دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

مدل‌سازی بارش- رواناب در شرایط تغییر اقلیم به‌منظور پیش‌بینی جریانات آتی حوزه صوفی‌چای

سید حسن حسینی[۱]، محمد علی قربانی[۲] و علیرضا مساح بوانی[۳]

۱- دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز، (نویسنده مسوول: hosseini_hasan@yahoo.com)
۲- دانشیار، دانشگاه تبریز
۳- دانشیار، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۹۲/۳/۲۹ تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۱۲

چکیده

دو مسئله عمده در مطالعات بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم داشتن اطلاعات آماری کافی و انتخاب بهترین مدل بارش- رواناب می‌باشد. مدل‌های اقلیمی، با توانایی شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، مراجع پیش‌بینی‌های آتی محسوب می‌شوند. لذا مدل بارش- رواناب باید قادر به شبیه‌سازی جریان رودخانه تنها با استفاده این متغیرها باشد. این مطالعه به‌منظور ارزیابی اثراتی که نیاز به سناریوهای اقلیمی محلی دارند، به تشریح روشی برای انتخاب از میان مدل‌های مختلف اقلیمی می‌پردازد. این روش بر مبنای استفاده از یک مولد آب و هوایی با توانایی تولید سناریوهای اقلیمی روزانه در مقیاس ایستگاهی می‌باشد که ورودی‌های بسیاری از مدل‌های بررسی اثر فرآیندها (نظیر بارش- رواناب) هستند. نتایج بررسی جریانات رودخانه صوفی‌چای واقع در حوزه دریاچه ارومیه بوسیله مدل بارش- رواناب IHACRES نشان داد اختلاف میان مدل‌های اقلیمی تحت سناریو انتشار B1 برای هر دو دوره آتی نزدیک (۲۰۳۰-۲۰۱۱) و دور (۲۰۶۵-۲۰۴۶) و همچنین تحت سناریو انتشار A2 (۲۰۳۰-۲۰۱۱) برای دوره نزدیک به‌خصوص در فصول گرم سال نسبتاً اندک می‌باشد، اما تحت سناریو انتشار A2 و دوره دور اختلاف‌ها بسیار قابل توجه‌اند. همچنین عدم قطعیت انتخاب سناریوهای انتشار مختلف برای دوره نزدیک کم و برای اواسط قرن بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، بارش-رواناب، صوفی‌چای، GeneXproTools، IHACRES، LARS-WG

مقدمه

تغییر اقلیم را می‌توان به شکل ساده «تغییر در مولفه‌ها یا متغیرهای اقلیمی با گذشت زمان» تعریف نمود (۲۱). امروزه مطالعات مدل‌سازی تغییر اقلیم منطقه‌ای یا محلی برای شروع، به یک مدل اقلیمی بزرگ مقیاس موسوم به مدل گردش عمومی (GCM)[۱] و بعد از آن ریزمقیاس نمودن آن برای موقعیت دلخواه نیاز دارند. به‌منظور تشریح مسائل تغییر اقلیم آتی، چهار دسته سناریو کلی در گزارش SRES[۲] کار گروه ۳ IPCC با نمادهای A1، B1، A2 و B2 معرفی شده‌اند (۷). اگرچه عدم قطعیت زیادی میان رخداد انتشارات آتی و مقادیر در نظر گرفته شده توسط سناریوها وجود دارد (۶)، می‌توان با به کار بردن دو سناریو A2 و B1 (به ترتیب معرف شدیدترین و کم‌ترین میزان افزایش گاز گلخانه‌ای) تا حد زیادی گستره این عدم قطعیت را شناسایی نمود.

اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب بر پایه پیش‌بینی و تحلیل جریان رودخانه می‌باشد. به‌عنوان مثال بهره‌برداری در زمان واقعی از سدها نیازمند آگاهی از آورد جریان ورودی به مخزن در آینده می‌باشد. روش‌های پیش‌بینی جریان رودخانه شامل: روش‌های آماری (۱۹)، سری‌های زمانی (۱۳،۸)، مدل‌های پیچیده مبتنی بر فیزیک رواناب (۱۴،۴)، شبکه‌های عصبی (۵،۲) و ترکیبی از روش‌های فوق (۲۳) می‌باشند. در سال‌های اخیر محققین مختلفی (۱۸،۱۱،۳)، از مدل‌های ترکیبی اقلیمی و هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی‌های بلندمدت جریان رودخانه استفاده نموده‌اند. برخی از آنها به کاوش مساله‌های مفهومی پایه نظیر تعاریف و دسته‌بندی‌ها همت گماشته‌اند (۲۵،۱۷) و برخی دیگر نیز منافع گزینه‌های انطباقی مختلف را نشان داده‌اند (۲۰،۱۴). ستگن و همکاران (۱۶)، ابتدا با استفاده از ۱۵ مدل گردش عمومی تغییرات پیش‌بینی شده بارش و دمای ماهانه را بررسی نمودند و در مرحله بعد جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر حوزه دریاچه تانا در اتیوپی با استفاده از ابزار SWAT به تعیین اثرات تغییرات دما و بارش روزانه بر تغییرات جریان و سایر مولفه‌های هیدرولوژیکی پرداختند. نتایج آنها تحت سناریو انتشار A2 در چهار مدل از نه مدل گردش عمومی نشانگر کاهش معنی‌دار جریان سالانه در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۸۰ بود. لیو و کولیبالی (۱۲)، توانایی سه مدل مبتنی بر داده ریزمقیاس آماری، شبکه عصبی پیش‌خور تأخیری[۳] و رگرسیون چندگانه تکاملی[۴] را در ریزمقیاس نمودن دما و بارش روزانه در دو ایستگاه

1- General Circulation Model
2- Special Report on Emissions Scenarios
3- Time Lagged Feedforward Neural Network
4- Evolutionary Polynomial Regression

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

شمال کانادا بررسی نمودند و خروجی بهترین مدل را به منظور بهبود پیش‌بینی دوهفته‌ای متغیرهای هیدرولوژیکی به دو مدل HBV و BNN وارد نمودند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از داده‌های ریزمقیاس، پیش‌بینی دبی متوسط و دبی پیک جریان ورودی را به ترتیب ۱۸ و ۲۶ درصد بهبود داده است. ضرغامی و همکاران (۲۶)، تغییرات آب و هوایی شش ایستگاه سینوپتیک در استان آذربایجان شرقی را با استفاده از مدل HadCM3 و سه سناریو انتشار A1B، A2 و B1 با افق‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۵ و ۲۰۹۰ با مولد تصادفی آب و هوا لارس[1] ریزمقیاس کرده و نتیجه گرفتند که بر اساس سناریو A2 در نیمه قرن بیست و یکم متوسط دمای سالانه ۲/۳ درجه سانتیگراد افزایش و بارش سالانه ۳ درصد کاهش خواهد یافت. این تغییرات آب و هوایی بر اساس شاخص دو مارتن[2]، استان آذربایجان شرقی را از اقلیم نیمه خشک به اقلیم خشک تبدیل خواهد نمود. کمال و همکاران (۹)، جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی زیرحوزه قره سو (در شمال غربی حوزه کرخه) در دوره آتی ۲۰۶۹-۲۰۴۰ میلادی از مدل اقلیم جهانی HadCM3 تحت سناریوی انتشار A2 از مجموع سناریوی SRES استفاده نمودند. آنها مدل بارش-رواناب SIMHYD را برای دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۱ مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار دادند و پس از ارزیابی مدل با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه، داده‌های اقلیمی ریزمقیاس شده را به مدل بارش-رواناب معرفی نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد رواناب منطقه در این دوره تغییری بین ۹۰ تا ۷۰- درصد در ماه‌های مختلف خواهد داشت. واثقی (۲۲) با استفاده از ۱۰ مدل اقلیمی، یک‌بار به کمک میانگین دسته‌جمعی[3] خروجی این مدل‌ها و بار دیگر با به کارگیری هم‌زمان خروجی همه آنها به شبیه‌سازی دما، بارش و رواناب حوزه قره‌سو (استان کرمانشاه) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داده است که استفاده از میانگین دسته‌جمعی مدل‌های اقلیمی در هر دو سناریوی انتشار A2 و B1، محدوده عدم قطعیت شبیه‌سازی دما، بارش و رواناب را بسیار مشابه با استفاده از همه مدل‌ها پوشش می‌دهد. بدین معنی که به جای استفاده از خروجی همه مدل‌ها می‌توان از متوسط دسته‌جمعی آنها استفاده نمود.

اگرچه مطالعات گوناگونی در مورد اثرات تغییراقلیم بر جریان‌های حوزه دریاچه ارومیه به انجام رسیده است اما در اغلب آنها به استفاده از مدل اقلیمی HadCM3 بسنده شده و کمتر به بررسی‌های اولیه در خصوص انتخاب مدل‌های اقلیمی و عدم قطعیت ناشی از نتایج آنها توجه شده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق بررسی اختلاف حاصل از نتایج مدل‌های اقلیمی دیگر در مقایسه با مدل رایج HadCM3 و در نتیجه بحث پیرامون عدم قطعیت‌های احتمالی می‌باشد. این روش بر مبنای استفاده از یک مولد آب و هوایی با توانایی تولید سناریوهای اقلیمی روزانه می‌باشد. به‌منظور تعیین اثرات تغییرات ایجاد شده در متغیرهای اقلیمی بر جریان رودخانه از دو نرم‌افزار IHACRES2.1 و GeneXproTools 4.0 استفاده شده است.

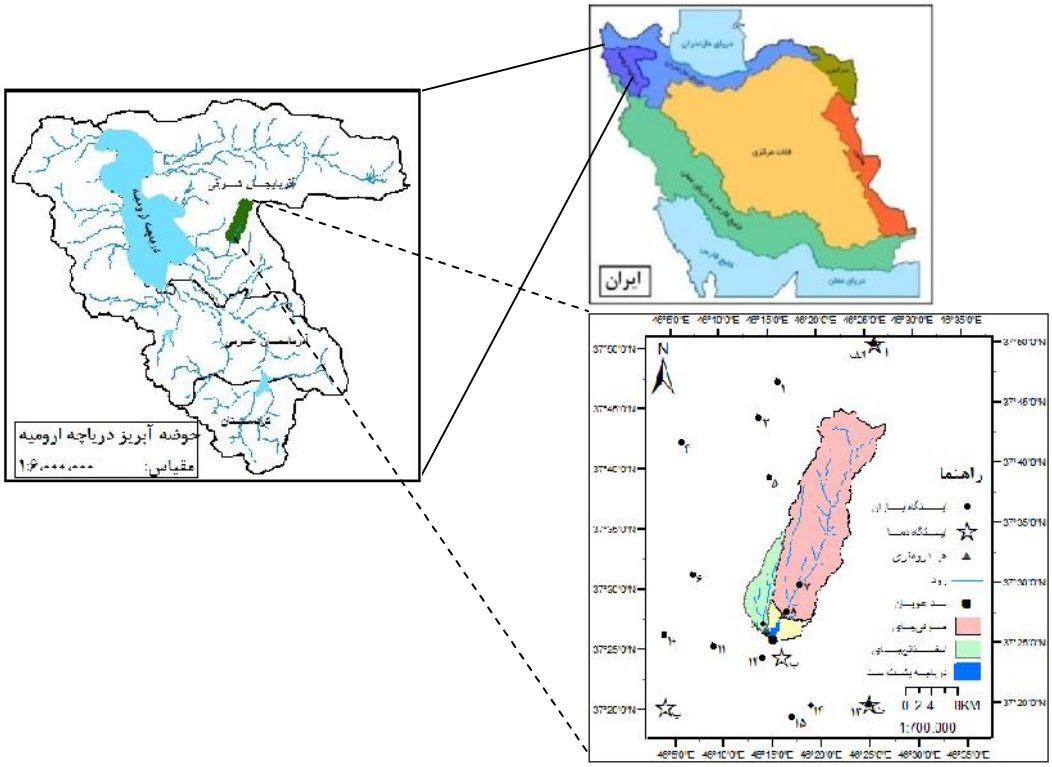
مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

صوفی‌چای با آورد تقریبی سالانه ۱۳۳ میلیون مترمکعب در منطقه مراغه جریان دارد و مساحت حوزه آبخیز آن در بالادست سد علویان ۳۱۷/۱ کیلومتر مربع است. جریان بالادست سد به‌وسیله دو ایستگاه هیدرومتری تازه‌کند (روی صوفی‌چای) و اسفستانج (روی شاخه اسفستانج‌چای) سنجه می‌شود. با تقریب خوبی می‌توان جریان ورودی به سد را برابر مجموع مقادیر ثبت شده در این دو ایستگاه دانست. شکل ۱ موقعیت و محدوده حوزه آبخیز صوفی‌چای و دو زیرحوزه آن را در بالادست سد علویان نمایش می‌دهد. دو مسئله عمده در مطالعات بررسی اثرات هیدرولوژیکی تغییر اقلیم داشتن اطلاعات آماری کافی و انتخاب بهترین مدل بارش-رواناب می‌باشد. مدل‌های اقلیمی، با قابلیت شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی، مراجع پیش‌بینی‌های آتی محسوب می‌شوند. لذا مدل بارش-رواناب باید قادر به شبیه‌سازی جریان رودخانه تنها با استفاده این متغیرها باشد. بنابراین انتخاب ایستگاهی با داده کافی که بتوانند معرف ویژگی‌های اقلیمی حوزه باشد و در مدل‌سازی جریان موفق عمل کند حائز اهمیت می‌باشد. بدین منظور کلیه ایستگاه‌های سنجش مقدار بارندگی و دما در درون و اطراف محدوده مطالعاتی مشخص و داده‌های آنها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۱). جدول ۱ موقعیت هر ایستگاه و نشانه بکار رفته برای نمایش آنها روی شکل ۱ را نشان می‌دهد.

1- LARS-WG 2- De Martonne 3- Ensemble

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز صوفی‌چای، زیرحوزه‌های صوفی‌چای و اسفستانج‌چای و ایستگاه‌های موجود در منطقه

مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار

به‌منظور برآورد اثرات اقلیمی انتشار گازهای گلخانه‌ای، باید از یک مدل ریاضی شامل سیستم اقلیمی کاملی از جو و اقیانوس‌ها گرفته تا خشکی و یخچال‌ها و صفحات یخی استفاده نمود. مدلی با چنین ویژگی را مدل گردش عمومی یا مدل اقلیم جهانی (GCM) می‌نامند. انتشارات آتی گازهای گلخانه‌ای محصول سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که بوسیله عواملی نظیر، رشد جمعیت، توسعه اجتماعی- اقتصادی و ظهور فناوری‌های نو تعیین می‌شوند. از آنجایی که روند تغییر این عوامل بسیار نامطمئن است از تصورات جایگزین یا سناریو استفاده می‌شود. سناریوها ابزاری مناسب برای آنالیز اثرات ممکن ناشی از عوامل فوق بر انتشارات آتی و همچنین برای بررسی عدم قطعیت‌های مرتبط می‌باشند. در این مطالعه، به‌منظور انتخاب مدل اقلیمی معرف منطقه اعتبارسنجی بین خروجی دما و بارش ۱۰ مدل GCM ارائه شده در IPCC-AR4[1]، که خروجی مربوط به دو سناریو انتشار A2 و B1 آنها در دسترس‌اند، با مشاهدات ایستگاه‌های معرف در دوره پایه انجام می‌گیرد. عمده‌ترین مسئله در استفاده از GCM مقیاس بزرگ مکانی آن است که استفاده از مدل‌های موسوم به ریزمقیاس‌نمایی را الزامی می‌کند.

مدل ریزمقیاس‌نمایی **LARS-WG 5**

مدل لارس از یک توزیع نیمه تجربی برای تقریب توزیع‌های احتمالاتی سری‌های خشک و مرطوب، بارش، دماهای حداقل و حداکثر و تابش خورشیدی روزانه استفاده می‌کند. توزیع نیمه تجربی به مثابه تابع توزیع احتمال تجمعی تعریف می‌شود. تعداد قطعه‌های (n) مورد استفاده در این توزیع در نسخه پنجم به ۲۳ افزایش داده شده است. سمنوف و استراتونوویچ (۱۵) نشان دادند که چگونه افزایش تعداد این قطعات می‌تواند نمایش بهتری از توزیع داده‌های مشاهداتی ارائه بنماید. برای هر متغیر اقلیمی v، مقدار متغیر اقلیمی v_i متناظر با احتمال P_i (برای $i=1,2,\ldots,n$) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$v_i = \min\{v:P(v_{obs} \le v) \ge P_i \qquad (۱)$$

که در آن $P(v_{obs} \le v)$ معرف احتمال بدست آمده از داده‌های مشاهداتی (v_{obs}) است. برای هر متغیر اقلیمی دو مقدار P_0 و P_n به ترتیب برابر ۰ و ۱ با مقادیر متناظر $v_0 = \min\{v_{obs}\}$ و $v_n = \max\{v_{obs}\}$ ثابت می‌باشند. برای تقریب مقادیر حدی یک متغیر اقلیمی، برای مقادیر حدی کم مقدار P_i باید نزدیک به صفر و برای مقادیر بسیار بزرگ، نزدیک به یک در نظر گرفته شود. سایر مقادیر P_i بصورت یکنواخت روی سطح احتمال توزیع می‌شوند. استفاده از داده‌های بیشتر نرم‌افزار را به شبیه‌سازی‌های نزدیک به واقع نزدیک‌تر می‌کند.

1- Fourth Assessment Report

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سنجش مقدار بارندگی و دما در منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های ارائه شده با شماره باران سنجی، ایستگاه‌های ارائه شده با حروف سینوپتیک هواشناسی و ایستگاه‌های ارائه شده با شماره و حرف تبخیر سنجی می‌باشند)

نام ایستگاه	نشانه	طول (°E)	عرض (°N)	ارتفاع (m)	نام ایستگاه	نشانه	طول (°E)	عرض (°N)	ارتفاع (m)	نام ایستگاه	نشانه	طول (°E)	عرض (°N)	ارتفاع (m)
لیقوان	(۱،الف)	۴۶/۴۳	۳۷/۸۳	۲۲۵۰	آشان	(۷)	۴۶/۳	۳۷/۵	۱۸۵۳	مغانجیق	(۱۳،ت)	۴۶/۴۲	۳۷/۳۳	۱۶۵۰
کندوان	(۲)	۴۶/۲۷	۳۷/۷۸	۲۰۰۴	تازه کند	(۸)	۴۶/۲۷	۳۷/۴۵	۱۶۱۰	چکان	(۱۴)	۴۶/۳۲	۳۷/۳۳	۱۵۷۵
گمبرف	(۳)	۴۶/۲۳	۳۷/۷۳	۱۹۵۵	اسفستانج	(۹)	۴۶/۲۳	۳۷/۴۳	۱۵۰۰	قشلاق‌امیر	(۱۵)	۴۶/۲۸	۳۷/۳۲	۱۵۴۰
قرمزیگل	(۴)	۴۶/۱	۳۷/۷	۱۷۷۵	بناب	(۱۰)	۴۶/۰۷	۳۷/۴۳	۱۳۳۰	مراغه	(ب)	۴۶/۲۷	۳۷/۴	۱۴۷۸
هرگلان	(۵)	۴۶/۲۵	۳۷/۶۵	۲۲۵۳	خرمازرد	(۱۱)	۴۶/۱۵	۳۷/۴۲	۱۵۶۵	بناب	(پ)	۴۶/۰۷	۳۷/۳۳	۱۲۹۰
ینگجه	(۶)	۴۶/۱۲	۳۷/۵۲	۱۶۷۰	مراغه	(۱۲)	۴۶/۲۳	۳۷/۴	۱۴۷۵	-	-	-	-	-

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

استفاده از حداقل ۲۰ تا ۳۰ سال داده روزانه توصیه شده است. لارس برای تولید سری‌های زمانی روزانه دما و بارش در آینده نیاز به معرفی فایل سناریوی تغییر اقلیم دارد. این فایل تغییرات اقلیمی دوره آتی را نسبت به دوره پایه (تغییرات نسبی در بارندگی و تغییرات مطلق در دمای حداقل و حداکثر) بر اساس خروجی مدل‌های GCM مشخص می‌کند.

مدل بارش- رواناب IHACRES 2.1

فرآیند مدل‌سازی IHACRES قابل تقسیم به دو مدل غیرخطی (تلفات) و خطی (هیدروگراف واحد) می‌باشد، که اولی بارش را به بارش مؤثر و دومی بارش مؤثر را به رواناب تبدیل می‌کند. تاکنون اصلاحات مختلفی در این مدل صورت گرفته و اغلب آنها نیز به اصلاح مدول غیرخطی تأکید داشته‌اند. در حال حاضر، روش اصلاحی یه و همکاران (۲۴) برای محاسبه بارش مؤثر u_k از به شکل زیر درون IHACRES 2 کدنویسی شده است (۱):

$$u_k = [c(¤_k - l)]^p r_k \qquad (۲)$$

که در آن r_k بارش مشاهداتی، c، l و p پارامترها (به ترتیب مؤلفه موازنه جرم، آستانه شاخص رطوبتی خاک و پاسخ غیرخطی) و $¤_k$ شاخص رطوبتی خاک می‌باشد:

$$¤_k = r_k + (1 - 1/²_k)¤_{k-1} \qquad (۳)$$

در رابطه فوق $²_k$ معرف نرخ خشک شدن حوزه است و از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$²_k = ²_w \exp(0.062\ f(T_r - T_k)) \qquad (۴)$$

که پارامترهای $²_w$، f و T_r به ترتیب مربوط به نرخ خشک شدن مرجع، فاکتور تعدیل دما و دمای مرجع می‌باشند. اندیس k برای پارامترها نشانگر گام زمانی می‌باشد. نسخه IHACRES 2.1 مورد استفاده در این تحقیق مدول خطی را بر مبنای روابط ارائه شده در جیکمن و هورن برگر (۸) درنظر می‌گیرد. مدل پارامترهای مدول غیرخطی را برای یک دوره واسنجی مشخص بوسیله جستجوی شبکه‌ای[1] در محدوده‌های تعریف شده توسط کاربر انجام می‌دهد. به‌طور همزمان پارامترهای مدول خطی نیز با انتخاب پیکره‌بندی ذخیره‌ای[2] توسط کاربر، تعیین می‌شوند. در نهایت با استفاده از مقادیر پارامترهای مرحله واسنجی، مدل در دوره دیگری به جز دوره واسنجی مورد صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

مدل بارش- رواناب برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی ژنتیک بر اساس تئوری داروین ارائه شده است. این روش جزء روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود. به این ترتیب که جمعیتی در جهت تکامل به صورت انتخابی، جمعیت نامناسب را رها کرده و فرزندانی اصلاح شده ایجاد می‌کند. در این روش در ابتدای فرآیند هیچگونه رابطه تابعی در نظر گرفته نشده و این روش قادر به بهینه‌سازی ساختار مدل و مؤلفه‌های آن می‌باشد. برنامه‌ریزی ژنتیک روی ساختار درختی فرمول‌ها عمل می‌کند. ساختارهای درختی از مجموعه توابع (عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها) و ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله و اعداد ثابت) ایجاد می‌شوند. در برنامه‌ریزی ژنتیک مراحل زیر باید مدنظر قرار گیرند: ۱- مجموعه ترمینال‌ها (متغیرهای مسئله، اعداد ثابت تصادفی)، ۲- مجموعه عملگرهای ریاضی مورد استفاده در فرمول‌ها، ۳- انتخاب تابع برازش مناسب (*RMSE, R,...*)، برای سنجش برازش فرمول‌ها ۴- تعیین پارامترهای کنترل‌کننده اجرای برنامه (اندازه جمعیت، احتمال مربوط به بکارگیری عمل‌های ژنتیکی و جزئیات دیگر مربوط به اجرای برنامه)، ۵- معیار پایان و ارائه نتایج اجرای برنامه (مثل تعداد تولید جمعیت جدید، تعیین یک مقدار مشخص برای برازش فرمول‌ها که اگر میزان برازش برابر یا بیشتر از آن مقدار شد، اجرا متوقف شود).

در این مطالعه از مقادیر دما و بارش و تاخیرهای آنها به‌عنوان ترمینال‌ها و از عملگرهای +، -، ×، ÷، sin، cos، ریشه دوم و توان‌های اول تا سوم متغیرها استفاده شد. همچنین عملکرد هر دو مدل بارش-رواناب IHACRES و برنامه‌ریزی ژنتیک طی واسنجی و صحت‌سنجی پارامترها با استفاده از دو معیار دقت R^2 و نش- ساتکلیف[3](NSE) و معیار خطای RMSE بررسی می‌شود.

نتایج و بحث

برای تامین ورودی‌های دما و بارش مدل بارش-رواناب سعی می‌شود که از داده‌های یک ایستگاه (ایستگاه‌های) معرف استفاده شود. لذا لازم است مقادیر دما و بارش ایستگاه‌ها با مقادیر متوسط نظیر مجموعه ایستگاه‌های موجود در منطقه مقایسه و مشخص شود رفتار اقلیمی در یک ایستگاه معین می‌تواند معرفی از کل منطقه باشد یا خیر؟ برای پارامتر بارش، در مقایسه‌های اولیه از داده‌های ماهانه ایستگاه‌های باران‌سنجی در دوره مشترک ۱۱ ساله (سال آبی ۷۹ تا ۸۹) استفاده شد. مقادیر متوسط مجموع بارندگی‌های ماهانه ایستگاه‌ها، همچنین مقادیر متوسط بارندگی روی دو زیرحوزه صوفی‌چای و اسفستانچای برای دوره مذکور با استفاده از روش خطوط هم باران (در محیط ArcGIS9.3) محاسبه شد. سپس مقادیر متوسط بارش ماهانه هر یک از ایستگاه‌ها با مقادیر متوسط نظیر زیرحوزه‌ها بوسیله معیارهای دقت بی‌بعد R^2 و خطا RMSE (میلی‌متر بر ماه) مقایسه شدند. این معیارها به منظور نمایش میزان نزدیک بودن مشاهدات یک ایستگاه به متوسط زیرحوزه‌ها استفاده شدند. در نتیجه

1- Grid search
2- Store configuration
3- Nash-Sutcliffe

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

ایستگاه مراغه با بیش‌ترین طول داده‌های ثبت شده و همچنین به دلیل قرار گرفتن در نزدیکی مرکز شهرستان مراغه و در نتیجه سهولت بیش‌تر جهت ثبت و نظارت منظم بر آن، همچنین بدلیل دارا بودن بیش‌ترین میزان R^2 (۹۹٪) و کمترین RMSE (۲/۷۶ میلی‌متر در ماه)، در این مرحله به‌عنوان ایستگاه معرف بارش برای زیرحوزه اسفستانچای انتخاب می‌گردد. برای زیرحوزه صوفی‌چای نیز ایستگاه آشان با بیش‌ترین میزان R^2 (۹۷٪) و کمترین RMSE (۴/۹۶ میلی‌متر در ماه) نزدیکترین مقادیر بارش ماهانه به متوسط حوزه را داشته، اما داده کافی جهت ورود به نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی را ندارد. ضرائب همبستگی ساده خطی داده‌های روزانه دو ایستگاه معرف در مقابل مقادیر نظیر سایر ایستگاه‌ها به منظور حدس اولیه برای انتخاب از میان آنها جهت رفع نقص داده‌های روزانه بوسیله روش نسبت نرمال در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ضرایب همبستگی بارش روزانه در دو ایستگاه مراغه و آشان در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها

	مراغه	قرمزیگل	گمبرف	خرمازرد	تازه‌کند	چکان	بناب
مراغه	۱	۰/۳۷	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۴۵	۰/۶۲
آشان	۰/۶۲	۰/۴۵	۰/۵۰	۰/۶۲	۰/۵۲	-	۰/۶۲
	ینگجه	اسفستانج	هرگلان	مغانجیق	قشلاق‌امیر	آشان	کندوان
مراغه	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۴۷	۰/۶۲	۰/۴۷
آشان	۰/۵۱	-	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۴۷	۱	۰/۴۲

با در نظر گرفتن معیار همبستگی بین داده‌های روزانه هر ایستگاه و ایستگاه‌های معرف چهار ایستگاه آشان، تازه‌کند، بناب و هرگلان جهت رفع نقص بارش‌های روزانه مراغه و چهار ایستگاه هرگلان، بناب، خرمازرد و مراغه به‌منظور رفع نقص و تطویل سری داده‌های بارش روزانه در آشان انتخاب شدند.

اعمال پیش شرط وجود بارش ثبت شده در حداقل ۵۰٪ درصد از ایستگاه‌های دارای داده در یک روز معین در رابطه نسبت نرمال ضریب همبستگی در تولید داده‌های روزانه مراغه و آشان از ایستگاه‌های منتخب را به ترتیب از ۰/۷۷ و ۰/۶۳ به ۰/۸۲ و ۰/۶۸ ارتقا داد، همچنین نسبت روزهای بارانی تولید شده بوسیله کد به روزهای بارانی واقعی موجود در مراغه و آشان به ترتیب از ۲/۱۸ و ۲/۸۴ به ۰/۸۹ و ۱/۲۷ کاهش یافت که نشانگر مؤثر واقع شدن پیش شرط مذکور می‌باشد. همبستگی در تولید بارش‌های ماهانه ایستگاه‌های معرف مراغه و آشان از ایستگاه‌های منتخب نیز به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۲ بدست آمد. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های روزانه تولید شده برای آشان در مدل‌ها به خصوص به‌منظور تطویل سری روزانه دارای دقت کافی نخواهد بود.

بررسی سری زمانی مقادیر متوسط سالانه پارامتر دما در دوره آماری مشترک (سال آبی ۸۹-۷۸) نشان داد که مقادیر این پارامتر در کلیه ایستگاه‌ها بدون توجه به فاصله آنها از هم‌دیگر با افزایش ارتفاع کم می‌شود. وجود وابستگی این چنینی بین دما و ارتفاع انتخاب ایستگاه معرف دما روی زیرحوزه‌ها را به واقع شدن آن ایستگاه در ارتفاعی نزدیک به ارتفاع متوسط حوزه منوط می‌سازد. ارتفاع متوسط زیرحوزه‌های صوفی‌چای و اسفستانچای به ترتیب ۲۳۸۵/۵ و ۱۹۲۸/۵ حاصل شدند که نزدیک‌ترین ایستگاه به لحاظ ارتفاعی به این مقادیر به ترتیب لیقوان و مغانجیق می‌باشد. با این حال ایستگاه سینوپتیک مراغه نیز دارای طولانی‌ترین داده ثبت شده بود لذا در کنار دو ایستگاه قبل در استخراج مدل بارش-رواناب به کار گرفته شد.

انتخاب مدل بارش-رواناب برای دوره آتی مستلزم ایجاد مدلی است که ورودی‌های آن برای دوره آتی در دسترس باشند. لذا برای نیل به اهداف این تحقیق ارتباط مقادیر روزانه دو متغیر بارش و دما با جریان رودخانه مدنظر قرار گرفته شده است.

برای انتخاب بهترین مجموعه ورودی به مدل IHACRES جستجو در میان بهترین نتایج از میان پنج ساختار مختلف از داده‌های روزانه (سه ساختار برای زیرحوزه صوفی‌چای و دو ساختار برای اسفستانچای) مطابق اطلاعات جدول ۳ پرداخته شد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

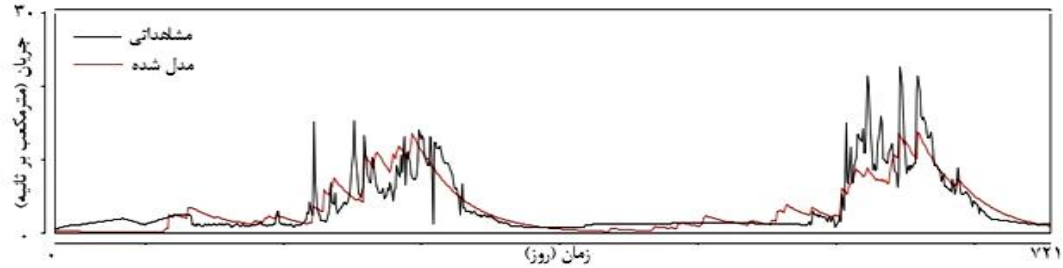
جدول ۳- ساختار اطلاعات ورودی به مدل IHACRES

نام ساختار	دما	بارش	جریان
S1	مراغه	مراغه	تازه‌کند
S2	مراغه	آشان	تازه‌کند
S3	لیقوان	آشان	تازه‌کند
S4	مراغه	مراغه	اسفستانج
S5	مغانجیق	مراغه	اسفستانج

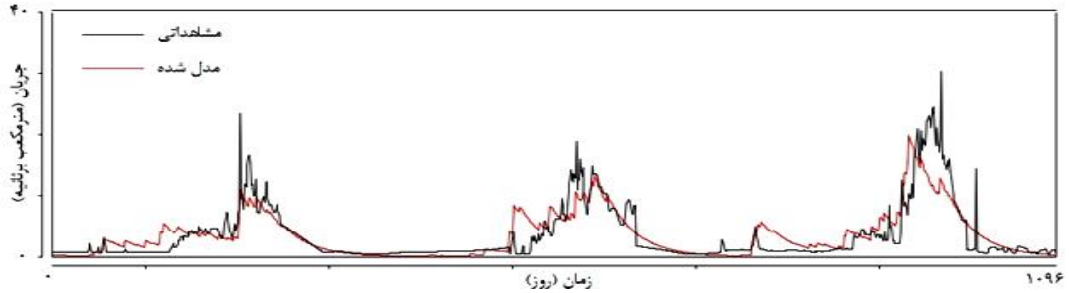
انتخاب دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی پتانسیل بر اساس دوره‌های مورد اعتماد (وجود سازگاری چشمی بین نمودار بارش و رواناب، داشتن کمترین داده مفقود و حدالامکان در برداشتن الگوی فراگیری از حالات مختلف رویدادی) بود. مقادیر نکویی برازش بین رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای هریک از ساختارهای ورودی به نرم‌افزار در دوره‌های منتخب واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به این مقادیر برای زیرحوزه صوفی‌چای مدل بوسیله داده‌های به کار رفته در ساختار S1 و پارامترهای l=۰، f=۶ و τ_w=۱۴ بهترین نتایج واسنجی و صحت‌سنجی را به همراه داشت. مقادیر این پارامترها برای مدل کردن جریان اسفستانج‌چای تحت ساختار داده‌های ورودی S4 به ترتیب ۰، ۴ و ۴ بدست آمدند. به عنوان نمونه شکل‌های ۲ و ۳ وضعیت عملکرد مدل بارش-رواناب روزانه IHACRES را در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند.

جدول ۴- مؤلفه‌های آماری مدل IHACRES برای پیش‌بینی مقادیر روزانه جریان تحت ساختارهای مختلف داده‌های ورودی (ساختارهای S1 تا S3 برای صوفی‌چای و ساختارهای S4 و S5 برای اسفستانج‌چای)

نام ساختار	واسنجی					صحت‌سنجی			
	NSE	R^2	(Min,Max) (مترمکعب بر ثانیه)	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)	NSE	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)
S1	۰/۷۲۱	۰/۷۲۲	(۰/۳۳,۲۲/۶۵)	۲/۱۰۰	۶۳ و ۶۵	۰/۶۹۳	۰/۶۹۴	۲/۵۲۲	۸۶-۸۴
S2	۰/۶۸۱	۰/۶۹۸	(۰/۵۴,۱۹/۵)	۱/۵۲۳	۷۹-۸۱	۰/۶۱۲	۰/۶۴۲	۲/۸۳۴	۸۶-۸۴
S3	۰/۷۵۲	۰/۷۵۳	(۰/۵۶,۱۹/۵)	۱/۸۷۷	۸۱	۰/۵۳۶	۰/۵۶۹	۳/۰۹۹	۸۶-۸۴
S4	۰/۶۸۶	۰/۶۸۷	(۰,۲/۹۶)	۰/۱۹۰	۸۱	۰/۵۶	۰/۵۹۱	۰/۱۸۰	۸۷-۸۶
S5	۰/۶۷۷	۰/۶۷۸	(۰,۲/۹۶)	۰/۱۹۲	۸۱	۰/۳۸۷	۰/۴۳۱	۰/۱۸۵	۸۷-۸۶



شکل ۲- سری زمانی جریان مشاهداتی و مدل شده IHACRES برای صوفی‌چای در دوره واسنجی تحت ساختار S1

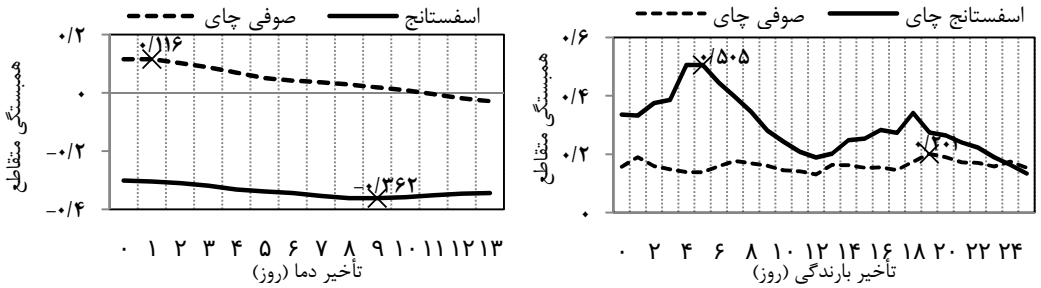


شکل ۳- سری زمانی جریان مشاهداتی و مدل شده IHACRES برای صوفی‌چای در دوره صحت‌سنجی تحت ساختار S1

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان صوفی‌چای، انحرافات کمی دارد. اگرچه مدل مقادیر حداکثر را در دوره صحت‌سنجی خیلی خوب نتوانسته شبیه‌سازی کند اما در مجموع با توجه به انحرافات کم مدل و شبیه‌سازی خوب مقادیر حداقل می‌توان گفت عملکرد مدل رضایت بخش است (شکل ۲ و ۳).

با فرض انتخاب بهترین ساختار در قسمت قبل (S1 برای صوفی‌چای و S4 برای اسفستانج‌چای) داده‌های ورودی مورد استفاده در ایجاد مدل برنامه‌ریزی ژنتیک نیز شامل دما و بارش و تاخیرهای آنها می‌شوند. برای شناسایی مناسب‌ترین داده‌های ورودی به منظور شبیه‌سازی جریان از توانایی منحصر به فرد برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده می‌شود اما برای درک بهتری از وضعیت ورودی‌ها و همچنین افزایش سرعت اجرای نرم‌افزار با بالا بردن محدودیت اولیه ورودی‌ها، آنالیز همبستگی متقاطع بارش- جریان و دما- جریان در گام‌های مختلف زمانی انجام پذیرفت (شکل ۴). نشان می‌دهد که بیش‌ترین همبستگی متقاطع بین مقادیر پیشین بارندگی و دمای متوسط، با جریان رودخانه اسفستانج‌چای (ساختار S4) به ترتیب زمانی اتفاق افتاده است که تاخیر ۵ و ۹ روز است. همبستگی بین بارش ۴ و ۵ روز قبل با جریان اسفستانج‌چای ۰/۵۰۵ و این مقدار بین دمای ۹ روز قبل و جریان ۰/۳۶۵- (علامت منفی بیان‌گر وجود رابطه معکوس است) می‌باشد. با این حال مقادیر همبستگی بین دما و جریان با افزایش تعداد تأخیرها تغییر قابل توجهی نداشته است. لذا پتانسیل اولیه خوبی برای ایجاد مدلی قوی ندارد.



(الف) (ب)

شکل ۴- همبستگی متقاطع الف) بارش- جریان ب) دما- جریان برای داده‌های روزانه سال آبی ۱۳۸۱

از آن‌جایی که هدف اصلی این مطالعه مقایسه دو مدل IHACRES و برنامه‌ریزی ژنتیک نمی‌باشد و مدل IHACRES نیز نتایج قابل‌قبولی در شبیه‌سازی جریان رودخانه صوفی‌چای ایجاد نمود، در این قسمت از برنامه‌ریزی ژنتیک صرفاً به‌منظور شبیه‌سازی جریان اسفستانج‌چای استفاده می‌شود. با توجه به نتایج فوق، همچنین محدودیت نرم‌افزار در دریافت بیش از ۱۷ ستون داده، ورودی‌های اولیه شامل بارش و دما و ۷ تأخیر از آنها می‌باشند. سپس با تعداد ۳ ژن و اندازه سر محدود شده h=۳ کار اجرای نرم‌افزار GeneXproTools را شروع کرده و با افزایش آن تا ۱۰ پیش رفتیم. بهترین نتیجه برنامه ژنتیک با تنظیم h=۸ بدست آمد. در نتیجه مقادیر معیارهای نکویی برازش بـر اساس رابطـه (۵) در جدول ۵ ارائه شد.

(۵)

$$Q_t = 0.5[R_{t-4}^3 + R_{t-5}^3 + T_{t-6} + (2A - 18.534)T_{t-2} + T_{t-3}T_{t-4}(R_t + R_{t-2}) + (15.73 - 2T_{t-7})A] + 112002$$
$$A = 3.78(R_{t-6} + R_{t-7}) + R_{t-6}R_{t-7} + 14.431$$

در این رابطه Q_t، R_t و T_t به ترتیب مقادیر دبی جریان (مترمکعب برثانیه)، بارش (میلی‌متر) و دمای متوسط هوا (درجه سلسیوس) مربوط به روز t می‌باشند. نتایج، در مقایسه با مدل IHACRES، حاکی از توانایی مدل برنامه‌ریزی ژنتیک در مدل نمودن جریان‌های روزانه اسفستانج‌چای در دوره واسنجی براساس معیارهای دقت، و ضعف آن در دوره صحت‌سنجی بر اساس معیارهای دقت و خطا، می‌باشد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

جدول ۵- مؤلفه‌های آماری مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی جریان روزانه اسفستانج‌چای (ساختار ورودی S4)

واسنجی					صحت سنجی				
NSE	R^2	(Min,Max) (مترمکعب بر ثانیه)	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)	NSE	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)
۰/۸۲۳	۰/۸۲۱	(۰,۲/۹۶)	۰/۱۴۵	۸۱	۰/۳۳۹	۰/۴۰۵	۰/۲۱۷	۸۶-۸۷

به‌منظور بررسی دقیق‌تر مدل‌های هیدرولوژیکی مذکور و توانایی آنها در نمایش متوسط تغییرات ماهانه جریان در آینده پس از کالیبره نمودن مدل‌ها در مقیاس روزانه نتایج برای بدست آوردن مقادیر ماهانه جمع شده و معیارهای عملکرد آنها بوسیله دو مدل IHACRES و برنامه‌ریزی ژنتیک به ترتیب در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶ - مؤلفه‌های آماری مدل IHACRES برای پیش‌بینی مقادیر متوسط ماهانه جریان تحت ساختارهای مختلف داده‌های ورودی (ساختارهای S1 تا S3 برای صوفی‌چای و ساختارهای S4 و S5 برای اسفستانج‌چای)

نام ساختار	واسنجی					صحت سنجی			
	NSE	R^2	(Min,Max) (مترمکعب بر ثانیه)	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)	NSE	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)
S1	۰/۸۸۶	۰/۸۸۷	(۰/۷۹,۱۱/۳۰)	۱/۱۳۸	۶۳ و ۶۵	۰/۸۱۸	۰/۸۳۰	۱/۷۸	۸۴-۸۶
S2	۰/۸۲۰	۰/۸۰۸	(۰/۵۵۳,۱۰/۳۶)	۱/۱۱۲	۷۹-۸۱	۰/۷۱۱	۰/۷۶۱	۲/۲۳۹	۸۴-۸۶
S3	۰/۸۸۱	۰/۸۸۲	(۰/۷۰۲,۱۰/۳۶)	۱/۱۳۸	۸۱	۰/۶۴۱	۰/۶۹۱	۲/۴۹۹	۸۴-۸۶
S4	۰/۹۱۳	۰/۹۱۶	(۰,۰/۸۵۹)	۰/۰۷۱	۸۱	۰/۷۸۴	۰/۷۹۹	۰/۱۰۲	۸۶-۸۷
S5	۰/۹۰۴	۰/۹۰۶	(۰,۰/۸۵۹)	۰/۰۷۵	۸۱	۰/۴۸۸	۰/۵۴۲	۰/۱۵۷	۸۶-۸۷

جدول ۷- مؤلفه‌های آماری مدل برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی مقادیر متوسط ماهانه جریان اسفستانج‌چای (ساختار S4)

واسنجی					صحت سنجی			
NSE	R^2	(Min,Max) (مترمکعب بر ثانیه)	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)	NSE	R^2	RMSE (مترمکعب بر ثانیه)	دوره (سال)
۰/۹۱۸	۰/۹۵۷	(۰,۰/۸۵۹)	۰/۰۴	۸۱	۰/۷۴۲	۰/۷۷۳	۰/۹۱۳	۸۶-۸۷

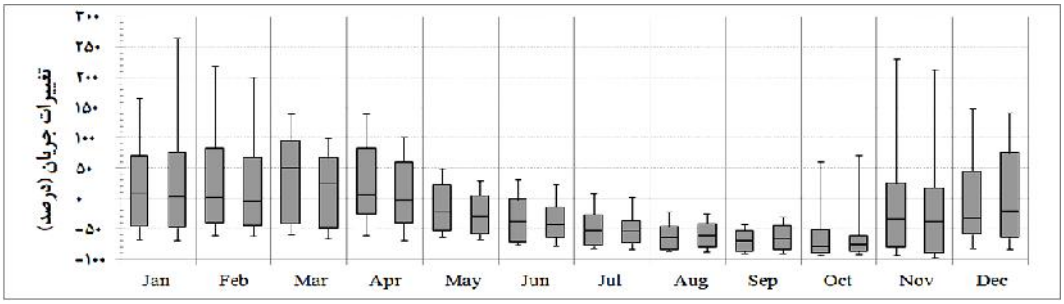
به‌منظور بررسی عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی حوزه، می‌بایست مقادیر دما و بارندگی شبیه‌سازی شده توسط این مدل‌ها در دوره پایه با مقادیر مشاهداتی ایستگاه معرف مقایسه گردد. ابتدا فایل داده‌های ماهانه دما و بارندگی ۱۰ مدل GCM، حاوی سری زمانی متغیرهای اقلیمی مربوط به سلول که ایستگاه مورد نظر در آن واقع شده است در دوره ۲۰۰۰- ۱۹۷۱ تهیه گردید. سپس، میانگین ۳۰ ساله ماهانه دما و بارندگی سلول مذکور محاسبه شد. نهایتاً این مقادیر با میانگین ۳۰ ساله ماهانه دما و بارندگی مشاهداتی منطقه مطالعاتی در همان دوره مورد مقایسه قرار گرفت. در مجموع عملکرد مدل‌های GCM در شبیه‌سازی مقادیر دما برای ایستگاه معرف مراغه نشان از بالا بودن مقدار ρ برای تمامی مدل‌ها و پایین بودن نسبی شاخص‌های خطا در اکثر مدل‌ها داشت. مدل IPSL-CM4 با ρ=۱/۰۰، RMSE=۱/۴۸°C/month و MAE=۱/۳۷°C/month دارای بهترین عملکرد و مدل BCM2.0 با وجود ρ بالا دارای ضعیف‌ترین عملکرد در شبیه‌سازی دما می‌باشند. همچنین مؤلفه‌های آماری مربوط به مدل‌های GCM برای بارندگی نشان می‌دهد نیمی از مدل‌ها دارای ρ نسبتا بالایی می‌باشند آن‌چنان‌که ۵ مدل دارای ρ بیش از ۰/۸۵ می‌باشند. مقایسه شاخص‌های خطا برای بارندگی بین این ۵ مدل نشان می‌دهد مدل HadCM3 و GISS-E-R دارای ضعیف‌ترین عملکرد اما مدل GFDL-CM2.1 با ρ=۰/۹۷، RMSE=۱۴/۴۰mm/month و MAE=۱۰/۷۳mm/month دارای بهترین عملکرد در شبیه‌سازی بارندگی می‌باشند.

اختلاف نتایج حاصل از انتخاب مدل رایج HadCM3 و بهترین مدل GCM در تولید دما و بارش در دوره پایه (T0) و تاثیر بر جریان رودخانه در دوره نزدیک ۲۰۳۰-۲۰۱۱ (T1) و دور ۲۰۶۵-۲۰۴۶ (T2) تحت دو

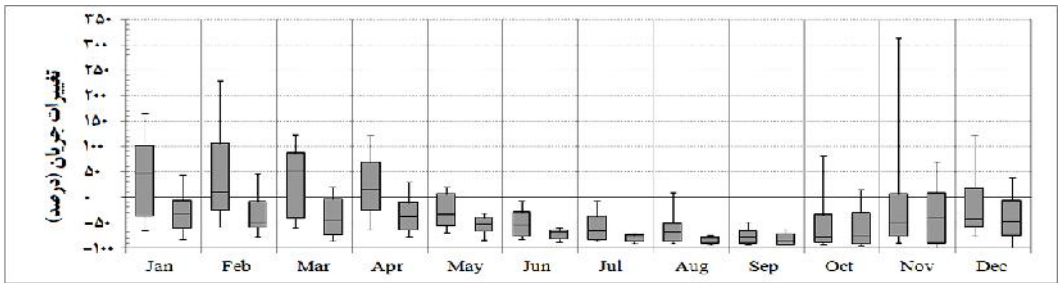
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

سناریوی انتشار A2 و B1 به طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه بین نتایج این دو مدل در شبیه‌سازی جریانات آتی، محدوده تغییرات ماهانه سری زمانی بلند مدت جریان ورودی به مخزن در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی از طریق نمودارهای جعبه‌ای نمایش داده می‌شود. مقادیر متناظر با اضلاع پایین و بالا و خط واقع درون این جعبه‌های مستطیلی به ترتیب بیانگر مقادیر چارک اول و سوم و میانه و مقادیر انتهایی خطوط متصل به هر جعبه معرف مقادیر دهک اول و نهم در آن ماه می‌باشد. در تحلیل‌های آتی از عبارت فصل نیز استفاده خواهد شد، به این صورت که سه ماه سرد یعنی دسامبر- ژانویه- فوریه برای زمستان و به ترتیب مجموعه سه ماه مارس-آپریل- مه، ژوئن- جولای- اوت و سپتامبر- اکتبر- نوامبر ماه‌های فصول بهار، تابستان و پاییز خواهند بود. استفاده از چنین روشی علاوه بر نشان دادن بازه تغییرات پاسخ هیدرولوژیکی حوزه نسبت به تغییرات متغیرهای اقلیمی به‌منظور انجام تحلیل آماری روی نتایج، می‌تواند عدم قطعیت (یا قطعیت) انتخاب یک مدل اقلیمی به‌خصوص (در اینجا HadCM3) را در ماه‌هایی که اختلاف حاصل از نتایج دو مدل اقلیمی زیاد (یا کم) است به خوبی نشان دهد.

با معرفی سری زمانی دما و بارش ریزمقیاس شده از مدل HadCM3 و بهترین مدل‌ها به مدل بارش-رواناب، ۳۰ سال داده روزانه جریان برای دو دوره آتی تولید شد. با جمع دبی تولید شده برای اسفستانچای و صوفی‌چای در گام زمانی روزانه و سپس جمع آنها برای هر ماه سری بلند مدت جریان ماهانه ورودی به سد علویان ایجاد و نتایج با متوسط دوره T0 مقایسه شد. شکل‌های ۵ و ۶ محدوده درصد تغییرات سری زمانی بلند مدت رواناب ماهانه آتی نسبت به دوره مشاهداتی را با مقایسه دو روش استفاده از خروجی‌های مدل رایج HadCM3 و خروجی‌های دما و بارش دو مدل منتخب IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 تحت سناریو A2 به ترتیب برای دو دوره T1 و T2 نشان می‌دهند.



شکل ۵- محدوده تغییرات سری زمانی بلند مدت جریان ماهانه ورودی به مخزن در دوره T1 شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 (سمت چپ) و مدل‌های IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 (سمت راست) نسبت به دوره T0 تحت سناریو انتشار A2



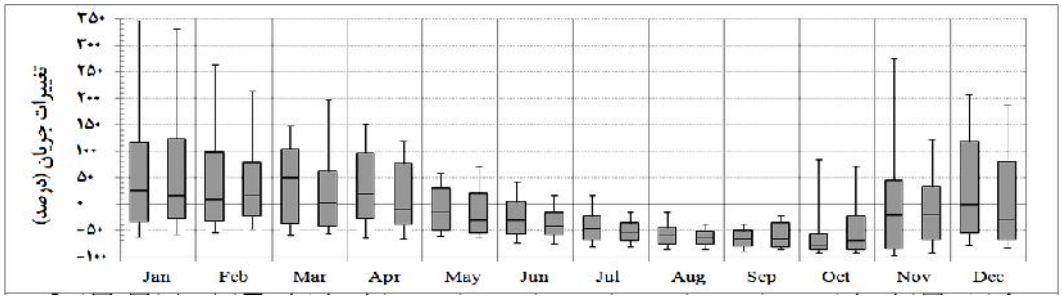
شکل ۶- محدوده تغییرات سری زمانی بلند مدت جریان ماهانه ورودی به مخزن در دوره T2 شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 (سمت چپ) و مدل‌های IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 (سمت راست) نسبت به دوره T0 تحت سناریو انتشار A2

همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود روند افزایش و کاهش جریان در شبیه‌سازی توسط مدل رایج HadCM3 تحت سناریو A2 در فصول مختلف سال تا حد زیادی مشابه با به کارگیری دو مدل IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 می‌باشد. مقایسه آماری دو روش نشان از مطابقت مقادیر میانه، میانگین چارک پایین و دهک اول تغییرات دارد. اختلاف مقادیر دهک نهم تغییرات بین دو روش ذکر شده برای فصول زمستان، بهار،

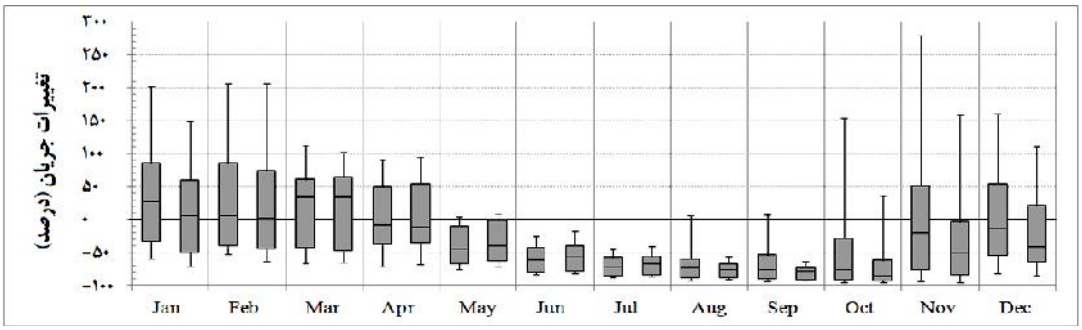
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

تابستان و پاییز به ترتیب برابر ۲۲/۱، ۳۱/۵، ۵/۸ و ۶/۳ درصد می‌باشد. همچنین این اختلاف برای مقادیر چارک بالا به ترتیب برابر ۷/۹، ۲۲/۴، ۵ و ۳/۲ درصد می‌باشد. بنابراین کمترین مطابقت بین دو روش مربوط به فصل بهار و بیش‌ترین مطابقت مربوط به فصل تابستان و پاییز می‌باشد. در مجموع متوسط سالانه تغییرات جریان در مورد میانه و میانگین تغییرات به ترتیب ۲۶/۸- و ۱۸- درصد از مدل HadCM3 و ۳۰/۵- و ۲۲/۳- درصد از دو مدل منتخب حاصل گردید که نشانگر اختلاف کمتر از ۵ درصد بین نتایج دو روش تحت سناریو A2 و دوره T1 می‌باشد. برخلاف آنچه برای دوره T1 مشاهده شد محدوده تغییرات جریان در دوره T2 اختلافات بیش‌تری را نشان می‌دهد. این اختلاف در ماه‌های پـر بارش بیش‌تر از ماه‌های کم بارش می‌باشد (شکل ۶). همچنین تقریبا در تمـامی ماه‌هـا بـدنه اصلی جعبه‌ها با استفاده از مدل‌های منتخب پایین‌تر از مدل HadCM3 قرار داشته و نشان از کاهش بیش‌تر میزان جریان در دوره T2 و تحت سناریو A2 دارد. بررسی آماری نتایج نشان می‌دهد که اختلاف مقادیر میانگین تغییرات تولید شده از دو روش برای فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۶۰/۷، ۹۷/۶، ۲۳/۲ و ۱۹ درصد می‌باشد. این اختلاف‌ها برای مقادیر میانه ۴۴/۵، ۱۱۲/۷، ۱۳/۳ و ۰/۳ می‌باشند که به ترتیب برای فصول پربارش بهار و زمستان بیش‌ترین و فصل پاییز و تابستان کم می‌باشد. اختلاف محدوده تغییرات چارک بالا تا پایین در نیمه اول سال (میلادی) بین دو روش نشانگر عدم قطعیت بالای استفاده ساده از یک مدل GCM در پیش‌بینی‌های جریان تحت سناریو A2 در دوره T2 می‌باشد. همانگونه که از شکل ۶ نیز معلوم است کاهش جریان در فصول پاییز و تابستان و همچنین ماه اول سرما (دسامبر) و ماه آخر بهار (مه) از نتایج هر دو روش تحت سناریو A2 برای دوره T2 بسیار محتمل است.

شکل‌های ۷ و ۸ محدوده درصد تغییرات سری زمانی بلندمدت رواناب ماهانه آتـی نسبت به دوره مشاهداتی را با مقایسه دو روش استفاده از خروجی‌های مدل رایج HadCM3 و خروجی‌های دما و بارش دو مدل IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 تحت سناریو انتشار B1 به ترتیب برای دو دوره T1 و T2 نشان می‌دهند.



شکل ۷- محدوده تغییرات سری زمانی بلند مدت جریان ماهانه ورودی به مخزن در دوره T1 شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 (سمت چپ) و مدل‌های IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 (سمت راست) نسبت به دوره T0 تحت سناریو انتشار B1



شکل ۸- محدوده تغییرات سری زمانی بلند مدت جریان ماهانه ورودی به مخزن در دوره T2 شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 (سمت چپ) و مدل‌های IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 (سمت راست) نسبت به دوره T0 تحت سناریو انتشار B1

روند افزایش و کاهش جریان در شبیه‌سازی توسط مدل رایج HadCM3 تحت سناریو B1 در فصول مختلف سال مشابه آنچه در مورد سناریو A2 مشاهده شد اختلاف چندانی با به‌کارگیری دو مدل IPSL-CM4 و GFDL-CM2.1 ندارد (شکل ۷). مقایسه آماری دو روش نشان از مطابقت مقادیر چارک پایین و میانگین برای همه ماه‌ها، میانه به جز در سه ماه مارس، آوریل و دسامبر و همچنین دهک اول درصد تغییرات به جز در دو ماه ژانویه و فوریه (با اختلاف نزدیک به یا کمتر از ۱۰ درصد)دارد. اختلاف مقادیر دهک نهم تغییرات بین دو روش مذکور برای فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب برابر ۲۹، ۸/۷، ۲۶/۷ و ۳۰/۲ درصد

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

می‌باشد. همچنین این اختلاف برای مقادیر چارک بالا به ترتیب برابر ۱۷/۳، ۲۳/۵، ۱۲/۹ و ۱۵/۵ درصد می‌باشد. بنابراین اگرچه اختلاف در مقادیر دهک نهم تغییرات در فصل بهار کمترین است، کمترین مطابقت بین دو روش با توجه به مقدار چارک بالا مربوط به فصل بهار و بیش‌ترین مطابقت مربوط به فصل تابستان می‌باشد. در مجموع متوسط سالانه تغییرات جریان در مورد میانگین و میانه تغییرات به ترتیب ۸/۵- و ۱۷/۸- از مدل HadCM3 و ۱۴/۶- و ۲۸/۷- از دو مدل منتخب حاصل گردید که نشان از اختلاف ۶/۱ درصد برای میانگین و ۱۰/۹ درصد برای میانه بین نتایج دو روش تحت سناریو B1 و دوره T1 دارد. این نتایج در مقایسه با مقادیر نظیر تحت سناریو A2 نشان می‌دهد که متوسط کاهش میانگین سالانه سری بلند مدت جریان پیش‌بینی شده برای دوره T1 نسبت به دوره مبنا بوسیله سناریوی A2 به ترتیب ۷/۵ و ۷/۳ درصد توسط مدل HadCM3 و مدل‌های منتخب بیشتر بوده است. این اختلاف برای میانه به ترتیب ۹/۰ و ۱/۸ درصد است. نتایج اخیر نشان از عدم قطعیت کم ناشی از انتخاب سناریوهای انتشار بر میزان جریان منطقه برای دوره T1 می‌باشد.

محدوده تغییرات جریان در دوره T2 نیز مشابه دوره T1 نشان از مطابقت نسبی بین نتایج حاصل از دو روش استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 و استفاده از خروجی‌های مدل‌های منتخب دارد (شکل ۸) که از این نظر با نتایج نظیر تحت سناریو A2 متفاوت می‌باشد. مقایسه آماری دو روش نشان از مطابقت مقادیر میانه، چارک پایین و دهک اول تغییرات برای همه ماه‌ها به جز سه ماه نوامبر، دسامبر و ژوئن و همچنین میانگین تغییرات به جز در چهار ماه اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژوئن دارد. اختلاف مقادیر دهک نهم تغییرات بین دو روش ذکر شده برای فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب برابر ۳۵/۸، ۱/۲، ۶/۵ و ۱۰۲/۰ درصد می‌باشد. همچنین این اختلاف برای مقادیر چارک بالا به ترتیب برابر ۲۳/۷، ۵/۷، ۱/۲ و ۳۳/۷ درصد می‌باشد. بنابراین کم‌ترین تطابق بین دو روش با توجه به مقدار چارک بالا و دهک نهم مربوط به فصل پاییز می‌باشد. همچنین فصول بهار و تابستان در هر دو تحلیل دهک نهم و چارک بالا نشانگر تطابق بالایی است. در مجموع متوسط سالانه تغییرات جریان در مورد مقادیر میانه و میانگین تغییرات به ترتیب ۲۰/۲- و ۳۱/۲- از مدل HadCM3 و ۳۱/۶- و ۳۸/۶- از دو مدل منتخب حاصل گردید که در مقایسه با نتایج نظیر از سناریو انتشار A2 نشان از اختلاف کم بین نتایج دو روش تحت سناریو B1 و دوره T1 می‌باشد. درمجموع چنین به نظر می‌رسد که استفاده از مدل‌های مختلف اقلیمی به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیکی منطقه تحت سناریو B1 در مقایسه با نتایج نظیر از سناریو A2، عدم قطعیت بالایی ایجاد نمی‌کند. همچنین همان‌گونه که از شکل ۸ نیز معلوم است تحت سناریو B1 کاهش جریان در فصول پاییز و تابستان و ماه آخر بهار (مه) از نتایج هر دو روش محتمل است درحالی که در فصول بهار و زمستان به دلیل قرار گرفتن مقادیر میانگین و میانه تغییرات حول و نزدیک به محور صفر هیچ‌گونه کاهش یا افزایش چشم‌گیری قابل پیش‌بینی نمی‌باشد.

در این تحقیق با ریزمقیاس نمودن خروجی مدل‌های اقلیمی و سپس وارد نمودن آنها در مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک و IHACRES جریانات حوزه صوفی‌چای در بالادست سد علویان تحت شرایط تغییر اقلیم آتی تعیین گردید. مقایسه مقادیر متغیرهای اقلیمی مدل‌های مختلف GCM نشان داد دو مدل اقلیمی GFDL-CM2 و IPSL-CM4 به ترتیب نزدیک‌ترین پیش‌بینی‌ها را با مقادیر متوسط دراز مدت دو متغیر بارش و دما در منطقه مورد مطالعه دارند. نتایج انتخاب بهترین مدل اقلیمی برای دما مطابق با نتایجی بود که واثقی (۲۲) برای ایستگاه کرمانشاه بدست آورد، اما در مورد بارش نتایج متفاوت بود. نتایج پیش‌بینی‌های مقادیر دما، بارش و پاسخ هیدرولوژیکی حوزه در مدل‌های اقلیمی منتخب در کنار نتایج نظیر مدل پرکاربرد HadCM3 در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش-رواناب نشان داد بهترین مدل بر اساس شبیه‌سازی‌های روزانه و ماهانه برای هر دو زیر حوزه از مقادیر دما و بارش ثبت شده در ایستگاه مراغه و بوسیله مدل IHACRES حاصل می‌شود. به‌طورکلی روند تغییر جریان تولید شده برای دوره‌های آتی و تحت سناریوهای انتشار مطابق و همسو با نتایج به دست آمده برای بارش بود. که به طور ضمنی بیان‌گر اهمیت پارامتر بارش در تولید جریان رودخانه بوسیله مدل هیدرولوژیکی است. متوسط کاهش نسبی جریان سالانه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به ترتیب برای دو سناریو انتشار A2 و B1، ۱۸- و ۸/۵- درصد توسط مدل رایج HadCM3 و ۲۲/۳- و ۱۴/۶- درصد توسط مدل‌های منتخب حاصل شد. این مقادیر برای دوره ۲۰۶۵-۲۰۴۶، ۱۶/۶- و ۲۰/۲- (از مدل HadCM3) و ۵۵/۹- و ۳۱/۶- درصد (از مدل‌های منتخب) محاسبه شدند. مشابه با نتایج مدل HadCM3 در ضرغامی و همکاران (۲۶) میانگین جریان ماه مه (پیک) افت ۱۵- تا ۳۵- درصد بدست آمد. این محدوده بوسیله مدل‌های منتخب ۲۵- تا ۵۰- یعنی شدیدتر از مدل رایج حاصل شد.

همانطور که از نتایج این تحقیق برمی‌آید بحث پیرامون اثرات تغییر اقلیم بر منابع آبی دارای منابع عدم‌قطعیت مختلفی است که عمده‌ترین آن به سناریوهای انتشار و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده اقلیمی بزرگ مقیاس مربوط می‌شود و مهم‌ترین عاملی که بر

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

این عدم قطعیت دامن خواهد زد به کار بردن نتایج حاصل از یک مدل اقلیمی برای یک دوره دور مثلاً بیش از نیم قرن می‌باشد. بنابراین بررسی مطالعاتی مختلف روی این سناریوها و سایر مدل‌های اقلیمی یا متوسط آنها می‌تواند به درک و جمع‌بندی کامل‌تری نسبت به اثرات تغییر اقلیم کمک کند.

منابع

1. Croke, B.F.W., F. Andrews, J. Spate and S.M. Cuddy. 2005. IHACRES User Guide. Technical report 2005/19. 2nd edn., iCAM, School of Resources, Environment and Society, The Australian National University, Canberra, 45 pp.
2. Ehrman, J.M., K. Higuchi and T.A. Clair. 2000. Backcasting to test the use of neural networks for predicting runoff in Canadian rivers. Canadian Water Resources, 25: 279-308.
3. Evans, J. and S. Schreider. 2002. Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth, Australia. Climate Change, 55: 361-393.
4. Fang, X. and J.W. Pomeroy. 2008. Drought impacts on Canadian prairie wetland snow hydrology. Hydrological Processes, 22: 2858-2873.
5. Hsu, K.L. and H.V. Gupta. 1995. Artificial neural network modelling of the rainfall-runoff process. Water Resources Research, 31: 2517-2530.
6. IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change, 83 pp.
7. IPCC-TGICA. 2007. General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation 9-Assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment, 66 pp.
8. Jakeman, A.J. and G.M. Hornberger. 1993. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? Water Resources Research, 29: 2637-2649.
9. Kamal, A., A. Massah Bavani and M. Gudarzi. 2010. Assessment of Hydrological impacts of climate change on Qareh Soo sub-basin, 2nd National Congress on Dam Construction, Islamic Azad University of Zanjan, Zanjan, Iran, 10 pp. (In Persian)
10. Lehning, M., I. Volksch, D. Gustafsson, T.A. Nguyen, M. Stähliand and M. Zappa. 2006. ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. Hydrological Processes, 20: 2111-2128.
11. Li, L., H. Xu, X. Chen and S. Simonovic. 2010. Streamflow Forecast and Reservoir Operation Performance Assessment under Climate Change. Water Resources Management, 24: 83-104.
12. Liu, X. and P. Coulibaly. 2011. Downscaling Ensemble Weather Predictions for Improved Week-2 Hydrologic Forecasting. Journal of Hydrometeorology, 12: 1564-1580.
13. Moore, K., D. Pierson, K. Pettersson, E. Schneiderman and P. Samuelsson. 2008. Effects of warmer world scenarios on hydrologic inputs to Lake Malaren, Sweden and implications for nutrient loads. Hydrobiologia, 599: 191-199.
14. Payne, J.T., A.W. Wood, A.F. Hamlet, R.N. Palmer and D.P. Lettenmaier. 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River Basin. Climate Change, 62: 233-256.
15. Semenov, M.A. and P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. Climate Research, 41: 1-14.
16. Setegn, S., D. Rayner, A.M. Melesse, B. Dargahi and R. Srinivasan. 2011. Impact of climate change on the hydro-climatology of Lake Tana basin, Ethiopia. Water Resources Research, 47: 1-13.
17. Smit, B., I. Burton, R.J.T. Klein and J. Wandel. 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. Climate change, 45: 223-251.
18. Thodsen, H. 2007. The influence of climate change on stream flow in Danish rivers. Journal of Hydrology, 333: 226-238.
19. Thomas, R.B. and W.F. Megan. 1998. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, Western Cascades, Oregon: A second opinion. Water Resources Research, 34: 3393-3403.
20. Tol, R.S.J., N. Van Der Grijp, A.A. Olsthoorn and P.E.V.D. Werff. 2003. Adapting to climate: a case study on riverine flood risks in the Netherlands. Risk Analysis, 23: 575-583.
21. USAID. 2007. Adapting to Climate Variability and Challenge: A Guidance Manual for Development Planning. USAD, United states, August 2007, 24 pp.
22. Vaseghi, R. 2011. Impact assessment of multi-model ensembles from atmosphere-ocean general circulation models on runoff of the Gharesou basin. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University, science and research branch of Tehran, Tehran, Iran, 87 pp. (In Persian)
23. Vicuna, S. and J.A. Dracup. 2007. The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. Climatic Change, 82: 327-350.
24. Ye, W., B.C. Bates, N.R. Viney, M. Sivapalan and A.J. Jakeman. 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephermal catchments, Water Resources Research, 33: 153-166.
25. Yohe, G.W. 2000. Assessing the Role of Adaptation in Evaluating Vulnerability to Climate Change. Climatic Change, 46: 371-390.
26. Zarghami, M., A. Abdi, I. Babaeian, Y. Hassanzadeh and R. Kanani. 2011. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. Global and Planetary Change, 78: 137-146. (In Persian)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]

Raifall-Runoff Modelling under the Climate Change Condition in Order to Project Future Streamflows of Sufichay Watershed

Seyed Hasan Hosseini[1], Mohamad Ali Ghorbani[2] and Alireza Massah Bavani[3]

1- PhD Student, Tabriz University, (Corresponding author: hosseini_hasan@yahoo.com)
2- Associate Professor, Tabriz University
3- Associate Professor, Tehran Universitv
Received: June 19, 2013 Accepted: December 3, 2013

Abstract

Two major issues through studies on hydrological impact assessment of climate change are the sufficiency of historical data and selection of the best rainfall-runoff model. Climate models, with the ability to simulate climatic variables, are considered as references for future projections. Therefore, the rainfall-runoff model must be able to simulate streamflow using only these variables. Current study addresses a methodology of choosing the best model from global climate models for impact assessments which require local-scale climate scenarios. The approach is based on the use of a weather generator which can generate the local-scale daily climate scenarios used as an input in many process-based impact models. The results of analysis of Sufichay streamflows, which flow in Urmia lake basin, by the rainfall-runoff model of IHACRES, indicated a considerable difference between the climate models under emission scenarios A2 for the future period 2046-65. There were no noticeable differences under emission scenarios B1 for both future periods (2011-30 and 2046-65) and under emission scenarios A2 for the near period (2011-30) especially in warm seasons. The uncertainty of selecting different emission scenarios was low for the period 2011-30 and high for the mid-century (2046-65).

Keywords: Climate change, GeneXproTools, IHACRES, LARS-WG, Rainfall-runoff, Sufichay

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-06]