

## ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدروگراف سیلاب در دوره‌های آتی مطالعه موردی: حوضه آبریز بختیاری

زهرا حجازی‌زاده<sup>۱</sup>، ابراهیم فتاحی<sup>۲</sup>، علیرضا مساح بوانی<sup>۳</sup> و محمدحسین ناصرزاده<sup>۴</sup>

### چکیده

در این تحقیق به بررسی اثر تغییرات اقلیم بر سیلاب با استفاده از مدل گردش عمومی جو (AOGCM) در حوضه بختیاری پرداخته شد. برای این کار از شبیه‌سازی دما و بارش دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) با استفاده از مدل CGCM3 براساس سناریوی انتشار A2 از مجموعه مدل‌های AOGCM-AR4 به روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (مدل لارس) و روش تناسبی (بارش) و تفاضل (حداقل و حداکثر دما) استفاده شد. برای شبیه‌سازی سیلاب حوضه نیز از مدل بارش - رواناب HEC-HMS استفاده شد. براساس نتایج شبیه‌سازی در ایستگاه تله‌زنگ حوضه بختیاری به‌ازای سیل فروردین ۶۹، دبی شبیه‌سازی شده به‌میزان ۳۵۷.۷ مترمکعب نسبت به دبی مشاهده‌ای کاهش نشان داد که معادل ۶.۱٪ دارای خطا است. نتیجه شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی درحوضه منتخب در دوره آتی، کاهش بارش و افزایش حداقل و حداکثر دما در دوره آتی است. در مجموع درحوضه به‌طور میانگین تا ۲۰ درصد کاهش بارش مشاهده شد و دمای حداکثر و حداقل به‌ترتیب با ۱.۵ و ۱ درجه افزایش پیش‌بینی شدند. نتایج حاصل از استخراج بارش‌های حدی دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) نشان داد با وجود کاهش بارش‌ها درسال‌های آینده، بارش‌های حدی درحوضه با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهند داد که این امر نشان‌دهنده افزایش وقوع سیلاب‌ها در دوره آتی خواهد بود.

کلیدواژگان: تغییر اقلیم، مدل‌سازی اقلیمی، مدل بارش - رواناب، سیلاب، حوضه بختیاری.

۱. استاد دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی

۲. استادیار پژوهشکده هواشناسی و علوم جو

۳. استادیار گروه آبیاری پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۴. استادیار دانشکده علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی (نویسنده مسئول)

## مقدمه

پدیده تغییر اقلیم که ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به ویژه گازدی اکسید کربن در جو می‌باشد، باعث تغییراتی در رژیم بارش، میزان رواناب، سرعت باد، تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین و دمای هوا می‌شود. توجه به تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر به علت پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و خسارت‌های مالی مربوط به رویدادهای جوی اهمیت زیادی پیدا کرده است (محمدی و تقوی، ۱۳۸۴). تغییر طبیعی آب و هوا اغلب به تشدید حوادث آب و هوایی می‌انجامد. وقایع حداکثر آب و هوایی نتیجه انحراف شدید از وضعیت متعادل سیستم آب و هوایی بدون در نظر گرفتن تأثیر واقعی آن بر شرایط اکولوژی کره زمین و سایر موجودات است که در تمام دنیا این حوادث شدید پیوسته در حال افزایش‌اند. طبق گزارش‌های IPCC<sup>۱</sup> تغییر اقلیم باعث تغییرات هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده به گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی مانند سیلاب افزایش یافته است (IPCC, 2007).

پدیده تغییر اقلیم می‌تواند بر سیستم‌های مختلفی تأثیر بگذارد که سیستم منابع آب از اصلی‌ترین آن‌ها است. بنابراین پدیده تغییر اقلیم می‌تواند به عنوان عمده‌ترین چالش بشر در دوره‌های آتی قلمداد گردد. از آنجا که افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیان‌باری برای جوامع بشری داشته باشد، لذا در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد صورت گرفته است. در حال حاضر اغلب تحقیقات انجام گرفته در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر وقایع متوسط مانند رواناب هستند (Leander et al., 2006) که در بررسی آن‌ها از خروجی مدل‌های گردش عمومی اقیانوس - اتمسفر (AOGCM<sup>۲</sup>) استفاده شده است. در مقایسه با مطالعات در زمینه خاک، آب و هوا و کاربری اراضی که نیازمند اطلاعات ورودی زیادی برای مدل‌های هواشناسی، هیدرولوژی و مدیریت آب می‌باشند، تحقیقات وقایع حدی با داده‌های ورودی اندکی قابل انجام می‌باشند (Fowler and Kilsby, 2007). با این وجود برخلاف تحقیقات بی‌شماری که بر رواناب صورت گرفته است، تحقیقات اندکی در زمینه وقایع حدی به خصوص خشکسالی در سطح دنیا انجام گرفته است (Zalud et al., 2005).

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Atmosphere-Ocean General Circulation Model

(Loukas et al., 2004). دلیل این امر عدم اعتبار خروجی مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس روزانه، و از طرف دیگر دشواری ریز مقیاس سازی خروجی این مدل‌ها برای مطالعات وقایع حدی می‌باشد. باید توجه داشت که در صورت استفاده از روش مناسب و معتبر در ریزمقیاس سازی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، این مدل‌ها ابزار مناسبی برای پیش‌بینی وقایع حدی هستند، از سوی دیگر این مدل‌ها قادر به تولید سری‌های زمانی طولانی مدت هستند که می‌توان به کمک آن‌ها به آنالیز تغییرات احتمالی وقایع حدی در دوره‌های آینده نیز پرداخت (Loukas et al., 2008). درسال‌های اخیر تحقیق در مورد این موضوعات در سطح کره زمین مد نظر قرار گرفته است.

در تحقیقی اثرات تغییرات اقلیم را بر حوضه آبریز رودخانه کلرادو در سه دوره ۳۰ ساله از سال ۲۰۱۰ تا ۲۱۰۰ تخمین زده شد. در این تحقیق از داده‌های خروجی مدل<sup>۱</sup> VIC و ریزمقیاس نمائی داده به عنوان ورودی مدل VIC، رواناب حاصل در این سه دوره شبیه‌سازی شده که به ترتیب کاهش ۱۴، ۱۸ و ۱۷ درصد در سه دوره مشخص شده است (Christensen et al., 2005). در مطالعه ای با استفاده از مدل گردش عمومی<sup>۲</sup> ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B تأثیر تغییر اقلیم را بر رواناب مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق که برای ۹ حوضه در کشور ایرلند صورت گرفت از مدل مفهومی بارش - رواناب<sup>۳</sup> HBV-Light برای بررسی وضعیت جریان رودخانه در دوره آتی ۲۰۶۰-۲۰۱۰ استفاده شد. نتایج در مجموع نشان دهنده افزایش بارش زمستانه و کاهش بارش تابستانه است. همچنین میزان دبی رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود (Steele et al., 2008). عدم قطعیت تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کانادا مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی از پنج مدل<sup>۴</sup> GCM و دو سناریوی انتشار استفاده شد. نتایج نشان از افزایش یک تا ۱۴ درجه‌ای دما و تغییر ۹- تا ۵۵ درصدی بارش فصلی داشت. همچنین میزان رواناب حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم، تغییر خواهد نمود (Minville et al., 2008). تأثیر عدم قطعیت<sup>۷</sup> مدل AOGCM بر تقاضا و بهره‌وری آب

1. Variable Infiltration Capacity
2. European center hamburg model, version
3. Hydrologiska Byråns Vatten balansavdelning
4. General Circulation Model

کشاورزی در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ برای چهار محصول عمده در شبکه آبیاری زاینده رود شامل گندم، جو، چغندر قند و سیب زمینی بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود، که با نزدیک شدن به پایان قرن احتمالاً میزان نیاز آبی محصولات منطقه افزایش خواهد یافت، این افزایش در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بیشتر است (Elmahdi et al., 2009) تجزیه و تحلیل تحقیقی تحت عنوان اثرات پدیده تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان تحت مدل HADCM3<sup>1</sup> و سناریوهای انتشار A2 و B2 نشان از کاهش بارندگی و افزایش دما تا سال ۲۱۰۰ به خصوص در نیمه دوم قرن دارد. در این ارتباط شبیه‌سازی دبی ورودی به سد چادگان با استفاده از تکنیک شبکه عصبی، افت جریان ورودی به سد را تا ۵۸ درصد نشان می‌دهد (مساح بوانی و همکاران، ۱۳۸۴). مطالعه‌ای جهت مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره آتی، با استفاده از داده‌های سناریو A1 تحت مدل ECHO-G<sup>2</sup> و روش ریزمقیاس نمایی آماری لارس<sup>3</sup>، تغییرات اقلیمی ۴۳ ایستگاه سینوپتیک کشور ارزیابی شد. بررسی‌ها حاکی از افزایش میانگین سالانه دما در حدود ۰٫۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۹ درصدی بارش در کشور برای دوره آتی است (باباییان و همکاران، ۱۳۸۶). اثرات تغییر اقلیم بر شرایط آب و هوایی و منابع آبهای سطحی ایران بررسی شد. با استفاده از ۶۹۶ تصویر همزمان دما و بارش ماهانه بررسی تغییرات زمانی و مکانی این عوامل اقلیمی به عنوان مهم‌ترین و تأثیرپذیرترین عوامل اقلیمی از تغییرات جهانی آب و هوا اقدام شد. نتایج نشان داد که در تمامی کشور روند صعودی دمای میانگین ماهانه مشاهده می‌شود که حاکی از گرم شدن تدریجی هوا است. تغییرات بارش نیز در سطح کشور در سطوح مختلف معنی‌دار بود. در نواحی شمال-شمال غرب و جنوب-جنوب شرق روند نزولی بارش ماهانه مشاهده شد (دانش کارآراسته و شکوهی، ۱۳۸۷). نتایج مطالعه تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر دبی بیک حوضه آیدوغموش در یک دوره سی ساله ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و فقط برای سناریوی A2 و با استفاده از هفت مدل AOGCM نشان داد که دمای حوضه در دوره ۲۰۵۰ بین حدود ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش از ۸۰- تا ۱۰۰ درصد خواهد بود. مقایسه شدت

1. Hadley Centre Coupled Model, version
2. ECHO-G is a coupled model composed of the atmospheric part (ECHAM4) and the oceanic part (HOPE-G)
3. Long Ashton Research Station-Weather Generator

سیلاب نمونه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آتی با وضعیت کنونی آن، نشان داد که دبی پیک حوضه تحت‌تأثیر تغییر اقلیم خواهد بود (آشفته و همکاران، ۱۳۸۷). نتایج بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود نشان داد 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. بنابراین می‌توان گفت روند کاهشی جریان به احتمال زیاد متأثر از تغییر کاربری اراضی و احداث سازه‌های آبی در بالادست بوده است (دودانگه و همکاران، ۱۳۸۹).

تحقیقات بالا نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر مخاطرات محیطی در همه جای دنیا از اهمیت بالایی برخوردار است و موارد متعددی انجام شده است. بدین جهت این تحقیق نیز سعی دارد اثرات تغییر اقلیم بر سیلاب حوضه بختیاری را با استفاده از مدل اقلیمی AOGCM و مدل بارش-رواناب HEC-HMS مورد بررسی قرار دهد.

### موقعیت جغرافیایی منطقه

حوضه آبریز رودخانه بختیاری در جنوب غربی کشور از ارتفاعات زاگرس میانی سرچشمه می‌گیرد. این حوضه محدود به مختصات جغرافیایی  $48^{\circ}$  تا  $45^{\circ}$ ،  $20^{\circ}$  تا  $50^{\circ}$  طول شرقی و  $32^{\circ}$  تا  $20^{\circ}$  عرض شمالی است. همچنین ساخت سد بختیاری به فاصله مستقیم حدود ۵۰ کیلومتری بالادست سد دز و پنج کیلومتر بالادست تقاطع رودخانه‌های سزار- بختیاری قرار گرفته است. رودخانه بختیاری یکی از دو سرشاخه اصلی رودخانه دز است که از ارتفاعات جنوبی اشترانکوه سرچشمه می‌گیرد و در نزدیکی ایستگاه تنگ پنج به رودخانه سزار می‌پیوندد و رود دز را تشکیل می‌دهد. مساحت حوضه آبریز در محل سد در حدود ۶۳۸۸ کیلومتر مربع و میانگین ارتفاع حوضه از سطح دریا ۲۲۱۲ متر است. دبی متوسط سالانه رودخانه بختیاری در محل سد (بر اساس یک دوره آماری ۶۰ ساله) معادل ۱۴۴.۶ مترمکعب بر ثانیه و متوسط بارش سالانه در حدود ۱۱۱۷ میلی‌متر است. شیب متوسط رودخانه بختیاری طی مسیر حدود ۳۵ درجه است (شکل ۱).

در این تحقیق داده‌های مشاهداتی دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه ۸ ایستگاه هواشناسی حوضه بختیاری طی دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۹ از سازمان هواشناسی دریافت شد.

که جدول شماره ۱ مشخصات ایستگاه‌ها و شکل شماره ۱ موقعیت ایستگاه‌ها را در روی نقشه نشان می‌دهد. همچنین داده‌های دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه منطقه از مدل CGCM3 در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت سناریوی انتشار A2 از مرکز مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل اقلیم کانادا<sup>۱</sup> استخراج گردید.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌ای حوضه بختیاری

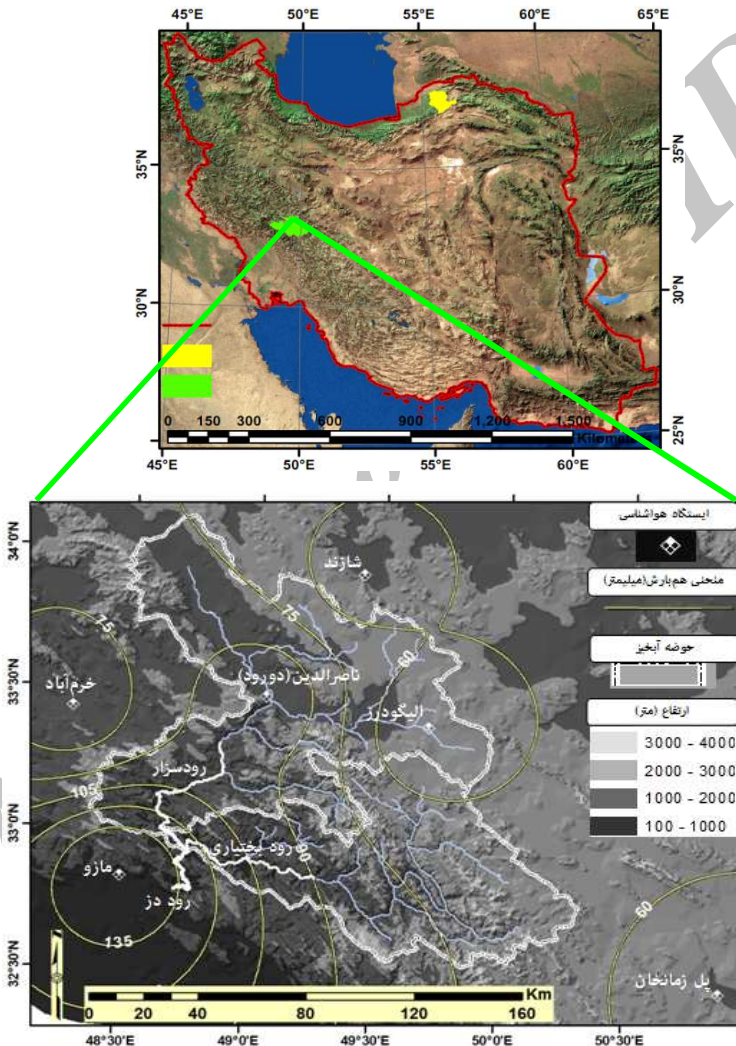
نام ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
خرم آباد	سینوپتیک	33 26	48 17	1147.8
الیگودرز	سینوپتیک	33 24	49 42	2022.0
ناصرالدین (دورود)	کلیماتولوژی	33 2	49 7	1883
شازند	کلیماتولوژی	33 56	49 25	1918
پل زمان خان	کلیماتولوژی	32 29	50 53	1883
مازو	کلیماتولوژی	32 50	48 30	450
سردشت دزفول	کلیماتولوژی	32 30	48 48	485
دزفول	سینوپتیک	32 24	48 23	143.0

#### انتخاب توفان‌های شدید و فراگیر منطقه در دوره پایه

انتخاب توفان‌های شدید و فراگیر بر اساس نتایج بررسی‌های قبلی و همچنین داده‌های ثبت‌شده دبی‌های حداکثر لحظه‌ای و روزانه و داده‌های حداکثر بارش‌های روزانه با تداوم‌های ۲۴ ساعت طی دوره آماری بلندمدت (۲۰۰۷-۱۹۶۰) برای حوضه بختیاری انجام گرفت. انتخاب اولیه بر پایه میانگین حسابی بارش در کلیه ایستگاه‌های موجود در منطقه صورت گرفت. بارش‌های مختلف که مربوط به تاریخ‌های متفاوت هستند به ترتیب نزولی مرتب شد و در نهایت با تطابق رویدادهای سیل تعداد ۱۴ توفان انتخاب گردید (جدول ۲). همان‌گونه که ملاحظه می‌شود توفان آذر ۱۳۶۴ از نظر بزرگی مقدار بارش برای کل تداوم زمانی بارش در مرتبه نخست قرار دارد. توفان‌های اردیبهشت ۱۳۶۵ و دی‌ماه ۱۳۷۱ نیز به ترتیب در مرتبه دوم

1. www.cccsn.ca

و سوم قرار دارند. ترتیب بزرگی سایر توفان‌ها بر پایه میانگین بارش در حوضه تقریباً مشابه هم است. با توجه به تداوم توفان و نزدیک بودن ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ به سد بختیاری و قرار گرفتن در حوضه انتهایی سیل، این ایستگاه ملاک ادامه کار قرار گرفت و برای کالیبره کردن مدل بارش - رواناب مورد استفاده قرار گرفت.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه بختیاری

جدول ۲: ترتیب بزرگی توفان‌های شدید و فراگیر بر پایه میانگین بارش حوضه بختیاری (۱۹۶۰-۲۰۰۷)

رتبه میانگین بارش روزانه	میانگین بارش روزانه	تاریخ میلادی	تاریخ شمسی
۱	۵۳.۶	1985/Dec/20,19	۱۳۶۴/۹/۲۸ و ۲۷
۲	۴۴.۳	1986/May/4,3	۱۳۶۵/۲/۱۴ و ۱۳
۳	۳۵.۸	1993/Jan/8,7	۱۳۷۱/۱۰/۱۸ و ۱۷
۴	۳۳.۸	1981/Mar/28,27	۶۰/۱/۸ و ۷
۵	۳۳.۵	1992/Feb/26,25	۷۰/۱۲/۶ و ۵
۶	۳۱.۷	1994/Nov/25,24	۷۳/۸/۴ و ۳
۷	۳۱.۲	1969/Jan/25,24	۴۸/۱۱/۵ و ۴
۸	۲۹	2000/Mar/25,24	۷۹/۱/۶ و ۵
۹	۲۶.۴	1994/Mar/17,16	۷۳/۸/۲۶ و ۲۵
۱۰	۲۵.۸	1998/Mar/30,29	۷۷/۱/۱۰ و ۹
۱۱	۲۵.۶	2005/Mar/13,12	۱۳۸۳/۱۲/۲۲ و ۲۱
۱۴	۲۳.۱	1990/Apr/3,2,1	۶۹/۱/۱۴ و ۱۳ و ۱۲

### تولید سناریوی تغییر اقلیم

به منظور حذف اغتشاش در شبیه‌سازی نوسانات اقلیمی ناشی از بزرگ بودن سلول‌های محاسباتی مدل‌های AOGCM، معمولاً به‌جای استفاده مستقیم از داده‌های مدل در محاسبات تغییر اقلیم، از میانگین دوره‌ای درازمدت این داده‌ها استفاده می‌شود (روابط (۱) و (۲) Jones and Hulme, 1996)

$$\Delta T_i = \left( \bar{T}_{GCM, fut, i} - \bar{T}_{GCM, base, i} \right) \quad (1)$$

$$\Delta P_i = \left( \frac{\bar{P}_{GCM, fut, i}}{\bar{P}_{GCM, base, i}} \right) \quad (2)$$



در روابط فوق  $\Delta T_i$  و  $\Delta P_i$  به ترتیب بیانگر سناریوی تغییر اقلیم مربوط به دما و بارندگی برای متوسط درازمدت برای هر ماه،  $\bar{T}_{GCM, fut, i}$  متوسط درازمدت دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه (۲۰۳۰-۲۰۱۱)،  $\bar{T}_{GCM, base, i}$  متوسط درازمدت دمای شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره مشابه با دوره مشاهده‌ای (۲۰۰۸-۱۹۸۹) برای هر ماه می‌باشد. برای بارندگی نیز موارد ذکر شده برقرار می‌باشد.

### خلاصه‌ای از فرآیند مدل لارس

در این مدل فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب‌وهوایی در سه بخش انجام می‌گیرد:

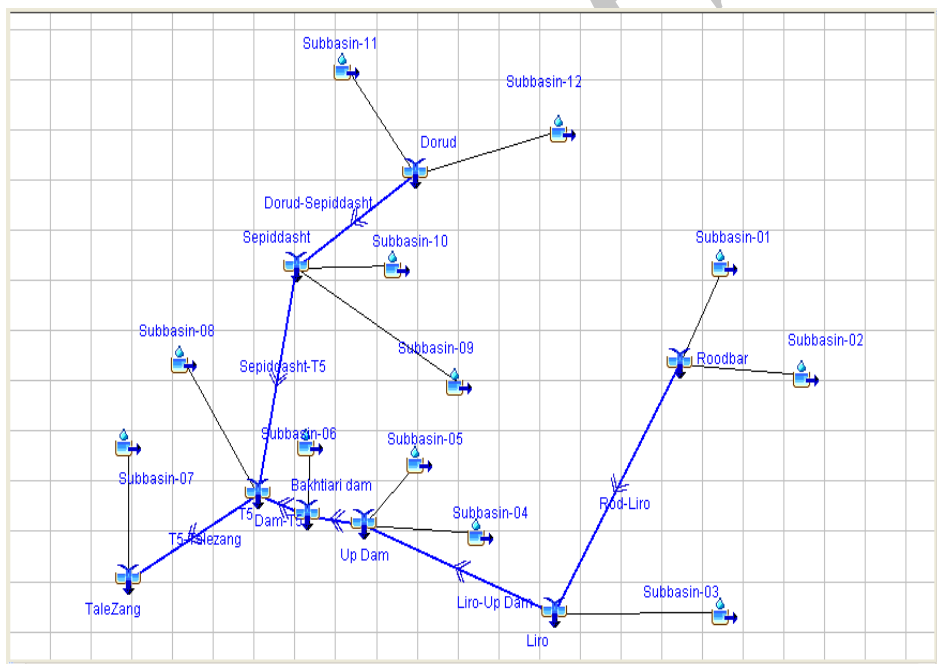
۱. **کالیبره کردن مدل:** در این بخش داده‌های آب‌وهوایی دیده‌بانی شده جهت تعیین خصوصیات آماری‌شان تحلیل می‌شوند. این اطلاعات در دو فایل مجزا ذخیره می‌شوند.
۲. **صحت‌سنجی مدل:** در این قسمت خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی و مصنوعی تولید شده توسط مدل جهت تعیین این‌که آیا تفاوت‌های آماری قابل توجهی بین این دو گروه از داده‌ها وجود دارد یا نه، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.
۳. **تولید داده:** در اینجا داده‌های آب‌وهوایی مصنوعی با استفاده از داده‌های آب‌وهوایی دوره دیده‌بانی شده تولید می‌شوند، که دارای خصوصیات آماری مشابه با دوره دیده‌بانی هستند. مدل لارس با استفاده از داده‌های دیده‌بانی شده برای ایستگاه مورد نظر کالیبره می‌شود و توانمندی مدل توسط Q-test صحت‌سنجی می‌شود، داده‌های مصنوعی قادرند با استفاده از گزینه Generator نیز شبیه‌سازی و ارزیابی شوند. این گزینه می‌تواند داده‌های مصنوعی را با همان خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی به کار ببرد یا داده‌های مصنوعی را مطابق با سناریوی‌های تغییر اقلیم تولید کند.

1. Site Analysis
2. Q-test
3. Generator

## شبیه‌سازی سیلاب حوضه

به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب حوضه بختیاری، در این تحقیق از مدل HEC-HMS استفاده شد. ابتدا شماتیک توپولوژی زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها، برای هر حوضه طراحی شد (شکل ۲). همچنین عوامل شبیه‌سازی حوضه‌ها، زیرحوضه‌ها و رودخانه‌ها که شامل مساحت، مؤلفه‌های نفوذ، نوع تابع تبدیل بارش به رواناب و دبی پایه رودخانه و روش روندیابی است در این بخش تعریف شدند.

مدل HEC-HMS در این تحقیق بر اساس روش SCS برای محاسبه نفوذ، روش هیدروگراف واحد کلارک در تبدیل بارش به رواناب و روش ماسکینگام برای روندیابی در رودخانه مورد واسنجی و ارزیابی قرار گرفت. جریان پایه هم در اجرای مدل در نظر گرفته نشد و سیلاب‌های مورد نظر بدون جریان پایه شبیه‌سازی شده‌اند.

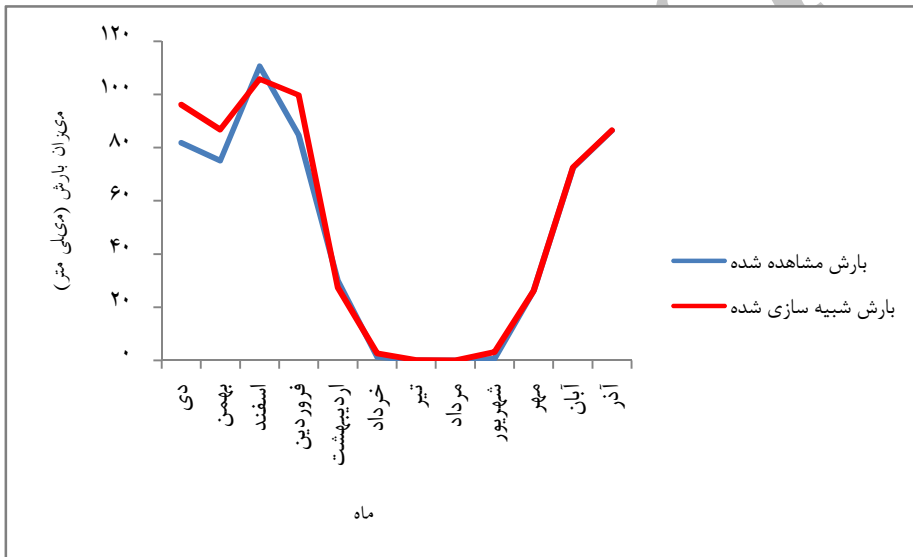


شکل ۲: طراحی شماتیک مدل حوضه بختیاری بر اساس مدل HEC-HMS

## نتایج

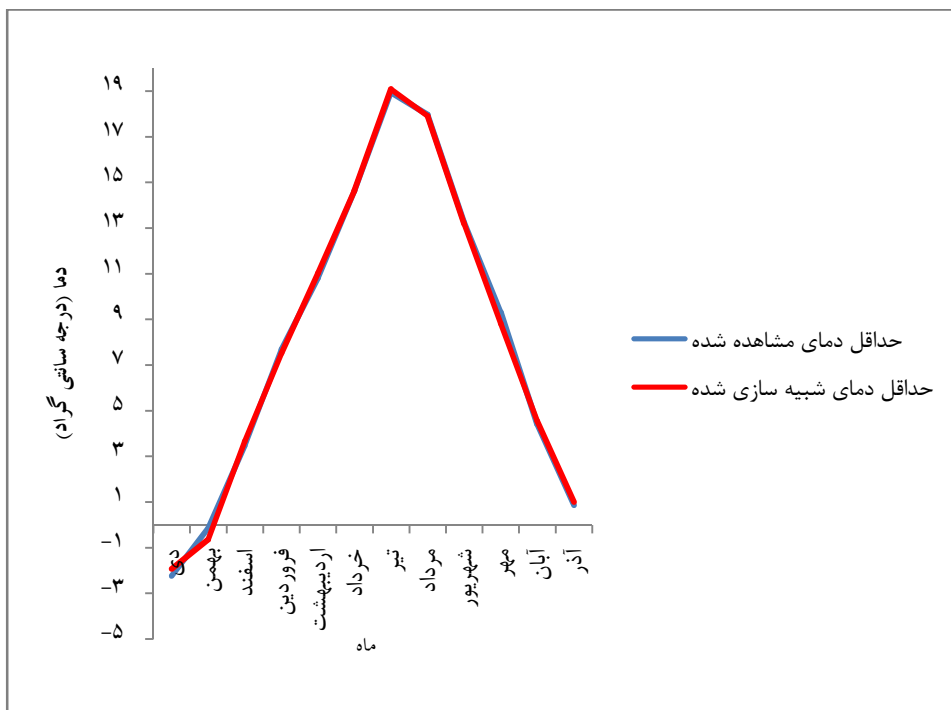
واسنجی مدل لارس در ریز مقیاس نمائی داده‌های دما و بارش منطقه

شکل‌های ۳ تا ۵ توانائی مدل لارس را در شبیه‌سازی داده‌های دما و بارش حوضه بختیاری نشان می‌دهد. بر این اساس توانمندی این مدل در شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر قابل قبول است و با داده‌های واقعی نسبتاً مطابقت کامل دارد. همچنین توانمندی مدل در شبیه‌سازی بارش در حوضه به جز در ماه‌های دی، بهمن و فروردین که با مقدار اندکی خطا همراه بوده است، در بقیه ماه‌ها به‌صورت قابل قبولی انجام گرفته است.

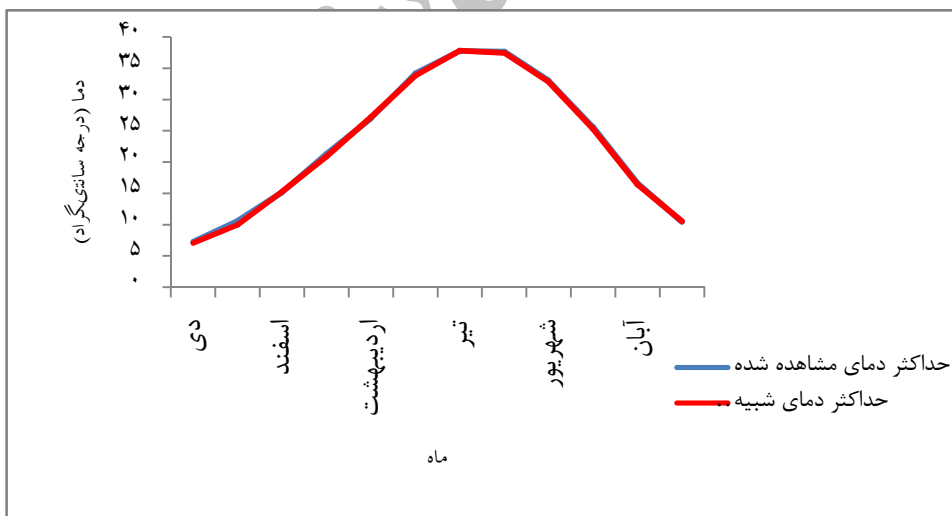


شکل ۳: بارش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ایستگاه انتخابی حوضه بختیاری

توسط مدل لارس طی دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۹



شکل ۴: دمای حد اقل مشاهده شده و شبیه سازی شده ایستگاه انتخابی حوضه بختیاری  
توسط مدل لارس طی دوره آماری ۱۹۸۹ - ۲۰۰۸



شکل ۵: دمای حد اکثر مشاهده شده و شبیه سازی شده ایستگاه انتخابی حوضه بختیاری  
توسط مدل لارس طی دوره آماری ۱۹۸۹ - ۲۰۰۸

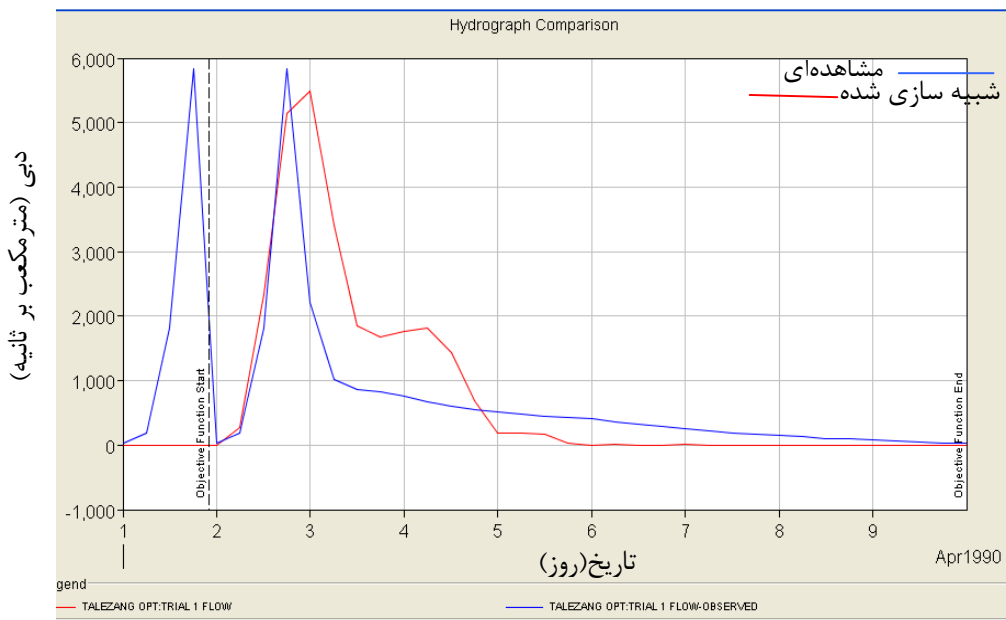
### واسنجی مدل HEC-HMS در دوره پایه

پس از طراحی شماتیک توپولوژی زیرحوضه‌ها و شبکه آبراهه‌ها و ورود آمار دینامیک به مدل، ویژگی‌های کنترلی شبیه‌سازی حوضه تعیین و شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب با مقادیر اولیه پارامترها انجام پذیرفت. نهایتاً عملکرد مدل با مقایسه هیدروگراف‌های سیل اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ در حوضه مورد بررسی قرار گرفت.

مطابق نتایج به‌دست آمده در ایستگاه تله‌زنگ حوضه بختیاری (جدول ۳) به ازای سیل فروردین ۶۹، ارتفاع حجم آب شبیه‌سازی شده توسط مدل به میزان ۲.۲ میلی‌متر نسبت به ارتفاع حجم آب مشاهده‌ای (معادل ۵.۷۳٪) کاهش نشان می‌دهد. همچنین دبی شبیه‌سازی شده به میزان ۳۵۷.۷ مترمکعب نسبت به دبی مشاهده‌ای (معادل ۶.۱٪) کاهش نشان داد، که نمودار هیدروگراف مربوط به آن در شکل ۶ آورده شده است. به طور کلی نتایج شکل ۷ نشان از توانایی قابل قبول مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی سیلاب حوضه بختیاری دارد.

جدول ۳: مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ در حوضه بختیاری

تاریخ وقوع سیل		هیدروگراف شبیه‌سازی سیل			هیدروگراف مشاهده‌ای سیل		ردیف
شمسی	میلادی	حجم (mm)	دبی اوج (m <sup>3</sup> /s)	زمان اوج	حجم (mm)	دبی اوج (m <sup>3</sup> /s)	
۱۳۶۹/۲/۱۱	۱ آپریل ۱۹۹۰	۳۵.۵	۵۴۸۳.۳	۳ آپریل ۱۹۹۰	۳۷.۶	۵۸۴۱.۰	۱



شکل ۶: هیدروگراف مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در سیل فروردین ۱۳۶۹ حوضه بختیاری

### شبیه‌سازی دما و بارش منطقه در دوره آتی

برای شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش حوضه بختیاری، ابتدا داده‌های ماهانه حداقل و حداکثر دما و بارش مدل CGCM3 بر پایه انتشار سناریوی A2 برای دوره پایه ۲۰۰۸-۱۹۸۹ و دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ استخراج گردید. سپس برای تولید سناریوی تغییر اقلیم دما و بارش در دوره آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ از روابط ۱ و ۲ استفاده گردید (جدول ۴). طبق جدول (۴) ملاحظه می‌شود که در حوضه بختیاری به غیر از ماه بهمن و مهرماه، در بقیه ماه‌ها کاهش بارش مشاهده می‌شود در حالی که برای حداکثر دما در تمامی ماه‌ها افزایش و در حداقل دما به غیر از دی، اسفندماه و آذرماه که کاهش ناچیزی نسبت به دوره پایه دارند، بقیه ماه‌ها دارای روند افزایشی هستند. در مجموع در این حوضه به‌طور میانگین تا ۲۰ درصد کاهش بارش مشاهده می‌شود و دمای حداکثر با ۱.۵ درجه و دمای حداقل با ۱ درجه افزایش پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۴: سناریوهای تغییر اقلیم بارش و حداکثر و حداقل دمای حوضه بختیاری در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰

نسبت بارش	تفاضل حداقل	تفاضل حداکثر	دوره آینده ۲۰۱۱-۲۰۳۰			دوره پایه ۱۹۸۹-۲۰۰۸		
			میانگین میزان بارش روز هر ماه	حداقل دما	حداکثر دما	میانگین میزان بارش روز هر ماه	حداقل دما	حداکثر دما
0.79	-0.01	1.19	0.69	-3.18	11.22	0.87	-3.17	10.03
1.05	0.13	0.82	0.70	-1.57	15.38	0.66	-1.70	14.56
0.73	-0.13	1.53	0.64	1.28	21.71	0.88	1.41	20.18
0.89	1.02	2.06	0.81	6.13	29.42	0.90	5.11	27.36
0.51	1.40	2.98	0.48	11.73	37.31	0.93	10.33	34.34
0.26	0.69	1.00	0.05	18.40	44.55	0.18	17.71	43.55
0.52	1.27	0.89	0.02	21.85	47.67	0.03	20.58	46.78
0.94	0.61	0.72	0.01	20.84	46.65	0.01	20.22	45.93
1	1.08	0.82	0.05	15.61	40.72	0.00	14.53	39.90
1.23	1.42	0.56	0.64	10.53	33.07	0.52	9.11	32.51
0.88	0.57	0.13	1.17	4.04	20.32	1.32	3.48	20.19
0.56	-0.20	1.67	0.60	-2.06	12.74	1.08	-1.85	11.06

## شبیه‌سازی سیلاب منطقه در دوره آتی

برای شبیه‌سازی سیلاب حوضه در دوره آتی ابتدا، با توجه به توانایی مدل لارس در تولید داده‌های روزانه بر اساس داده‌های میانگین ماهانه، با توجه به جدول (۴) تولید داده‌های روزانه برای همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه انجام گرفت. بعد از تولید داده‌های روزانه، بارش همه ایستگاه‌ها در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) بر اساس سیر نزولی مرتب شد. سپس با توجه به میزان میانگین بارش روزانه برای هر ایستگاه، ۱۰ توفان انتخاب و در ادامه توفان‌های همه ایستگاه‌ها دوباره کنار هم چیده و براساس سیر نزولی مرتب شدند. در پایان برای حوضه ۳ توفان شدید انتخاب شد که شدیدترین توفان مربوط به توفان فصل زمستان ۲۰۱۲ با میانگین بارش روزانه ۸۶.۷ میلی‌متر است. همچنین توفان‌های فصل زمستان ۲۰۲۴ با میانگین بارش روزانه ۸۶.۳ میلی‌متر و توفان فصل زمستان ۲۰۲۲ با میانگین بارش ۸۵.۱ میلی‌متر در

مرحله بعدی قرار دارند. در مجموع درحوضه بختیاری، ۶۰ درصد توفان‌ها در فصل زمستان، ۳۶.۶۶ درصد در فصل پاییز و ۳.۳۳ درصد در فصل بهار اتفاق خواهد افتاد.

در ادامه، توفان بهار ۲۰۱۲ از میان توفان‌های پیش‌بینی شده در دوره آتی (۲۰۱۱-۲۰۳۰) انتخاب و به مدل HEC-HMS معرفی گردید.

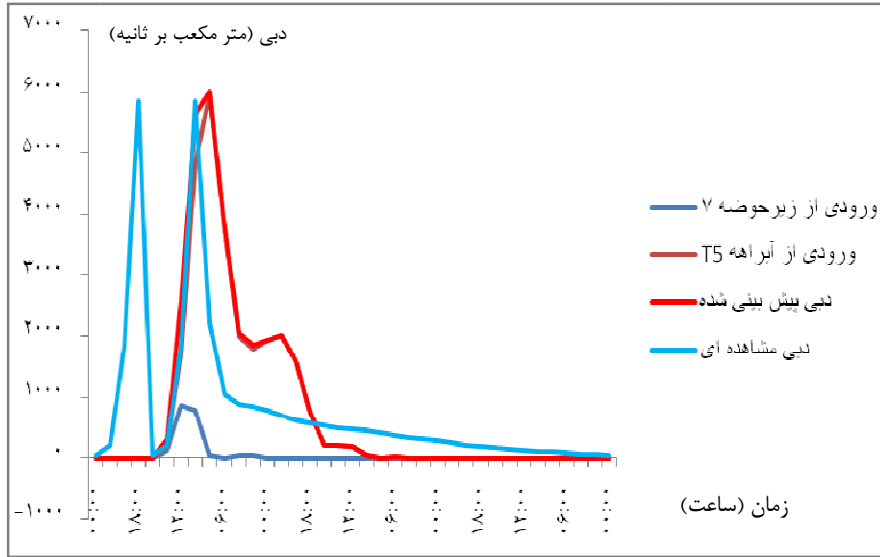
در سیلاب دوره آتی همان‌طور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود ارتفاع حجم آب شبیه‌سازی شده به‌اندازه ۱.۳ میلی‌متر نسبت به ارتفاع حجم آب مشاهده‌ای افزایش داشته و میزان دبی شبیه‌سازی شده دوره آتی در فصل بهار نیز ۱۴۴.۸ مترمکعب نسبت به سیل دوره پایه (معادل ۲.۴۸٪) افزایش نشان می‌دهد. در شکل (۷) نمودار مقایسه‌ای هیدروگراف سیل مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده و میزان تأثیرات زیر حوضه‌ها بر ایستگاه تله‌زنگ نشان داده شده است. با توجه به نمودار، میزان دبی مشاهده‌ای و دبی شبیه‌سازی شده دارای اختلاف اندک هستند. همان‌طور که در نمودار مشخص است دبی ورودی مربوط به آبراهه T5 نسبت به ورودی زیرحوضه ۷ بسیار بیشتر است و بیشترین نقش را در شکل‌گیری هیدروگراف داراست.

جدول ۵: مشخصات هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ایستگاه تله زنگ برای دوره آتی

در فصل بهار ۲۰۱۲

هیدروگراف مشاهده‌ای سیل		هیدروگراف شبیه‌سازی سیل آتی			تاریخ وقوع سیل		ردیف	
زمان اوج	دبی اوج ( $m^3/s$ )	حجم (mm)	زمان اوج	دبی اوج ( $m^3/s$ )	حجم (mm)	میلادی		شمسی
۱ آپریل ۱۹۹۰	۵۸۴۱	۳۷.۶	بهار	۵۹۸۵.۸	۳۸.۹	۱ آپریل ۱۹۹۰	۱۳۶۹/۲/۱۱	۱





شکل ۷: شبیه‌سازی دبی ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ و میزان تأثیرات زیرحوضه‌ها در حوضه بختیاری در فصل بهار طی دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۳۰

### نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی دما و بارش دوره پایه در حوضه توسط مدل لارس نشان داد که توانمندی این مدل در شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر قابل قبول می‌باشد و با داده‌های واقعی نسبتاً مطابقت کامل دارد. همچنین توانمندی این مدل در مدل‌سازی بارش در حوضه به جز در ماه‌های دی، بهمن و فروردین که با مقدار اندکی خطا همراه است، در بقیه ماه‌ها شبیه‌سازی قابل قبولی انجام گرفته است. از طرف دیگر نتایج شبیه‌سازی سیلاب‌های منتخب رخ داده توسط مدل HEC-HMS نشان داد که در ایستگاه تله‌زنگ حوضه بختیاری به ازای سیل فروردین ۶۹، حجم آب شبیه‌سازی شده توسط مدل به میزان ۲.۲ میلی‌متر نسبت به حجم آب مشاهده‌ای کاهش داشته که خطایی معادل ۵.۷۳٪ داشته است. همچنین دبی مشاهده‌ای به میزان ۳۵۷.۷ مترمکعب کاهش نشان داد که معادل ۶.۱٪ دارای خطا بوده که این خطاها از نظر علمی برای حوضه با وجود موقعیت جغرافیایی متنوع قابل قبول است.

در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی حوضه در دوره آتی، این نتایج به‌دست آمد که در حوضه بختیاری به غیر از ماه بهمن و مهرماه، در بقیه ماه‌ها کاهش بارش مشاهده می‌شود، در حالی

که برای حداکثر دما در تمامی ماه‌ها افزایش و در حداقل دما به جز، دی، اسفند و آذرماه که کاهش ناچیزی نسبت به دوره پایه دارند، بقیه ماه‌ها دارای روند افزایشی هستند. در مجموع در این حوضه به‌طور میانگین تا ۲۰ درصد کاهش بارش مشاهده می‌شود و دمای حداکثر تا ۱.۵ درجه و دمای حداقل ۱ درجه افزایش پیش‌بینی می‌شود. که این موضوع نشان‌دهنده تغییرات دما در نتیجه گرمایش جهانی است.

نتایج به‌دست آمده از استخراج بارش‌های حدی دوره آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) نشان داد با وجود اینکه در سال‌های آینده بارش کاهش خواهد یافت، اما بارش‌های حدی در حوضه با شدت بیشتری نسبت به دوره پایه رخ خواهند داد که این امر نشان‌دهنده افزایش سیلاب‌ها در دوره آتی خواهد بود. شدیدترین توفان‌ها که منجر به بارش‌های شدید و ایجاد سیل می‌شوند، مربوط به توفان زمستان ۲۰۱۲ با میانگین بارش روزانه ۸۶.۷ میلی‌متر می‌باشد. همچنین توفان‌های زمستان ۲۰۲۴ با میانگین بارش روزانه ۸۶.۳ میلی‌متر و توفان زمستان ۲۰۲۲ با میانگین بارش ۸۵.۱ میلی‌متر در مرحله بعدی قرار دارند. نهایتاً شبیه‌سازی سیلاب منطقه بوسیله مدل HEC-HMS حاکی از افزایش میزان دبی سیلابی حوضه‌های منتخب در دوره آتی می‌باشد. بنابراین نتایج حاصل از این مطالعه در طراحی و ساخت سدها، مدیریت سیلاب‌های حوضه به منظور کاهش خسارات مالی و جانی، استفاده بهینه از این سیلاب‌ها (تولید نیروی برق و ...) و همچنین برنامه‌ریزی برای توسعه مناطق مسکونی مخصوصاً مناطق شهری قابل استفاده است.

## منابع

۱. آشفته، پریشان و مساح بوانی، علیرضا (۱۳۸۷)، آنالیز عدم قطعیت تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم سیلاب با رویکرد بیزی؛ مطالعه موردی حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، گروه آبیاری و زهکشی دانشگاه تهران، دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران؛
۲. فولاد، ف (۱۳۸۸)، ارزیابی آماری تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب، مطالعه موردی دریاچه سد کرج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد شیراز؛
۳. بابائیان، ایمان و همکاران (۱۳۸۶)، "مدلسازی اقلیم ایران در دوره ۲۰۳۹ - ۲۰۱۰، با استفاده از ریز مقیاس نمایی آماری خروجی مدل ECHO-G"، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب
۴. دانش کارآراسته، پیمان و شکوهی، علیرضا (۱۳۸۷)، "در جستجوی اثرات تغییر اقلیم بر شرایط آب و هوایی و منابع آبهای سطحی ایران"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب؛
۵. دودانگه، اسماعیل؛ سلطانی، سعید و سرحدی، علی (۱۳۸۹)، "بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی روند مقادیر حدی جریان (جریان حداقل و سیل) در حوضه آبخیز سد سفیدرود"، مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، ایران؛
۶. محمدی، حسین و تقوی، فرحناز (۱۳۸۴)، "روند شاخص‌های حدی دما و بارش در تهران"، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳؛
۷. مساح بوانی، علیرضا و مرید، سعید (۱۳۸۴)، "اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه زاینده‌رود اصفهان"، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، شماره ۴؛
8. Bouraoui, F., Vachaud, G., Li, L. Z. X., Le-Treut, H., Chen, T., (2002), Evaluation of the impact of climate changes on water storage and groundwater recharge at the Watershed scale;
9. Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, O.P, Palmer, R.N, (2005) ``the Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin``;
10. Cohen, S. J. (1986), Impacts of CO<sub>2</sub>-induced Climatic change on water resources in the Great Lakes Basin, Climatic Change, 8, 135-153;
11. Dubrovsky M., (1998) Estimating climate change impacts on crop yields with use of crop growth model and weather generator. Proc. 14 the Conf. Prob. Stat., AMS;
12. Elmahdi, A., Shahkarami, N., Morid S., MassahBavani, A.R.,(2009). Assessing the impact of AOGCMs uncertainty on therisk of agricultural

- water demand caused by climate change. 18th WorldIMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009;
13. Fowler H.J. and Kilsby C.G., (2007) Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England, *J. Climate Change*, 80:337-367;
  14. 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.;
  15. Leander, R., Bouishand, T.A., (2006) Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of hydrology*, 332: 487-496;
  16. Loukas A. and Vasiliades L., (2004) Probabilistic analysis of drought spatiotemporal characteristics in Thessaly region, Greece, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 719-731;
  17. Loukas A., Vasiliades L. and Tzabiras J., (2008) Climate changes effects on drought severity, *Advances in Geosciences*, 17:23-29;
  18. Minville, M., Brissette, F., and Leconte, R. (2008). "Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed", *Journal of Hydrology*, 358 (1-2): 70- 83;
  19. Steele- Dunne, S., Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, Sh., Hanafin, J. and Nolan, P. (2008). "The impacts of climate change on hydrology in Ireland". *Journal of Hydrology*, 356 (1-2): 28-45.