. Mean annual temperature is expected to increase by approximately ۱,۰۲ degrees Celsius, while precipitation patterns are projected to shift

towards a more distinct seasonal distribution. The months of January, February, and March are anticipated to experience an increase in precipitation, while September and October are projected to experience a decline. Simulations using the IHACRES model indicate alterations in runoff patterns under climate change. Runoff is projected to increase during the months of January, February, and March, while a decrease is expected in September and October. These changes in runoff patterns are attributed to the anticipated temperature and precipitation shifts. The SPI index, used to evaluate drought intensity, revealed a projected increase in drought frequency and severity in the future compared to the baseline period. This suggests that hydrological drought is likely to become a more prevalent and impactful phenomenon in the Roude Zard watershed under climate change. The study's findings underscore the profound impact of climate change on the Roude Zard watershed. Projected increases in temperature, changes in precipitation patterns, and a rise in drought intensity pose significant challenges to water resource management, agriculture, and the environment in the region. These findings emphasize the need for adaptation strategies to mitigate the negative consequences of climate change and promote sustainable development in the Roude Zard watershed. The study's findings contribute to the body of knowledge on climate change impacts and provide valuable insights for water resource management and adaptation planning in the Roude Zard watershed. The results can inform decision-making processes aimed at enhancing water security, promoting sustainable water use practices, and developing effective drought mitigation strategies in the region. In addition, the study's methodology and modeling approaches can serve as a foundation for similar studies in other watersheds facing similar climate change threats. Overall, the study highlights the urgency of addressing climate change and its implications for water resources management and sustainable development in the Roude Zard watershed. By understanding the projected impacts and developing adaptation strategies, stakeholders can effectively manage water resources, minimize the risk of drought, and promote sustainable practices for the future.

Keywords

Rainfall-runoff; LARS-WG; Climate change; Fine-scale; SDI index