

بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های حداکثر و حداکثر سیلاب محتمل رودخانه کارون

زهره رامک^{۱*}، جهانگیر پرهمت^۲، حسین صدقی^۳، ابراهیم فتاحی^۴ و مهران زند^۵

(۱) دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

(۲) دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری.

(۳) استاد، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

(۴) دانشیار پژوهشکده هواشناسی.

(۵) عضو هیئت علمی سازمان تحقیقات کشاورزی.

* نویسنده مسئول: z_ramak@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۵/۳۱

چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان را در روی زمین تحت تاثیر قرار داده است و یکی از آثار آن، تاثیر بر وقایع حدی (سیلاب و خشکسالی) می‌باشد. امروزه یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بحث این است که در آینده شدت بارش‌های سنگین و سیلاب‌ها نسبت به دوره کنونی چگونه تغییر خواهد کرد. در این تحقیق تلاش شده است تا تاثیر این پدیده بر بارش‌های حدی و حداکثر سیلاب محتمل (PMF) رودخانه کارون در محل پل شالو مورد بررسی قرار گیرد. برای اینکار، دما و بارش دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۹) با استفاده از مدل HadCM3 و بر اساس سناریوهای انتشار A2، A1B و B1 و مدل ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG شبیه‌سازی شده است. در گام بعدی حداکثر بارش محتمل حوضه به روش سینوپتیکی برآورد و پس از آن، با استفاده از مدل بارش-رواناب HEC-HMS و مدل ذوب برف SRM، حداکثر سیلاب محتمل این حوضه برآورد و در نهایت تاثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های حداکثر و نیز حداکثر سیلاب محتمل این حوضه بررسی شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که حداکثر بارش محتمل حوضه در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ نسبت به دوره کنونی تحت سناریوی A1B، با ۵ درصد کاهش و تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب با ۵ درصد و ۱۰ درصد افزایش روبه‌رو خواهند شد. همچنین پیش‌بینی می‌شود سهم سیلاب ناشی از ذوب برف در مطالعات PMF، تحت سه سناریوی ذکر شده به ترتیب ۱/۲۴، ۱/۵۸ و ۱/۲۳ برابر افزایش داشته باشد. به همین ترتیب حداکثر سیلاب محتمل (PMF) این حوضه در تداوم‌های مختلف تحت سناریوی A1B کاهش و تحت سناریوی A2 و B1 افزایش خواهد داشت و شدت تغییرات تحت سناریوی B1 شدیدتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، بارش‌های حدی، حداکثر سیلاب محتمل، مدل HEC-HMS و مدل SRM.

مقدمه

گرم شدن زمین و تاثیر آن بر چرخه آب مسئله‌ای است که امروزه تمام دانشمندان علوم جوی بر روی آن اتفاق نظر دارند. هیئت بین‌دول تغییر اقلیم (IPCC) با قطعیت بالا (احتمال ۹۹ درصد) گزارش کرده است که دمای سطح خشکی و آب در کره زمین از قرن ۱۹ تاکنون به میزان ۰/۴ تا ۰/۷۸ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است. همچنین در مقیاس جهانی از سال ۱۹۹۰ تاکنون شاهد ۱۰ سال گرم بوده‌ایم که از سال ۱۸۶۰ تاکنون بی سابقه بوده است (Muttiah and Wurbs, 2002). طبق گزارش‌های IPCC گرمایش مشاهده شده در چند دهه اخیر منجر به تغییرات سیکل هیدرولوژی در مقیاس بزرگ مانند افزایش مقدار تبخیر، تغییر در الگوی بارش، شدت یافتن وقایع حدی، کاهش سطح برف و ذوب سریع یخ، تغییرات در رطوبت خاک و رواناب شده است (Barrow et al., 1996) بطوریکه که احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی مانند سیلاب افزایش یافته است (IPCC, 2007). از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیانباری را برای جوامع بشری در پی داشته باشد در سال‌های اخیر، تحقیق در مورد این موضوع برای حوضه‌های آبریز مختلف در سطح کره زمین مدنظر قرار گرفته است (Kundzewicz et al., 2007). موضوع مهم این مطالعات این است که ممکن است اثر تغییر اقلیم بر خسارات ناشی از سیل بسیار قابل توجه باشد، اما این موضوع به سناریوهای اقلیمی مورد استفاده بستگی دارد (Nigel et al., 2013). دلایلی وجود دارد که نشان می‌دهد گرمایش جهانی می‌تواند منجر به افزایش مقادیر PMP گردد. اول اینکه رابطه Clausius-Clapeyron نشان می‌دهد که فشار بخار آب اشباع با دما افزایش می‌یابد، بنابراین سیستم تولید بارش می‌تواند بارش بیشتری تولید کند. دوم اینکه گرمایش ممکن است منجر به افزایش طول دوره فصل همرفتی یعنی زمانی که بیش‌ترین وقایع بارش حدی اتفاق می‌افتد شود (Kunkel et al., 2013). موضوع دیگر این است که افزایش رواناب در فصل پرآب، می‌تواند خطر وقوع سیلاب را بالا ببرد (IPCC, 2007). لذا حداکثر سیلاب محتمل در رودخانه‌ها (PMF) که یکی از معیارهای مهم طراحی سازه‌های هیدرولیکی می‌باشد بر حسب این پدیده تغییر خواهد کرد. Alfieri و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات سیلاب‌های قرن حاضر را در اروپا بررسی کردند و با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب، مقادیر دبی پیک را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج این تحقیق دو برابر شدن مقادیر سیلاب با دوره برگشت بیشتر از ۱۰۰ سال را در طول سه دهه در اروپا نشان می‌دهد. Nigel و همکاران (۲۰۱۳) در تحقیقی تغییرات بزرگی و دوره بازگشت پیک سیلاب‌ها را در مقیاس جهانی با استفاده از مدل HadCM3 و سناریوی A1B مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنها در ۴۰ درصد مناطق، سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در سال ۲۰۵۰ حداقل دو بار اتفاق می‌افتد و میزان تغییرات خطر سیل بین ۹٪- تا ۳۷۶٪+ خواهد بود. Whetton و همکاران (۱۹۹۳) در تحقیقی نشان دادند که با دو برابر شدن مقدار CO₂، فراوانی رخدادهای بارش سنگین افزایش و فراوانی رخدادهای کم-

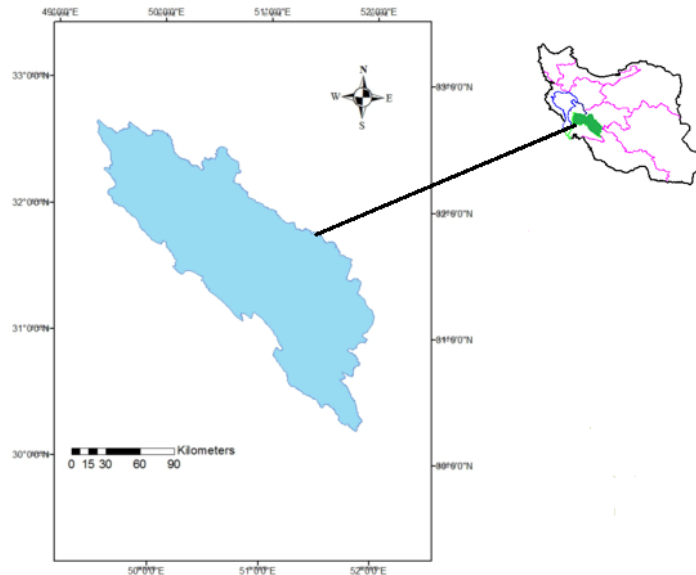
بارش کاهش می‌یابد. همچنین نشان دادند دوره بازگشت رخداد‌های بارش سنگین در استرالیا کاهش می‌یابد. Schreider و همکاران (۲۰۰۰) تغییرات پتانسیل خسارت رخداد‌های سیل ناشی از افزایش غلظت CO₂ را در سه حوضه رودخانه Hawkesbury-Nepean و Quean beyan و Upper Parramatta در جنوب استرالیا بررسی کردند. در این تحقیق سناریوهای تغییر اقلیم مدل‌های GCM، تغییرات کمی را در خسارت مربوط به سیلاب شهری پیش‌بینی کردند در حالیکه با سناریوی دو برابر شدن CO₂ خسارت بیش‌تری تخمین زده شد. Cameron و همکاران (۲۰۰۰) اثرات تغییر اقلیم را بر فراوانی سیلاب‌های شهری در حوضه‌هایی در کشورهای ولز و انگلستان مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از مدل HADCM2 و سناریوی تغییر اقلیم UKCIP98 استفاده شده است و نشان داده شد درحالی‌که استفاده از این سناریو تغییرات کمی را در فراوانی سیلاب‌های سنگین نشان می‌دهد ولیکن دوره بازگشت سیلاب‌ها تغییر می‌کند. حجاری زاده و همکاران (۱۳۹۱) در تحقیقی نشان دادند که بارش‌های حدی در حوضه آبریز بختیاری با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهند داد که این امر نشان‌دهنده افزایش وقوع سیلاب‌ها در دوره آتی خواهد بود. دودانگه و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی اثر تغییر اقلیم روی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود نشان دادند که روند مجموع بارش سالانه و بارش حداکثر ۲۴ ساعته در تعداد کمی از ایستگاه‌ها معنی‌دار است، در حالیکه در مورد جریان‌های حداقل و سیل، این نسبت بالاتر است. آشفته و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی تاثیر پدیده تغییر اقلیم را بر رژیم سیلاب (شدت و فراوانی) حوضه آید و غموش مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از برآزش توزیع احتمالاتی به سری سیلاب حداکثر سالانه و مقایسه شدت سیلاب‌های با دوره بازگشت‌های مختلف با دوره مشاهداتی، حاکی از تاثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب این حوضه در دوره‌های آتی می‌باشد. با توجه به اهمیت حوضه کارون بعنوان یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران از نظر آبدی و وجود سازه‌های هیدرولیکی ساخته شده و در حال اجرای در این حوضه، چگونگی تاثیر تغییر اقلیم روی ابعاد این سازه‌ها و برنامه‌ریزی‌های لازم در این خصوص، حائز اهمیت می‌باشد. لذا هدف از تحقیق حاضر، بررسی تاثیر این پدیده روی بارش‌های حدی و حدکثر سیلاب محتمل این رودخانه در محل پل شالو می‌باشد. برای این منظور ابتدا حداکثر بارش محتمل (PMP) و سپس حداکثر سیلاب محتمل (PMF) برآورد و پس از آن تاثیر تغییر اقلیم روی بارش‌های حداکثر و نیز حداکثر سیلاب محتمل بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون که در جنوب غربی ایران واقع است، یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز ایران از لحاظ گوناگون از جمله آبدی، کشاورزی و از این قبیل می‌باشد. رودخانه کارون از مرتفع‌ترین قله سلسله جبال زاگرس سرچشمه می‌گیرد

و به خلیج فارس می‌ریزد. شاخه کارون متشکل از سه شعبه عمده کارون علیا، بازفت و خرسان مساحتی در حدود ۲۴ هزار کیلومتر مربع را در محل پل شالو زهکشی می‌کند. شکل زیر موقعیت جغرافیایی این حوضه را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

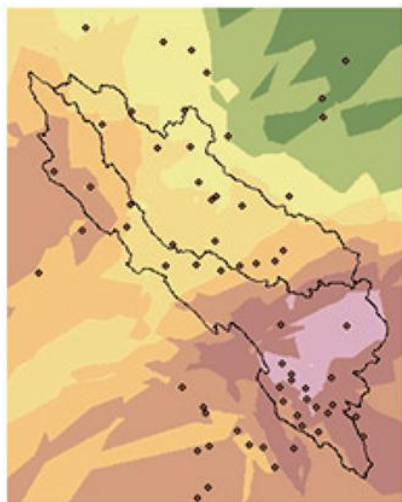
روش‌ها

برای انجام تحقیق حاضر، در ابتدا حداکثر بارش محتمل حوضه (PMP) برای تداوم‌های مختلف، به روش سینوپتیکی برآورد شد، سپس با استفاده از مدل بارش-رواناب HEC-HMS و مدل ذوب برف SRM حداکثر سیلاب محتمل (PMF) حوضه تخمین زده شد. در مرحله بعد با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG و روش عامل تغییر (Change factor) پارامترهای دما و بارش خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 ریزمقیاس شد و با معرفی مقادیر دما و بارش کوچک مقیاس شده به مدل‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده، تاثیر تغییر اقلیم بر حداکثر سیلاب محتمل رودخانه تخمین زده شد.

داده‌ها

داده‌های مورد نیاز این تحقیق، داده‌های مربوط به ۷۳ ایستگاه باران سنجی و داده‌های هواشناسی نظیر دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، ساعات آفتابی، سرعت باد، دمای نقطه شبنم، فشار، سطح پوشیده از برف و داده‌های هیدرومتری می‌باشد. ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده برای استخراج اطلاعات فوق، ایستگاه‌های سینوپتیک اهواز، آبادان، دزفول، آغاچاری، مسجدسلیمان، امیدیه، شهرکرد، یاسوج و ایستگاه هیدرومتری پل شالو می‌باشد. این اطلاعات از سازمان

هواشناسی و وزارت نیرو اخذ شدند. نقشه زیر موقعیت ایستگاه‌های بارانسنجی مورد استفاده را روی نقشه منطقه نشان می‌دهد.



شکل ۲: موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی

برآورد حداکثر بارش محتمل

پس از بررسی دقیق آمار روزانه بارش ایستگاه‌های حوضه و مقایسه آن با دبی ایستگاه هیدرومتری، تعداد هفت طوفان که دارای بارش و دبی حداکثر بودند، شناسایی و استخراج شد. سپس جهت توزیع مکانی بارندگی طوفان‌ها با استفاده از روش زمین آماری کریجینگ و مدل واریوگرام نیمه نمایی، سطوح همبارش طوفان‌ها در محیط GIS برای تداوم‌های مختلف ترسیم و با استفاده از روش DAD متوسط بارش برای طوفان‌های منتخب برآورد شد. در مرحله بعد، پس از استخراج حداکثر دمای نقطه شبنم دوازده ساعته پایدار در دوره های ۱۰ روزه برای ایستگاه‌های آبادان، دزفول، اهواز، امیدیه، مسجدسلیمان و آغاچاری در یک دوره بلندمدت، برای این داده‌ها تحلیل فراوانی صورت گرفت. سپس با استفاده از توزیع لوگ نرمال به عنوان مناسب‌ترین توزیع احتمالات برای کمیت مذکور، دمای نقطه شبنم برای دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از نرم افزار Hyfa استخراج و براساس توصیه های سازمان هواشناسی جهانی دمای نقطه شبنم دوازده ساعته پایدار با دوره برگشت ۵۰ ساله برای محاسبه ضریب بیشینه سازی انتخاب شد. پس از آن به منظور بهینه‌سازی رطوبت، با استفاده از دیاگرام Skew-T-Log-P حداکثر دمای نقطه شبنم طوفان و حداکثر دمای نقطه شبنم با دوره برگشت ۵۰ ساله به سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال انتقال و با توجه به جداول پیشنهادی سازمان هواشناسی جهانی، آب قابل بارش برای هر یک از طوفان های منتخب و برای ایستگاه‌های مورد مطالعه محاسبه شد.

برای محاسبه ضریب بیشینه سازی رطوبت، از رابطه عمومی نسبت آب قابل بارش برای حداکثر دمای نقطه شبنم با تداوم ۱۲ ساعته پایدار با دوره بازگشت ۵۰ ساله در دوره ده روزه به آب قابل بارش برای حداکثر دمای نقطه شبنم با تداوم ۱۲ ساعته در روزهای طوفان موردنظر استفاده شده است. ضریب بیشینه طوفان با توجه به عناصر اقلیمی که جریان رطوبت ورودی به درون طوفان را تامین می‌کند و مقدار بارش را به حداکثر می‌رساند، محاسبه می‌شود. در واقع ضریب بیشینه-سازی طوفان، پتانسیل حداکثر آب قابل بارش است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$FM = MP \times MW \quad \text{رابطه ۱:}$$

که در آن، FM ضریب بیشینه‌سازی طوفان با حداکثر جریان ورودی رطوبت، MP ضریب حداکثر آب قابل بارش براساس دمای نقطه شبنم ۱۲ ساعته پایدار و MW ضریب حداکثر سرعت باد ۱۲ ساعته پایدار می‌باشد. در تحقیق حاضر با توجه به یکسان بودن رطوبت در منبع رطوبتی و منطقه تحت مطالعه و بالا بودن تاثیر همزمان هر دو عامل بیشینه‌سازی، ضریب باد در محاسبه‌ها حداکثر بارش محتمل اعمال نشده است. در واقع با اعمال فاکتور باد در محاسبات، حداکثر بارش محتمل بسیار بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شود. بنابراین در رابطه بالا، $MW = 1$ فرض می‌شود و فاکتور بیشینه-سازی نهایی برابر با فاکتور بیشینه‌سازی رطوبت می‌باشد.

الگوی توزیع زمانی بارش

در روند تبدیل حداکثر بارش محتمل به حداکثر سیل محتمل، تعیین الگوی توزیع زمانی بارش در ایستگاه‌ها و منطقه تحت مطالعه ضروری است. برای اینکار، ابتدا داده‌های بارش چند طوفان با تداوم‌های زمانی متفاوت به صورت بی بعد ترسیم شدند. برای بی بعد کردن داده‌های هر طوفان، مقدار عمق تجمعی بارش تا گام زمانی موردنظر به کل عمق بارش طوفان تقسیم شد. همین روش برای بی بعد کردن محور زمان انجام گرفت. با بررسی داده‌های بارندگی ایستگاه‌های ثبات حوضه مشخص شد در اکثر ایستگاه‌ها ۱۰ درصد بارندگی در ربع زمانی اول، ۳۰ درصد بارندگی در ربع زمانی دوم، ۴۰ درصد بارندگی در ربع زمانی سوم و ۲۰ درصد بارندگی در ربع زمانی چهارم به وقوع پیوسته است.

تولید سناریوی اقلیمی برای دوره آتی

بیش تر پیش‌بینی‌های اقلیمی بر اساس شبیه‌سازی مدل‌های چرخه عمومی جو بیان می‌شوند. مدل‌های GCM در مقیاس مکانی، معمولاً جو را به ۵ تا ۲۰ لایه نامساوی شبکه‌بندی می‌کنند و لایه‌های نزدیک به سطح زمین فاصله کمتری دارند (Ghorbanizadeh *et al.*, 2010). در این پژوهش از خروجی مدل HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley انگلستان استفاده شده است.

سناریوهای انتشار

IPCC تاکنون سناریوهای متفاوتی را ارائه نموده که SRES (Special Report On Scenario) از جدیدترین آنها می‌باشد. در مجموع ۴۰ زیرسناریوی متفاوت SRES که در برگیرنده طیف وسیعی از تغییرات رشد جمعیت انسان در آینده، عوامل اقتصادی و تکنولوژیکی موثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق می‌باشد ارائه شده است (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۴). در این تحقیق از سه سناریوی انتشار A1B، A2، و B1 جهت بررسی تغییرات دما و بارش استفاده شده است.

تولید سناریوی تغییر اقلیم

به منظور حذف اغتشاشات در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM، معمولاً بجای استفاده مستقیم از داده‌های مدل در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای ۳۰ ساله این داده‌ها استفاده می‌شود. لذا برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل مقادیر "اختلاف" برای دما رابطه ۲ و "نسبت" برای بارندگی رابطه ۳ برای متوسط درازمدت هر ماه در دور ه آتی (در این تحقیق ۲۰۳۹-۲۰۱۱) و دوره شبیه سازی شده پایه توسط همان مدل (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای هر سلول از شبکه محاسباتی محاسبه می‌شود (Jones and Hulme, 1996).

$$\Delta T = (\bar{T}_{GCM, fut} - \bar{T}_{GCM, base}) \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$\Delta P = \left(\frac{\bar{P}_{GCM, fut}}{\bar{P}_{GCM, base}} \right) \quad \text{رابطه ۳:}$$

در (رابطه ۲) $\bar{T}_{GCM, fut}$ میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره‌های آتی (مانند ۲۰۳۹-۲۰۱۱)، \bar{T}_{base} میانگین ۳۰ ساله دمای شبیه سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۱۹۶۱ یا ۲۰۰۰-۱۹۷۱) می‌باشد. (رابطه ۲) مربوط به بارندگی (P) بوده و در آن تمامی زیرنویس‌ها شبیه به (رابطه ۱) معرفی می‌شود.

کوچک مقیاس کردن مکانی

یکی از مشکلات عمده در استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آن‌ها به لحاظ مکانی نسبت به منطقه مورد مطالعه می‌باشد (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۴). در این تحقیق به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌ها به لحاظ مکانی از مدل آماری LARS-WG استفاده شده است. مدل LARS-WG مولد مصنوعی داده‌های آب و

هوایی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده بکار رود. خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره آماری بوده اما انحراف معیار آنها به نسبت اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره آینده و گذشته پراشیده می‌شود. داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه برای یک سری متغیرهای اقلیمی مناسب برای مثال بارش، دمای کمینه و بیشینه و تابش (مگاژول بر متر مربع) ایجاد می‌شوند (Semenov and Brooks, 1998). پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی مدل و قابلیت آن در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، این مدل برای ریزمقیاس کردن داده‌های مدل گردش عمومی جو HADCM3 و تولید یا شبیه سازی داده‌های اقلیمی دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ با استفاده از سناریوهای A1B و A2 و B1 اجرا شد و مقادیر روزانه پارامترهای اقلیمی تولید شد.

کوچک مقیاس کردن زمانی

در این تحقیق به منظور کوچک مقیاس کردن داده‌های طرح به لحاظ زمانی از روش عامل تغییر (change factor) استفاده شده است. در این روش برای بدست آوردن سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده، از روابط ۴ و ۵ استفاده می‌شود (Barrow *et al.*, 1996; Diaz-Nieto and Wilby, 2005).

$$T = T_{obs} + \Delta T \quad \text{رابطه ۴:}$$

$$P = P_{obs} \times \Delta P \quad \text{رابطه ۵:}$$

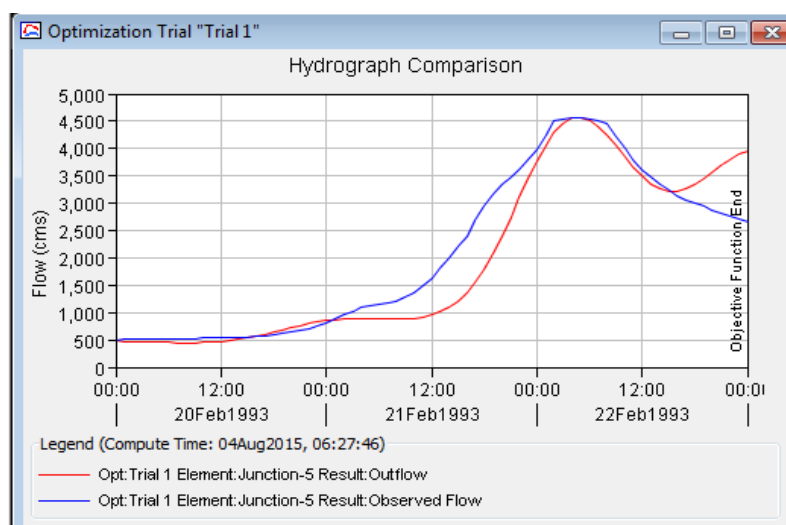
در رابطه بالا T_{obs} بیانگر سری زمانی دمای مشاهداتی (ماهانه) در دوره پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۱)، T سری زمانی دما حاصل از پدیده تغییر اقلیم در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۹) و ΔT سناریوی تغییر اقلیم کوچک مقیاس شده می‌باشد. در (رابطه ۵) برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

مدل بارش-رواناب

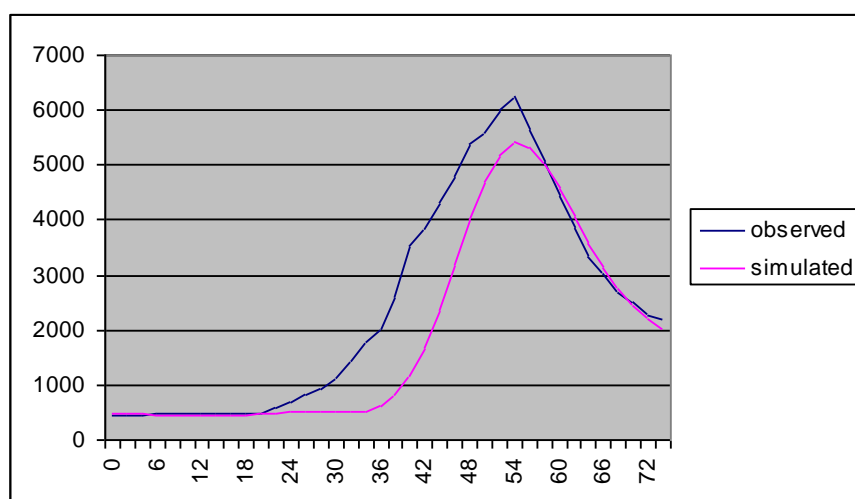
در تحقیق حاضر جهت تبدیل بارش به رواناب از مدل HEC-HMS استفاده شده است. از بین طوفان‌های بحرانی، چند طوفان که از نظر کمیت و کیفیت اطلاعات داده‌های پایه نسبتاً کامل بودند برای واسنجی مدل انتخاب شدند. برای نمونه، در شکل ۲ و شکل ۳ هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای طوفان ۲ اسفند ۱۳۷۶ و طوفان ۲۶ اسفند ۱۳۷۶ در ایستگاه هیدرومتری پل شالو برای واسنجی و اعتباریابی مدل نشان داده شده است. مقایسه بین هیدروگراف‌ها نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهده‌ای وجود دارد.

ذوب برف

در این مطالعه جهت تعیین سهم ذوب برف در محاسبات مربوط به حداکثر سیلاب محتمل، طبق توصیه Debs و همکاران (۱۹۹۹) و نیز USBR از یک سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله مربوط به ذوب برف استفاده شد. برای این منظور از مدل ذوب برف SRM استفاده شد و ایستگاه هواشناسی شهرکرد به عنوان ایستگاه هواشناسی مبنا و ایستگاه هیدرومتری پل شالو بعنوان ایستگاه هیدرومتری مبنا انتخاب شد.



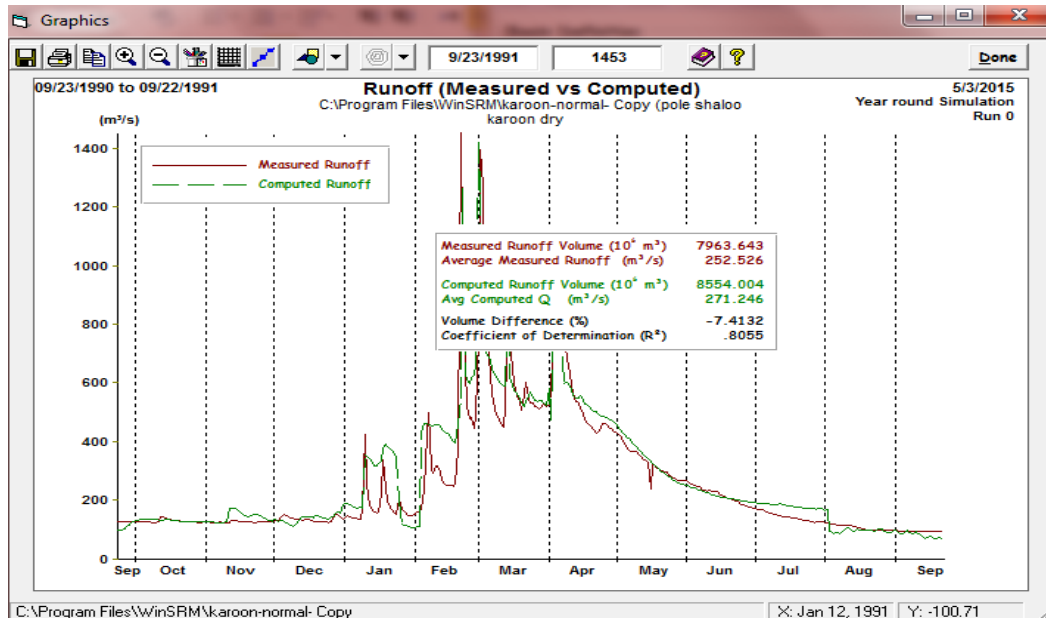
شکل ۳: هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسبه‌ای طوفان ۲ اسفند ۱۳۷۶



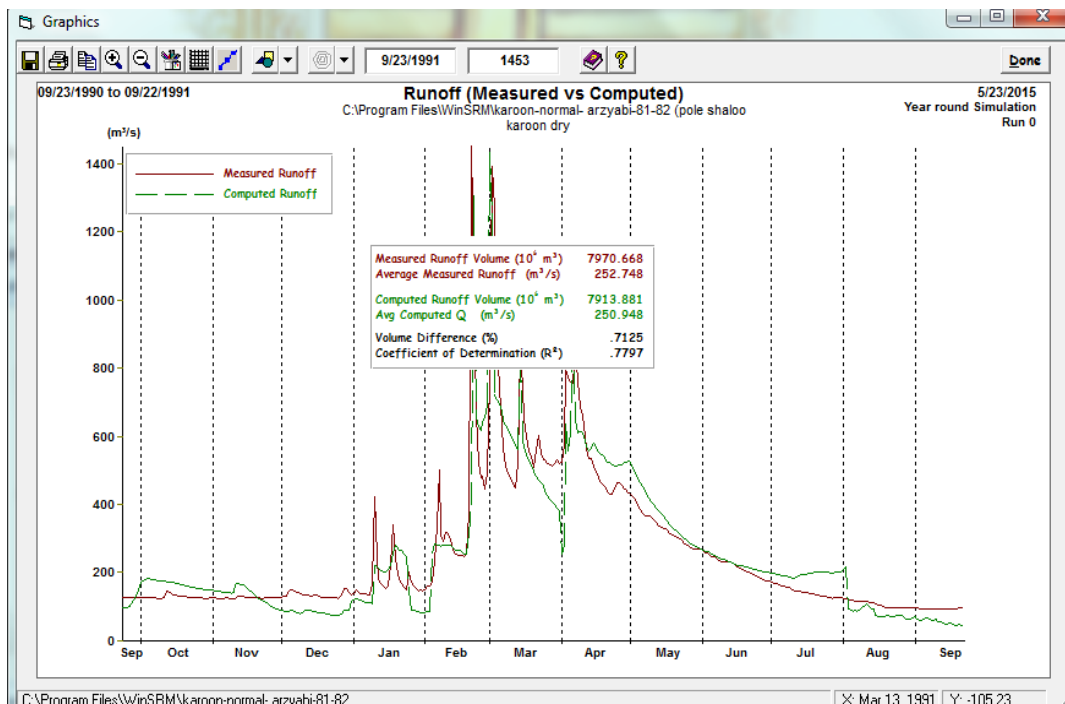
شکل ۴: هیدروگراف مشاهده‌ای و محاسباتی طوفان ۲۶ اسفند ۱۳۷۶

سال‌های آبی ۸۰-۸۱ و ۷۷-۷۸ به دلیل کامل‌تر بودن داده‌های سطح پوشش برف به ترتیب برای واسنجی و ارزیابی مدل SRM انتخاب شدند. ضریب تعیین برای دوره واسنجی حدود ۰/۸ و برای دوره ارزیابی ۰/۷۷ و درصد اختلاف حجمی

دبی برآوردی و مشاهده ای برای دوره‌های مذکور به ترتیب ۷- و ۰/۷۷ می‌باشد که نشان دهنده عملکرد مناسب مدل می‌باشد. (شکل ۴) و (شکل ۵) مقایسه هیدروگراف‌های ناشی از ذوب برف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را برای دوره‌های واسنجی و ارزیابی نشان می‌دهند.



شکل ۵: کالیبراسیون مدل SRM برای سال آبی ۸۱-۸۰



کل ۶: ارزیابی مدل SRM برای سال آبی ۷۸-۷۷

نتایج و بحث

همان طور که گفته شد در این تحقیق حداکثر بارش محتمل به روش سینوپتیکی برآورد و با توجه به تغییرات دما و بارش در دوره آتی، حداکثر بارش محتمل دوره آینده برای تداوم‌های مختلف تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 پیش‌بینی شده است. جدول ۱ حداکثر بارش محتمل حوضه را در دوره حاضر و دوره آتی تحت شرایط تغییر اقلیم و سناریوهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱: عمق حداکثر بارش محتمل در سطح حوضه کارون در محل پل شالو در دوره آتی

دوره	PMP _{24HR}	PMP _{48HR}	PMP _{72HR}
Present	۱۲۷	۱۷۰	۱۸۵
A1B Scenario-۲۰۳۹-۲۰۱۱	۱۲۱	۱۶۲	۱۷۶
A2 Scenario-۲۰۳۹-۲۰۱۱	۱۳۳	۱۷۹	۱۹۴
B1 Scenario-۲۰۳۹-۲۰۱۱	۱۴۰	۱۸۷	۲۰۴

پس از واسنجی مدل HEC-HMS، با استفاده از این مدل، رواناب ناشی از حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته، ۴۸ ساعته و ۷۲ ساعته شبیه‌سازی شد. جدول ۲ مقایسه رواناب ناشی از بارش‌های حداکثر ۲۴ ساعته، ۴۸ ساعته و ۷۲ ساعته برای دوره کنونی و دوره آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۹) تحت شرایط تغییر اقلیم را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۳ مقایسه تغییرات حجم رواناب را برای دوره‌های مذکور نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقایسه درصد تغییرات رواناب ناشی از بارش‌های حداکثر دوره آینده با دوره کنونی تحت شرایط

تغییر اقلیم

دوره	درصد تغییر رواناب ناشی از حداکثر بارش ۲۴ ساعته	درصد تغییرات رواناب ناشی از حداکثر بارش ۴۸ ساعته	درصد تغییرات رواناب ناشی از حداکثر بارش ۷۲ ساعته
A1B Scenario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	٪-۱۵	٪-۱۰	٪-۹/۶
A2 Scenario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	٪+۱۶	٪+۶	٪+۵
B1- Scenario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	٪+۱۹	٪+۱۵	٪+۱۴

جدول ۳: مقایسه درصد تغییرات حجم رواناب ناشی از بارش‌های حداکثر دوره آینده با دوره کنونی تحت شرایط

تغییر اقلیم

دوره	درصد تغییر حجم رواناب ناشی از		درصد تغییر حجم رواناب ناشی از	
	حداکثر	حداکثر	حداکثر	حداکثر
	بارش ۲۴ ساعته	بارش ۴۸ ساعته	بارش ۷۲ ساعته	بارش ۷۲ ساعته
A1B Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%-۱۳	%-۱۰/۵	%-۹	
A2 Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%+۱۴	%+۸	%+۷	
B1- Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%+۱۷	%+۱۹	%+۱۶	

در مرحله بعد پس از کالیبراسیون مدل ذوب برف SRM، رواناب ناشی از ذوب برف با استفاده از این مدل، در دوره کنونی و آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۹) تحت سه سناریوی اقلیمی ذکر شده شبیه سازی شد و سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله با توزیع گامای دو پارامتری و روش گشتاور محاسبه شد. جدول ۴ مقادیر سیلاب ناشی از ذوب برف با دوره بازگشت ۱۰۰ سال در دوره کنونی و دوره آینده تحت شرایط تغییر اقلیم را نشان می‌دهد.

جدول ۴: نسبت تغییرات سیلاب با دوره بازگشت ۱۰۰ سال ناشی از ذوب برف در دوره آینده به دوره کنونی تحت

شرایط تغییر اقلیم

دوره	نسبت تغییرات
دوره آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) تحت سناریوی A1B	۱/۲۴
دوره آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) تحت سناریوی A2	۱/۵۸
دوره آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) تحت سناریوی B1	۱/۲۳

در نهایت، با اضافه کردن سهم ذوب برف به رواناب ناشی از بارش‌های حداکثر، حداکثر سیلاب محتمل حوضه در تداومها و دوره‌های مختلف به دست آمد. جدول ۵ درصد تغییرات حداکثر سیلاب محتمل رودخانه را تحت سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه نشان می‌دهد.

جدول ۵: مقایسه تغییرات حداکثر سیلاب محتمل در دوره آتی نسبت به دوره کنونی تحت سناریوهای مختلف

دوره	تغییرات حداکثر سیلاب محتمل ۲۴ ساعته	تغییرات حداکثر سیلاب محتمل ۴۸ ساعته	تغییرات حداکثر سیلاب محتمل ۷۲ ساعته
A1B Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%-۸	%-۶/۳	%-۶/۲
A2 Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%+۲۳	%+۱۰	%+۹
B1- Senario-۲۰۳۰-۲۰۱۱	%+۲۴/۵	%+۱۸	%+۱۷

نتیجه گیری

نتیجه این تحقیق نشان داد که در حوضه مورد مطالعه، تغییر اقلیم به طور چشم گیری باعث تغییر در بارش های حدی، ذوب برف و سیلاب ها خواهد شد. همان طور که در بخش نتایج مشاهده می شود حداکثر بارش محتمل حوضه آبریز، با تداوم های مختلف در آذر ماه بوقوع پیوسته اند که در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۹ در این ماه تحت سناریوی A1B مقدار بارش ۵ درصد کاهش، تحت سناریوی A2، ۵ درصد افزایش و تحت سناریوی B1، ۱۰ درصد افزایش می یابد. بر این اساس تغییرات حداکثر سیلاب محتمل برای دوره آتی تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 برای بارش با تداوم ۲۴ ساعت، به ترتیب ۸-، ۴- و ۶- درصد و برای بارش با تداوم ۴۸ ساعت، به ترتیب، ۲۳+، ۱۳+ و ۱۱+ درصد و برای بارش با تداوم ۴۸ ساعت، به ترتیب، ۲۴+، ۲۰+ و ۱۸+ درصد خواهد بود که این تغییر می تواند روی سازه هایی که بر اساس حداکثر سیلاب در گذشته طراحی شده اند و یا سازه هایی که در مسیر این رودخانه در دست اجرا هستند تاثیر گذار باشد. البته باید دقت شود که با توجه به وجود مدل های مختلف AOGCM، روش های کوچک مقیاس کردن، سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه ای در نتایج نهایی این تحقیق عدم قطعیت وجود دارد. همچنین باید توجه داشت که چگونگی شبیه سازی بارش- رواناب و مدل سازی ذوب برف و کالیبره کردن مدل ها می تواند بر نتایج نهایی حداکثر سیلاب محتمل تاثیر گذار باشد. بهر حال، با تغییر در شدت بارش های سنگین و طوفان ها، توصیه می شود که رویکرد مدیران منابع آب به سمت روش های مدیریت حوضه های آبخیز که تاثیر طوفان های شدید را کاهش و انعطاف پذیری در مدیریت آب را افزایش می دهد، بیشتر شود. علاوه بر آن، بعنوان پیشنهادات برای مطالعات آینده، توصیه می شود جهت کالیبراسیون مدل بارش- رواناب، از روش های تکاملی برای انجام بهینه سازی استفاده شود. همچنین استفاده از سایر مدل های بارش- رواناب، سایر مدل های AOGCM و نیز سایر سناریوهای انتشار و مقایسه با نتایج تحقیق حاضر برای تحقیقات آتی توصیه می شود.

سپاسگزاری

در پایان از آقای دکتر Mikhail Semenov سازنده مدل LARS-WG بدلیل دراختیار گذاشتن Registry Code و نیز از سازمان هواشناسی و وزارت نیرو بدلیل دراختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

- آشفته، پ.، مساح بوانی ع. (۱۳۸۹). تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۴، شماره ۵۳.
- حجاری زاده ز، فتاحی الف، مساح بوانی ع، ناصرزاده م. (۱۳۹۱). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدروگراف سیلاب در دوره‌های آتی، مطالعه موردی: حوضه آبریز بختیاری. جغرافیا (فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن جغرافیای ایران)، سال ۱۰، شماره ۲۴.
- دودانگه، الف، سلطانی س، سرحدی ع. (۱۳۹۰) بررسی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال ۱۵، شماره ۲۲۹.
- مساح بوانی، ع. و مرید س. (۱۳۸۴). اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد ۹، شماره ۲۸.

Barrow, E., Hulme, M. and Semenov, M. (1996). Effect of using different methods in the construction of climate change scenarios: examples from Europe. *Climate Research*, 7, 195-211.

Cameron, D, Beven, K. and Naden, K. (2000). Flood frequency estimation by continuous simulation under climate change (with uncertainty), *Journal of Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Copernicus Publications. 4 (3), pp.393-405

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical and climate change factor methods: impacts on low flows in the river Thames, united kingdom. *Journal of Climatic Change*, 69, 245-268.

IPCC. (2007). Impacts, Adaptation, and Vulnerability (Eds. ML Parry, OF Canziani, JP Palutikof, PJ van der Linden, CE Hanson). Cambridge University Press, UK.

IPCC. (2007). Summary for Policymakers, in: *Climate Change 2007*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, 1-18.

Jones, P. D. and Hulme, M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International journal of climatology*, 16, 361-377.

Kunkel, K., Karl, T., Easterling, D., Redmond, K., Young, J., Yin, X, and Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters*, 40, pp: 1402–1408.

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K. A., Oki, T., Sen, Z., and Shiklomanov, I. A.(2007). Freshwater resources and their management, in: *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Edited By: Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., Van Der Linden, P. J., And Hanson, C. E., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173–210.

Muttiah, R. S. and Wurbs, R. A. (2002). Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, 27(3): p. 407-419

Semenov, M. A., and Brooks, R. J. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10: 95-107.

Schreider, S. Yu. Smith, D. I, Jakeman, A. J. (2000). Climate Change Impacts on Urban Flooding, *journal of Climatic Change*, 47 (1-2), pp: 91-115.

Whetton, P. H, Fowler, A. M. , Haylock, M. R, Pittock, A. B. (1993). Implications of climate change due to the enhanced greenhouse effect on floods and droughts in Australia, *journal of Climatic Change*, Volume 25, Issue 3-4, pp 289.