نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال پانزدهم، شماره ۳۸، پاییز ۹۴

تحلیل تغییرات جریان تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب در حوضه رودخانه کُر

دریافت مقاله: ۹۲/۳/۵ پذیرش نهایی: ۹۴/۱۲/۶
صفحات:۴۷-۳۱

زهرا بیگم حجازی زاده: استاد اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
Email: hejazizadeh@tmu.ac.ir
پریسا سادات آشفته: دکتری منابع آب، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، ایران[1]
Email:pashofteh@ut.ac.ir
ابراهیم فتاحی: دانشیار اقلیم‌شناسی، پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
Email: ebfat۲۰۰۰@yahoo.com
زهرا غلام‌پور: دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
Email: Gholampour۱۳۸۲@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به‌منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه کر از داده‌های دما و بارندگی ماهانه مربوط به مدل HadCM 3 طی دوره پایه ۲۰۰۱-۱۹۷۲ و دوره آتی ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تحت سناریوی انتشار A2 استفاده شد. خروجی مدل HadCM3 بر اساس روش کوچک‌مقیاس کردن زمانی عامل تغییر و روش کوچک مقیاس کردن مکانی تناسبی برای حوضه موردنظر کوچک‌مقیاس شدند. سپس، سری زمانی دما و بارندگی ماهانه در دوره آتی تولید شد. نتایج نشان داد که دما و بارندگی در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. در ادامه با واسنجی مدل IHACRES، رابطه بارش- رواناب ماهانه حوضه شبیه‌سازی شد. سپس با معرفی سری‌های زمانی ماهانه دما و بارندگی کوچک‌مقیاس شده حوضه به مدل بارش- رواناب، سری زمانی رواناب ماهانه برای دوره ۲۰۴۰ -۲۰۱۱ شبیه‌سازی گردید. مقایسه رواناب دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی نشان از تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب این حوضه در سال‌های آتی دارد، به‌طوری‌که رواناب سالانه حوضه در حدود ۹/۴۳ درصد کاهش می‌یابد. در ضمن، رواناب آتی در برخی ماه‌ها (ژانویه، فوریه، می و ژوئن)، افزایش را نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد.

کلید واژگان: تغییر اقلیم، مدل IHACRES، کوچک‌مقیاس کردن، حوضه رودخانه کر، سناریوی انتشار.

[1]. **نویسنده مسئول:** قم- بلوار الغدیر- بعد از شهرک قدس- دانشگاه قم- دانشکده فنی و مهندسی- گروه عمران.
عمران.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

مقدمه

مسئله تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که می‌تواند آثار زیانباری برای جوامع بشری داشته باشد. از عوامل مؤثر در بروز این پدیده، افزایش گازهای گلخانه‌ای به‌واسطه صنعتی شدن جوامع بشری است. مهم‌ترین اثر افزایش این گازها، افزایش متوسط دمای کره زمین است، به‌گونه‌ای که سناریوهای اخیر هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم[۱] (IPCC) (۲۰۰۷) افزایش متوسط جهانی دما را تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کند. طبق گزارش‌های IPCC تغییر اقلیم می‌تواند بر عناصر هیدرولوژی مانند رواناب رودخانه‌ها، آب‌های زیرزمینی، شدت سیلاب اثر بگذارد. این اثرات می‌تواند عواقب زیانباری برای جوامع بشری به‌دنبال داشته باشد. بنابراین، بررسی تغییرات رژیم هیدرولوژیکی در سال‌های آتی می‌تواند راهگشای معضلاتی چون خشکسالی و سیلاب‌های ناگهانی باشد. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در این مورد برای حوضه‌های مختلف صورت گرفته است.

استیل-دان[۲] و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM۵ و سناریوی انتشار A1B برای نه حوضه واقع در کشور ایرلند پرداختند. آن‌ها از مدل بارش- رواناب HBV-Light برای بررسی وضعیت جریان رودخانه در دوره آتی ۲۰۶۰ -۲۰۱۰ استفاده کردند. در ابتدا داده‌های دما و بارندگی استخراج‌شده از مدل ECHAM۴ با استفاده از روش کوچک‌مقیاس کردن مکانی تناسبی[۳] کوچک‌مقیاس شده و به مدل بارش- رواناب معرفی گردید. نتایج نشان داد که بارش زمستانه و بارش تابستانه به ترتیب افزایش و کاهش دارند. همچنین میزان رواناب رودخانه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد کرد.

در تحقیق دیگری که توسط آشفته و مساح‌بوانی (۱۳۸۷) انجام گرفت، تأثیر عدم قطعیت تغییر اقلیم بر دبی اوج حوضه آیدوغموش در یک دوره ۳۰ ساله ۲۰۶۹ -۲۰۴۰ و فقط برای سناریوی A۲ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از هفت مدل سه‌بعدی جفت شده اقیانوس- اتمسفر گردش عمومی جو[۴] (AOGCM) استفاده‌شده بود. نتایج نشان داد که دمای حوضه در دوره ۲۰۵۰s بین حدود ۱ تا ۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش ۸۰- تا ۱۰۰٪ خواهد بود. مقایسه شدت سیلاب‌های نمونه‌ها

[1] Intergovernmental Panel Of Climate Change
[2] Steel-Dunne
[3] Proportional
[4] Atmosphere- Ocean General Circulation Model

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

در دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آتی با وضعیت کنونی آن، نشان داد که دبی اوج حوضه تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود.

بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه لارنس[1] در کانادا توسط بویر[2] و همکاران (۲۰۱۰) انجام گرفت. در تحقیق ایشان، منابع عدم قطعیت مربوط به سه مدل AOGCM شامل HadCM۳ ،CSIRO-MK ۲ و ECHAM۴ و تحت دو سناریوی انتشار A۲ و B۲ مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از مدل هیدرولوژیکی HSAMI برای بررسی میزان جریان رودخانه در سه دوره ۳۰ ساله آتی و دوره پایه استفاده گردید. نتایج نشان داد که میانگین دما افزایش می‌یابد. همچنین میزان دبی تحت تأثیر تغییر اقلیم تغییر خواهد نمود.

گودرزی و همکاران (۱۳۸۹) در تحقیقی به بررسی تغییرات هیدرولوژیکی حوضه رودخانه اعظم هرات- یزد تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداختند. در این راستا از سناریوی A2 از مجموعه سناریوهای انتشار[3] و مدل CGCM3-AR4 و یک مدل مفهومی بارش- رواناب استفاده کردند. نتایج نشان داد که میزان رواناب در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، تغییر خواهد کرد.

اوم[4] و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی ارزیابی ریسک سیلاب در بالادست حوضه رودخانه تیمز[5] تحت تأثیر تغییر اقلیم پرداختند. روش به‌کاررفته برای تخمین ریسک سیلاب شامل تحلیل یکپارچه مدل اقلیم- هیدرولوژی- هیدرولیک در دشت‌های سیلابی و تحت شرایط سیلابی است. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم باعث افزایش شدت و فراوانی سیلاب در حوضه بالادست رودخانه شده است.

همچنین پژوهش‌های صورت گرفته، در خصوص مدل‌های HadCM3 ، IHACRES و سناریوی انتشار A۲، در ادامه ارائه‌شده است.

زارعی و همکاران (۱۳۸۸) جهت شبیه‌سازی جریان حوضه آبخیز سیلیان واقع در استان مازندران از مدل بارش-رواناب IHACRES استفاده نمودند. میزان خطای بین مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بر اساس معیارهای MAE، RMSE و NSE برآورد گردید. هم‌چنین معنی‌داری و عدم معنی‌داری میزان اختلاف بین مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به روش آزمون t جفتی و به‌وسیله نرم‌افزار SPSS بررسی شد. نتایج نشان دادند که مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌های روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد، ولی قابلیت شبیه‌سازی

[1] Lawrence
[2] Boyer
[3] Emission Scenarios
[4] Eum
[5] Thames

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

داده‌های سالانه را ندارد. از سوی دیگر، در مقایسه بین جریان روزانه و ماهانه، نتایج شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به جریان روزانه قابل‌قبول‌تر است.

خیرفام و همکاران (۱۳۹۲) دبی روزانه جریان را با استفاده از مدل IHACRES شبیه‌سازی و کارآیی آن را در هفت زیرحوزه رودخانه گرگان‌رود استان گلستان ارزیابی نمود. ارزیابی نتایج مدل‌سازی دبی‌های جریان با استفاده از معیارهای کارآیی نشان داد که توانایی مدل مذکور در برآورد مقادیر بالای دبی روزانه تاحدی مناسب، ولی در بیش‌تر حوضه‌ها، نتایج برآورد مقادیر دبی با فراوانی بیش از ۶۰ درصد، ضعیف بوده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در بیش‌تر ایستگاه‌ها، مقادیر برآوردی مدل خصوصاً در مقادیر دبی اوج کم‌تر از مقادیر مشاهداتی بود.

آشفته[1] و همکاران (۲۰۱۳a) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های کارآیی مخزن در بازه آتی ۲۰۳۹-۲۰۲۶ پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود از مدل اقلیمی HadCM3 و تحت سناریوی انتشار A۲ ، استفاده نمودند. در ضمن، مدل هیدرولوژیکی به‌کار رفته، مدل IHACRES بود. نتایج بررسی‌ها نشان دادند که شاخص‌های کارآیی مخزن (اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و برگشت‌پذیری) تحت شرایط تغییر اقلیم تغییر خواهند کرد.

آشفته و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی سیاست تخصیص آبیاری تحت شرایط تغییر اقلیم با ابزار بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ژنتیک[2] (GP) پرداختند. برای شبیه‌سازی جریان رودخانه در دوره آتی از مدل IHACRES استفاده شد. در ضمن خروجی مدل اقلیمی کوچک مقیاس شده HadCM3 (تحت سناریوی انتشار A۲) وارد مدل هیدرولوژیکی شد. برای بررسی سیاست تخصیص، سه سناریوی بهره‌برداری مدنظر قرار گرفت. نتایج نشان دادند که کاربرد سیاست تخصیص بهینه آتی تحت شرایط تغییر اقلیم نسبت به قواعد فعلی بهره‌برداری تحت شرایط جاری منجر به کاهش معیارهای عملکرد جذر میانگین مربعات خطا[3] (RMSE)، متوسط خطای خطای مطلق[4] (MAE)، به ترتیب به میزان ۲۹ و ۳۰ درصد، خواهد شد.

بنابراین تغییر اقلیم بر متغیرهایی نظیر دما و بارش تأثیر می‌گذارد. این تأثیرات در داخل حوضه، حجم آورد رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کشور ما نیز از اثرات ناشی از این پدیده مصون نبوده و با توجه به‌قرار گرفتن در عرض‌های جغرافیایی پایین، بیش‌ترین تبعات منفی این پدیده را متحمل خواهد شد؛ بنابراین، ضروری است اثرات این پدیده بر مؤلفه‌های مهم و تأثیرگذار (همانند تخمین میزان رواناب رودخانه) در سطح حوضه، شناسایی شوند که این

[1] Ashofteh
[2] Genetic Programming
[3] Root Mean Square Error
[4] Mean Absolute Error

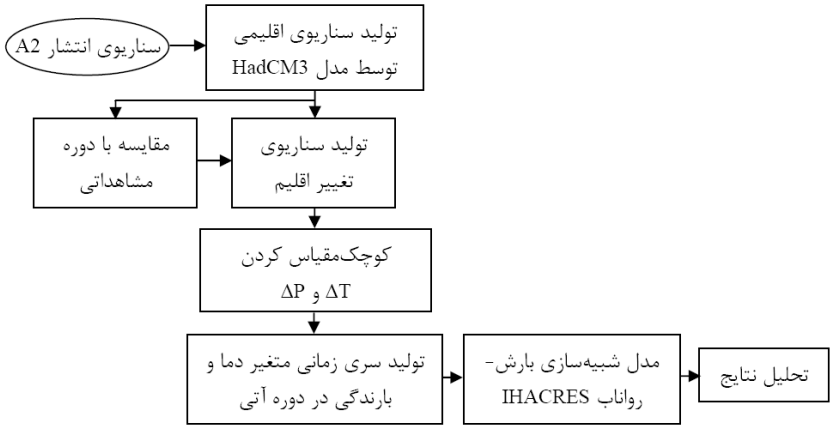
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

موضوع به‌عنوان یکی از اهداف مهم در سطح حوضه موردمطالعه، مدنظر قرار گرفت. در این تحقیق در ابتدا داده‌های اقلیمی دما و بارندگی برای دوره پایه (۲۰۰۱ -۱۹۷۲) و دوره آتی (۲۰۴۰ -۲۰۱۱) با استفاده از خروجی مدل HadCM۳ و تحت سناریوی انتشار A۲ استخراج خواهد شد. سپس تأثیر تغییر اقلیم برآورد ورودی رودخانه کر که در استان فارس واقع‌شده است، با استفاده از مدل شبیه‌سازی بارش- رواناب IHACRES در دوره آتی بررسی می‌شود.

داده‌ها و روش کار

در این قسمت در ابتدا ویژگی‌های منطقه مورد مطالعاتی تحقیق معرفی می‌شود. سپس روش‌های موردنیاز برای این تحقیق که مراحل انجام آن در شکل (۱) آورده شده است، ارائه خواهد شد.

در مورد نحوه دست‌یابی به داده‌های مورداستفاده تحقیق، در قسمت‌های آتی به‌ترتیب اشاره در متن، توضیحات لازم ارائه‌شده است.



شکل (۱) مراحل ارزیابی تغییرات جریان رودخانه کر تحت شرایط تغییر اقلیم

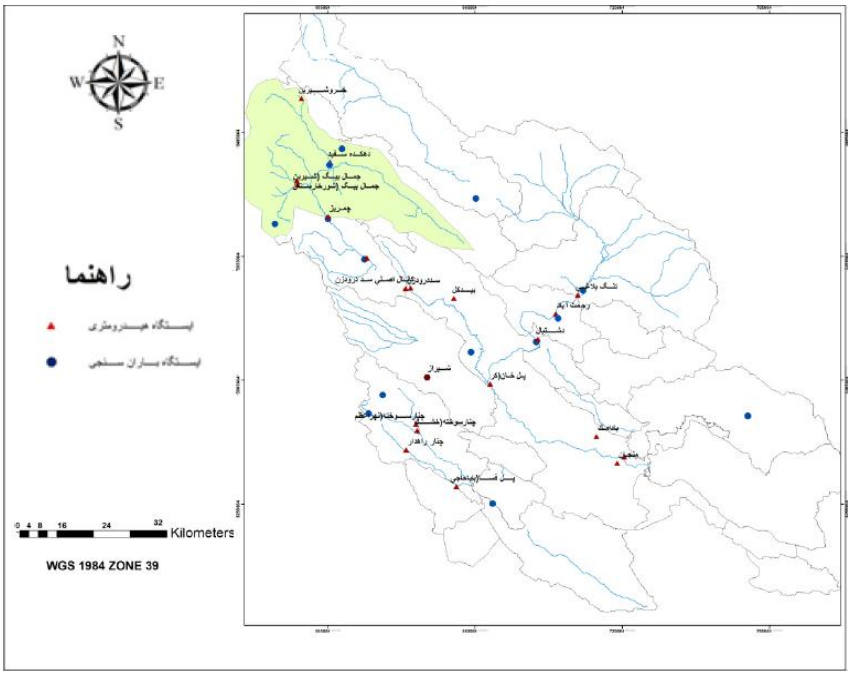
منطقه مطالعاتی این تحقیق که در شکل (۲) ارائه شده است، رودخانه کر است که در شمال شرق شیراز و در موقعیت جغرافیایی َ ۴۳ -°۵۱ و َ ۳۰ -°۵۴ طول شرقی و َ ۴ -°۲۹ تا َ ۱۵ - °۳۱ عرض شمالی قرارگرفته و دارای وسعت ۱۹۲۱۰ کیلومترمربع است. رودخانه کر در بین ارتفاعات زاگرس جنوبی (زاگرس فارس) واقع‌شده است. ارتفاع این حوضه از ۱۵۳۰ متر تا ۳۹۴۳ متر متغیر است. متوسط بارندگی در کل حوضه ۵۰۰ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

سالانه ۱۴/۶ درجه سانتی‌گراد است. مشخصات ایستگاه هواشناسی به‌کاررفته در منطقه موردمطالعه در جدول (۱) آورده شده است

تولید سناریوی اقلیمی برای دوره آتی

روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره آتی وجود دارد که معتبرترین آن‌ها استفاده از خروجی مدل‌های AOGCM است (Wilby and Harris,۲۰۰۶). مدل‌های AOGCM روابط فیزیکی حاکم بر اتمسفر، کریوسفر، بیوسفر و هیدروسفر را بیان می‌کند که در مدل‌های فرعی جداگانه شبیه‌سازی می‌شوند. تمام مدل‌های فرعی مربوط به جو و اقیانوس با یکدیگر جفت شده و مدل گردش عمومی جو- اقیانوس را تشکیل می‌دهند. مدل AOGCM که در این تحقیق جهت شبیه‌سازی دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) استفاده شد، مدل HadCM3 از مرکز تحقیقات و پیش‌بینی اقلیم Hadley است که از طریق مرکز توزیع داده[1] (DDC) که توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم شکل‌گرفته است، قابل‌دسترسی است. جدول (۲) مشخصات کلی مدل HadCM3 را نشان می‌دهد. ۲۹



شکل (۲) موقعیت حوضه رودخانه کر و جانمایی ایستگاه‌های هواشناسی

[1]. Data Distribution Center

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های مورداستفاده در اطراف رودخانه کر در تحقیق حاضر

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع حوضه (متر)
شیراز	سینوپتیک	۵۲°-۳۵´	۲۹°-۳۲´	۱۴۹۱
چمریز	هیدرومتری	۵۲°-۷´	۳۰°-۲۸´	۱۸۴۰
جمال بیگ شیرین	باران‌سنجی	۵۱°-۵۹´	۳۰°-۳۶´	۱۸۸۰

جدول (۲) مشخصات مدل‌های HadCM3 موجود در DDC مربوط به پایگاه اطلاع‌رسانی (IPCC-TGCIA,۱۹۹۹)

نام مدل	گروه مؤسس	سناریوی شبیه‌سازی	قدرت تفکیک	
			اتمسفری	اقیانوسی
HadCM3	HCCPR (UK)	۲۲c, B۲b, A۲, A۲A	۳/۷۵ × ۲/۵	۳/۷۵ × ۲/۵

سناریوی انتشار

برای بررسی وضعیت اقلیم گذشته کره زمین، مقادیر مشاهداتی گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۰۰۰، به‌عنوان ورودی به مدل‌های GCM ارائه‌شده و متغیرهای اقلیمی به‌صورت سری زمانی شبیه‌سازی‌شده‌اند. پس از شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های گذشته توسط مدل GCM به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت این متغیرها در دوره‌های آتی نیاز به معرفی وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی برای این مدل‌ها است. بدین منظور ابتدا میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه‌شده در سناریوهای انتشار (که معمولاً تا سال ۲۱۰۰ است) توسط مدل‌های دیگر به غلظت و نهایتاً به میزان نیروی تابشی تبدیل‌شده و این مقادیر به‌عنوان ورودی به مدل GCM ارائه می‌شوند. انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده توسط عوامل مؤثر از قبیل پیشرفت‌های اقتصادی- اجتماعی، جمعیت و ... مشخص می‌شوند. در سال ۱۹۹۲ اولین سری از سناریوی انتشار توسط IPCC به نام ۹۲IS ارائه شد. در این سناریوها مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخی ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. در سال ۱۹۹۶، IPCC سری جدید سناریوی انتشار را به نام SRES[1] ارائه کرد که دارای ۴۰ زیر سناریو است. هرکدام از این زیر سناریوها مربوط به یکی از گروه‌های A1، A2، B1 و B2 می‌باشند (ناکیسونویچ و اسوارت[2]، ۲۰۰۰). در این تحقیق از خروجی مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 استفاده‌شده است.

[1] Special Report on Emission Scenarios
[2] Nakicenovic and Swart

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

سناریوی A2 از مجموعه سناریوهای انتشار بر تقویت نیروهای جمعیتی منطقه‌ای با تأکید بر ارزش خانواده و رسوم آن، رشد زیاد جمعیت و نوسان کمتر در سرعت پیشرفت اقتصادی اشاره دارد.

سناریوی تغییر اقلیم

به‌منظور 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 ۳۰ ساله این داده‌ها استفاده می‌شود (جونز و هولم[1]، ۱۹۹۶). برای ایجاد سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM مقادیر اختلاف بین میانگین دمای ۳۰ ساله در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) و دوره شبیه‌سازی‌شده پایه توسط همان مدل (۲۰۰۱-۱۹۷۲) برای هر سلول از شبکه محاسباتی (مطابق رابطه (۱)) و هم‌چنین، مقادیر نسبت بین میانگین بارندگی ۳۰ ساله در دوره آتی و دوره شبیه‌سازی‌شده پایه توسط همان مدل برای هر سلول از شبکه محاسباتی (مطابق رابطه (۲))، محاسبه می‌شوند.

$$\Delta T_i = (\overline{T}_{GCM,fut,i} - \overline{T}_{GCM,base,i}) \quad (۱)$$

$$\Delta P_i = (\overline{P}_{GCM,fut,i} / \overline{P}_{GCM,base,i}) \quad (۲)$$

در روابط (۱) و (۲)، ΔT_i و ΔP_i به ترتیب بیان‌گر سناریوی اقلیمی مربوط به دما و بارندگی برای متوسط درازمدت برای هرماه i ($1 \leq i \leq 12$)، $\overline{T}_{AOGCM,fut,i}$ و $\overline{P}_{AOGCM,fut,i}$ به ترتیب بیان‌گر متوسط درازمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره آتی برای هرماه i، $\overline{T}_{AOGCM,base,i}$ و $\overline{P}_{AOGCM,base,i}$ به ترتیب بیانگر متوسط درازمدت دما و بارندگی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره مشابه با دوره مشاهداتی برای هرماه i می‌باشند.

کوچک‌مقیاس کردن

ازآنجایی‌که مقیاس محاسباتی مدل‌های AOGCM با مدل‌های هیدرولوژی مطابقت ندارد و ارزیابی و تعیین اثرات تغییر اقلیم نیازمند سناریوهایی با وضوح مکانی بالا است، بنابراین جهت انجام مطالعه اثرات تغییر اقلیم در یک منطقه نیاز به کوچک‌مقیاس نمودن خروجی این مدل‌ها است. روش‌های مختلفی جهت تولید سناریوهای منطقه‌ای از سناریوهای مدل‌های AOGCM وجود دارد که ازجمله آن‌ها می‌توان به روش‌های استفاده از اطلاعات سلول‌های اصلی،

[1] Jones and Hulme

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

درون‌یابی اطلاعات سلول‌های مجاور و روش‌های آماری و دینامیکی اشاره کرد. در این تحقیق از روش کوچک‌مقیاس کردن مکانی تناسبی استفاده‌شده است. در این روش، متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی‌شده توسط AOGCM از اطلاعات مربوط به سلولی استخراج می‌شود که منطقه موردمطالعه در آن قرار دارد. برای کوچک‌مقیاس کردن زمانی عامل تغییر[1]، مطابق رابطه‌های (۳) و (۴)، سناریوی تغییر اقلیم به مقادیر اندازه‌گیری شده (۲۰۰۱-۱۹۷۲) (مشاهداتی)، افزوده می‌شود تا سری زمانی سناریوی اقلیمی در آینده به دست آید (ویلبی و هریس[2]، ۲۰۰۶):

$$T = T_{obs} + (\overline{T}_{GCM,fut,i} - \overline{T}_{GCM,base,i}) \quad (۳)$$

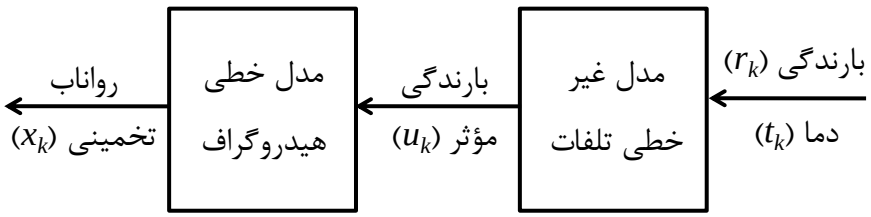
$$P = P_{obs} \times (\overline{P}_{GCM,fut,i} / \overline{P}_{GCM,base,i}) \quad (۴)$$

شبیه‌سازی بارش- رواناب

به‌منظور شبیه‌سازی رواناب حوضه رودخانه کر تحت تأثیر تغییر اقلیم، از مدل مفهومی بارش- رواناب IHACRES استفاده گردید این مدل توسط جیکمن و هورنبرگر[3] (۱۹۹۳) ارائه‌شده است. مدل IHACRES یک مدل یکپارچه است که در آن متغیرها و پارامترهای ورودی برای تمام سطح حوضه به‌طور یکسان در نظر گرفته‌شده و تغییرات مکانی آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود (لیو[4] و همکاران، ۲۰۰۶). اساس مدل IHACRES از دو مدول غیرخطی تلفات[5] و مدل خطی هیدروگراف[6] تشکیل می‌شود بدین شکل که در ابتدا بارندگی r_k و دما t_k در هر گام زمانی k توسط مدل غیرخطی، به بارندگی مؤثر u_k تبدیل‌شده و سپس به‌وسیله مدل خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام تبدیل می‌شود. شکل (۳) چگونگی تبدیل بارش- رواناب مدل IHACRES را نشان می‌دهد.

[1] Change Factor
[2] Wilby and Harris
[3] Jakeman and Hornberger
[4] Liu
[5] Nonlinear Loss Module
[6] Linear Unit Hydrograph Module

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]



شکل (۳) چگونگی شبیه‌سازی بارش- رواناب در مدل IHACRES

مباحث و یافته‌ها

-عملکرد مدل HadCM۳ در شبیه‌سازی دما و بارندگی حوضه کر در دوره پایه

به‌منظور بررسی عملکرد مدل HadCM ۳ در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارندگی حوضه، از داده‌های ماهانه دما برای ایستگاه سینوپتیک شیراز و بارندگی برای ایستگاه جمال بیگ شیرین استفاده شد. به دلیل آنکه اکثر ایستگاه‌های موجود در حوضه داده‌های دوره ۲۰۰۱ -۱۹۷۲ را پوشش می‌دهند، لذا این دوره به‌عنوان دوره پایه انتخاب شد. پس‌ازآن، میانگین ۳۰ ساله (۲۰۰۱ -۱۹۷۲) ماهانه دما و بارندگی از مدل فوق محاسبه شد. نهایتاً این مقادیر با میانگین ۳۰ ساله ماهانه دما و بارندگی مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج در شکل (۴) ارائه‌شده است. به‌منظور بررسی عملکرد مدل از معیارهای کارایی ضریب همبستگی[۱] (r)، RMSE، MAE و نش-ساتکلیف[۲] (NS[۳]) استفاده شد (موریاسی[۴]، ۲۰۰۷؛ آشفته و همکاران، ۲۰۱۳b) (جدول (۳)).

---

[1] Correlation Coefficient

[۲] معیار کارآیی نش-ساتکلیف برای ارزیابی توان مدل در شبیه‌سازی به‌کار می‌رود که اهمیت نسبی واریانس مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد و به‌صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_m - X_s)^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_m - \overline{X}_m)^2}$$

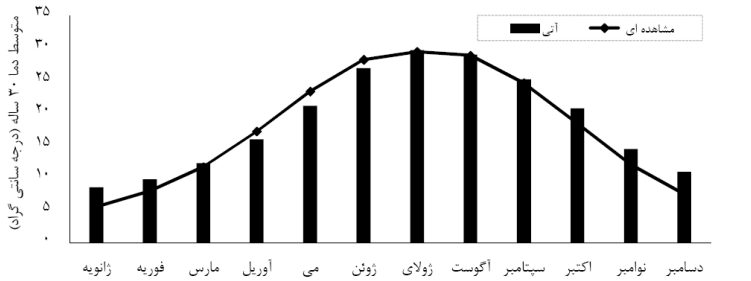
که در آن، X_s= داده شبیه‌سازی شده، X_m= داده اندازه‌گیری شده، $\overline{X}_s$ = متوسط داده شبیه‌سازی شده، $\overline{X}_m$ = متوسط داده اندازه‌گیری شده و N= تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد.

[3] Nash-Sutcliffe

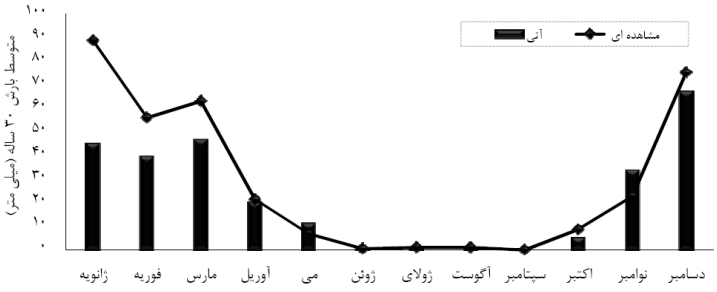
[4] Moriasi

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]



(الف)



(ب)

شکل (۴) میانگین ۳۰ ساله ماهانه دمای مشاهده‌ای حوضه و مدل HadCM ۳ برای (الف) دما و (ب) بارندگی

جدول (۳) معیارهای کارایی مدل HadCM ۳ نسبت به داده‌های مشاهداتی

متغیر اقلیمی	دما				بارندگی			
معیار عملکرد	*r* (%)	*RMSE* (^oC)	*MAE* (^oC)	*NS* (بدون بعد)	*r* (%)	*RMSE* (mm)	*MAE* (mm)	*NS* (بدون بعد)
HadCM3	۹۹/۸	۳/۵۱	۲/۹۴	۰/۸۳	۹۳/۵	۲۰/۴	۱۵/۳	۰/۸۴

نتایج درمجموع نشان می‌دهد که مدل HadCM ۳ با دارا بودن ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف بالا و کم بودن شاخص‌های خطا دارای عملکرد مطلوب در شبیه‌سازی دما و بارندگی برای این حوضه دارد.

- محاسبه سناریوی تغییر اقلیم دما و بارندگی

ابتدا سری زمانی دما و بارندگی ماهانه مدل HadCM ۳ تحت سناریوی A2 تهیه و برای منطقه طرح کوچک‌مقیاس گردید. سپس، متوسط درازمدت دما و بارندگی هر ماه در دوره ۲۰۴۰ -۲۰۱۱ و دوره شبیه‌سازی‌شده پایه توسط همان مدل (۲۰۰۱ -۱۹۷۲) محاسبه شد و

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

با استفاده از روابط (۱) و (۲) سناریوی تغییر اقلیم منطقه محاسبه شد که نتایج در جدول (۴) ارائه‌شده است.

جدول (۴) سناریوی تغییر اقلیم دما و بارندگی حاصل از مدل HadCM۳

	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن
ΔT (^{o}C)	۰/۸۱	۰/۹۵	۱/۶	۱/۱۶	۱/۹۷	۱/۶۶
ΔP (%)	۲۱/۰	-۲۰/۴۹	۱۴/۶۲	۱/۱۷	-۲۵/۹۲	۷۳/۵۱
	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ΔT (^{o}C)	۱/۳۶	۱/۳۳	۱/۱	۱/۳۴	۱/۴۲	۱/۲۷
ΔP (%)	۲۹۵/۴۵	-۶۱/۶۷	۳۱۷/۴۶	-۱۸/۳۲	-۵/۸	۷/۵

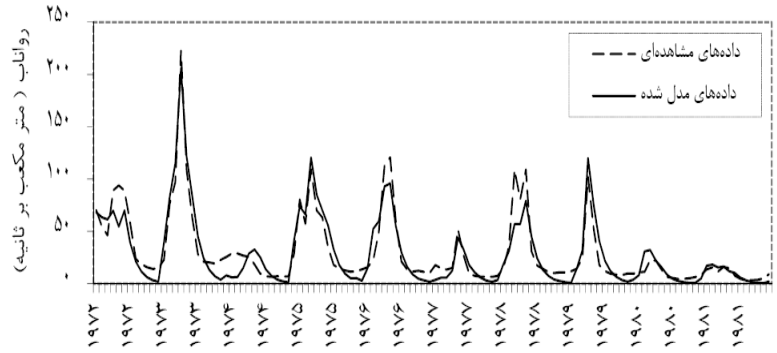
نتایج نشان می‌دهد که دمای حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ بین ۰/۸ تا ۲/۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش در این دوره بین ۶۱- تا ۳۱۵٪ خواهد بود. پس از مشخص شدن سناریوی تغییر اقلیم دما و بارندگی منطقه و با استفاده از روابط (۳) و (۴)، سری زمانی ماهانه دما و بارندگی حوضه در دوره آتی به دست می‌آید.

-شبیه‌سازی بارش- رواناب

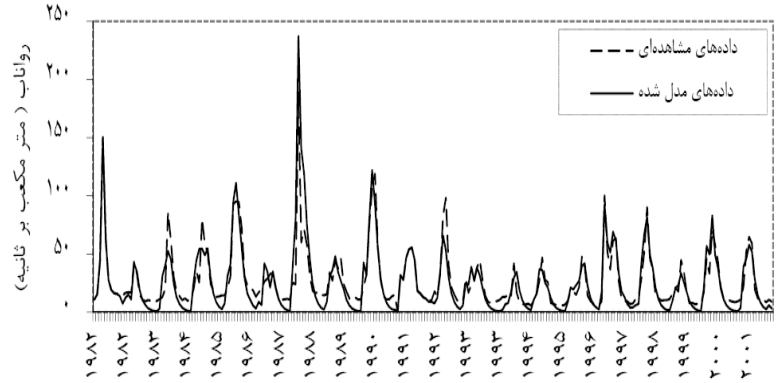
عملکرد مدل IHACRES با استفاده از چهار معیار کارایی ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای مطلق (MAE) و نش-ساتکلیف (NS) بررسی شد. در ابتدا به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل IHACRES، از آمار ماهانه دمای ایستگاه سینوپتیک شیراز، آمار ماهانه باران‌سنجی جمال بیگ شیرین و آمار دبی ماهانه ایستگاه هیدرومتری چمریز در دوره ۲۰۰۱ -۱۹۷۲ استفاده گردید. پس از بررسی‌های صورت گرفته دوره ۱۹۸۱ -۱۹۷۲ (۱۹۷۲/۱/۱ تا ۱۹۸۱/۱۲/۱) برای دوره واسنجی با مقادیر NS = ۰/۸۰، r = ۰/۹۴، RMSE = ۱۶/۲ و MAE = ۸/۸۴ و دوره ۲۰۰۱ -۱۹۸۲ (۱۹۸۲/۱/۱ تا ۲۰۰۱/۱۲/۱) برای دوره صحت‌سنجی با مقادیر NS = ۰/۹۶، r = ۰/۸۶، RMSE = ۱۰/۵ و MAE = ۷/۹۶ به دست آمد. نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که مدل IHACRES با توجه به معیارهای کارایی دارای عملکرد مطلوب بوده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]



(الف)



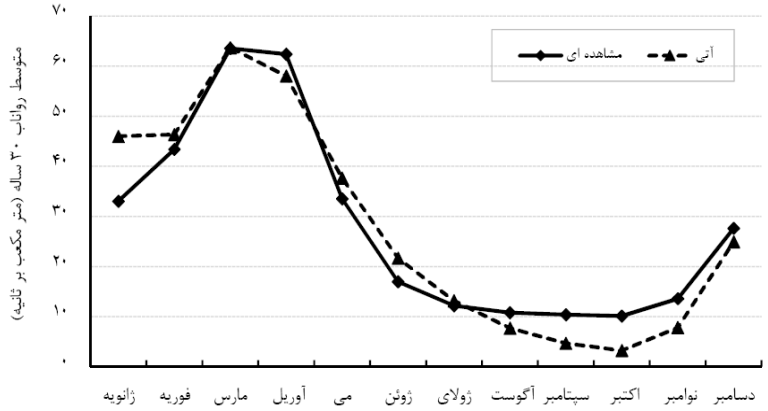
(ب)

شکل (۵) مقایسه رواناب مشاهداتی حوضه با رواناب مدل شده توسط IHACRES در دوره (الف) واسنجی (ب) و صحت‌سنجی

با معرفی سری‌های زمانی مقادیر دما و بارندگی ماهانه حاصل از رابطه (۳) و (۴) در بند قبلی، به مدل بارش- رواناب، سری زمانی ماهانه رواناب حوضه رودخانه کر در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ تولید شد. سپس متوسط رواناب ماهانه درازمدت (۳۰ ساله) در دوره آتی با متوسط رواناب ماهانه دوره مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج آن در شکل (۶) ارائه‌شده است.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]



شکل (۶) میانگین درازمدت ماهانه رواناب، طی دوره مشاهده‌ای و دوره آتی برای سناریوی A2

میزان رواناب در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، می، ژوئن و جولای در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۰۰-۱۹۷۱) افزایش می‌یابد. این بدین دلیل است که افزایش دما در این ماه‌ها باعث ذوب برف خواهد شد و این مسئله باعث افزایش بیش‌تر رواناب می‌شود؛ اما در ماه‌های آوریل، آگوست، سپتامبر، اکتبر، نوامبر و دسامبر شاهد کاهش رواناب به ترتیب به میزان ۶/۹۵، ۲۸/۵۱، ۵۲/۴۰، ۶۷/۸۸، ۴۲ و ۹/۸۳ درصد خواهیم بود. میزان رواناب در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی از ۳۹/۵۸ درصد افزایش در ماه ژانویه تا ۶۷/۸۸ درصد کاهش در ماه اکتبر متغیر است. رواناب در فصل پاییز و تابستان نسبت به دوره پایه به میزان ۳۹/۹۰ و ۲۴/۲۶ درصد کاهش می‌یابد؛ اما در فصول زمستان و بهار رواناب به میزان ۱۵/۳۵ و ۱۱/۶ درصد افزایش می‌یابد. به‌طورکلی میزان رواناب سالانه در دوره آتی به میزان ۹/۴۳ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه کر در استان فارس در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ میلادی پرداخته‌شده است. در این تحقیق از مدل HadCM ۳ و تحت سناریوی انتشار A2 استفاده‌شده است.

بررسی سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی از داده‌های مدل HadCM ۳ نشان می‌دهد که دمای حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ برای سناریوی A2 بین ۰/۸ تا ۲/۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین محدوده تغییرات بارش برای سناریوی A2 در این دوره بین ۶۱- تا ۳۱۵ درصد خواهد بود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

در این تحقیق به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر وضعیت رواناب از مدل مفهومی بارش-رواناب IHACRES استفاده شد. پس از واسنجی مدل، سری زمانی ماهانه دما و بارندگی به مدل معرفی‌شده و سری زمانی رواناب ماهانه برای حوضه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ شبیه‌سازی گردید. شبیه‌سازی‌ها کاهش ۹/۴۳ درصدی رواناب را در دوره آتی نسبت به دوره پایه (۲۰۰۱ - ۱۹۷۲) نشان می‌دهد.

ضمناً، در تحقیق‌های آتی پیشنهاد می‌شود تا عدم قطعیت مربوط به مدل‌های مختلف AOGCM، سناریوهای انتشار و روش‌های مختلف کوچک‌مقیاس کردن در محاسبات لحاظ گردد. این امر می‌تواند بر محدوده تغییرات رواناب تأثیرگذار باشد.

سپاس‌گزاری

از همکاری و مساعدت آقای پروفسور بهلول علیجانی کمال تشکر و قدردانی را داریم.

منابع و مأخذ

۱. گودرزی الهه، مساح‌بوانی علیرضا، دستورانی محمد تقی، طالب علی (۱۳۸۹). **شبیه‌سازی رواناب و بررسی تغییرات هیدرولوژیکی حوضه رودخانه اعظم هرات- یزد تحت تأثیر تغییر اقلیم**، چهاردهمین کنفرانس تغییرات اقلیمی، ۵۳۱- ۵۳۷.

۲. آشفته پریسا سادات و مساح‌بوانی 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.

۳. زارعی، مهدی، قنبرپور، محمد رضا، حبیب‌نژآد روشن، محمود، شاهدی، کاکا (۱۳۸۸). **شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش-رواناب IHACRES (مطالعه موردی، حوضه آبخیز کسیلیان)**، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، جلد ۳، شماره ۸، ۱۱-۱۹.

۴. خیرفام، حسین، مصطفی‌زاده رئوف.، صادقی، سید حمید رضا (۱۳۹۲). **تخمین دبی روزانه با استفاده از مدل IHACRES در برخی از حوضه‌های آبخیز استان گلستان**، پژوهشنامه مدیریت حوضه آبخیز، جلد ۴، شماره ۷، ۱۱۴-۱۲۷.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

Ashofteh, P. S., Bozorg-Haddad, O., Mariño, M. A., (2013a) ***Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply***. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 139 (2), 85-97.

Ashofteh, P. S., Bozorg-Haddad, O., Mariño, M. A., (2013b) ***Scenario assessment of streamflow simulation and its transition probability in future periods under climate change***. Water Resources Management, 27 (1), 255-274.

Ashofteh, P.-S., Bozorg Haddad, O., Akbari-Alashti, H., Marino, M. A., (2015). ***Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming***. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Doi: 10.1061/(ASCE)IR.۱۹۴۳-4774.0000807, 4014059.

Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., G. Roy, A., (2010) ***Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries***. Journal of Hydrology, 384, 65-83.

Eum, H. L., Sredojevic, D. P., Simonovic, S., (2011) ***Engineering Procedure for the Climate Change Flood Risk Assessment in the Upper Thames River Basin***. Journal of Hydrologic Engineering, 16, 608-612..

IPCC-DDC, (1988) http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/.

IPCC-TGCIA, (1999) ***Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment***. eds. Carter, T.R., Hulme, M. and Lal, M., Version ۱, ۶۹pp. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.

IPCC, (2007) ***Summary for Policymakers. In: Climate Chang2007: 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, United Kingdom and New York, USA, pp 18.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

Jakeman, A. J., Hornberger, G. M., (1993) ***How Much Complexity Is Warranted in a Rainfall-Runoff Model?***. Water Resources Research, 29, 2637-2649.

Jones P.D., Hulme M., (1996) ***Calculating Regional Climatic Time Series for Temperature and Precipitation: Methods and Illustrations***. International Journal of Climatology, 16, 361-377.

Liu, Y.B., Corluy, J., Bahremand, A., Smedt, F.D., Poorova, J., Velcická, L., (2006) ***Simulation of Runoff and Phosphorus Transport in a Carpathian Catchment, Slovakia, River***, Research and Applications Journal, 22, 1009-1022.

Moriasi D. N., (2007). ***Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations***. Transactions of the ASABE, 50, 885-900.

Nakicenovic N., Swart R., (2000) ***Emissions Scenarios. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change***. Cambridge University.

Steele-Dunne, S. Lynch, P., McGrath, R., Semmler, T., Wang, Sh., Hanafin, J., Nolan, P., (2008) ***the impacts of climate change on hydrology in Ireland***. Journal of Hydrology, 365, 28-45.

Wilby, R. L., Harris, I., (2006) ***A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK***. Water Resources Research, 42, W2419.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]

[DOR: 20.1001.1.22287736.1394.15.38.3.3]
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-10-30]