

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

مسعود گودرزی^{۱*}، برومند صلاحی^۲، سید اسعد حسینی^۳

۱. استادیار، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران

۲. دانشیار، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

۳. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۵/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۰۶/۲۰)

چکیده

تغییرات اقلیمی مهم‌ترین معضل کره زمین در سده حاضر است. بنابراین ارزیابی و پیش‌بینی این تغییرات در آینده به دلیل آثار سوء آن بر منابع آبی و همچنین تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 با کاربست مدل گردش عمومی HadCM3 و مدل مفهومی بارش- رواناب IHACRES در سه دوره زمانی مختلف (۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) از طریق مدل ریزمقیاس‌گردانی آماری LARS-WG بررسی شد. نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG با استفاده از شاخص‌های آماری و خط‌سنجی مختلف بیانگر آن است که اختلاف معناداری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی آنها با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد. نتایج حاصل از مدل اقلیمی نشان می‌دهد که متوسط دمای حوضه در دوره‌های آتی بین ۰/۵۵ تا ۳/۱۵ درجه سلسیوس افزایش؛ و میزان بارش، ۱۱/۹۴ درصد کاهش خواهد یافت. تحلیل عملکرد مدل بارش- رواناب IHACRES نیز حاکی از دقت خوب و مناسب این مدل در شبیه‌سازی تغییرات رواناب در حوضه مورد بررسی است. نتایج بررسی تغییرات رواناب سطحی نیز نشان می‌دهد که متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۵/۴، ۲۲/۳۵ و ۶۵/۴ درصد کاهش می‌یابد. براساس نتایج سناریوهای مختلف، حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی با مشکل کاهش رواناب سطحی، کاهش بارندگی و افزایش دما روبه‌رو خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، تغییر اقلیم، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، LARS-WG، IHACRES.

مقدمه

قرن بیست و یکم با معضل‌های زیست‌محیطی زیادی روبه‌روست که یکی از این آنها تغییرات اقلیمی است. تغییرات اقلیمی جهانی در طول دهه‌های گذشته همواره موضوع بحث بوده است. دانشمندان یکی از مهم‌ترین آثار آن را تحت عنوان تشدید چرخه هیدرولوژیکی نام می‌برند که موجب تغییر میزان تبخیر و تعرق و الگوی بارش می‌شود. تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی سناریوهای محتمل تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های شدید در برخی از مکان‌ها و سیل در مکان‌های دیگر رخ می‌دهد [۴۴]. تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی در آینده به سبب نگرش جوامع به توسعه سریع صنعت و توجه کمتر به محیط زیست ممکن است تشدید آن را در پی داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این پدیده می‌تواند بر سیستم‌های مختلف شامل منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد تأثیرات منفی داشته باشد [۱۰].

تغییر الگوهای اقلیمی به‌ویژه دما و بارندگی، نتیجه منطقی افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای است که ممکن است فرایندهای هیدرولوژیکی، منابع آب موجود و آب در دسترس برای کشاورزی، شرب، صنعت، زندگی جانوری در رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و نیروی برقی را تحت تأثیر قرار دهد [۳۰]. ارزیابی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر فرایندهای هیدرولوژی حوضه، به مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب برای رویارویی با چالش‌ها در دوره‌های آتی بسیار کمک خواهد کرد. تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب، از راه شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی با مدل‌های فیزیکی بارش - رواناب بررسی می‌شود [۵]. بنا بر گزارش‌ها، تغییر اقلیم سبب تغییر رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است؛ به‌گونه‌ای که بارندگی و جریان‌های سطحی در عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی، بیشتر؛ و در عرض‌های پایینی کمتر شده و احتمال مواجهه با رخداد‌های حداکثر اقلیمی مانند سیلاب و خشکسالی افزایش یافته است [۳۲]. بررسی تغییرات اقلیمی و آثار آن بر منابع آب و به‌ویژه رواناب می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های راهبردی آینده مدیریت منابع آب باشد، بدون توجه به این واقعیت که اقلیم در حال تغییر است، نمی‌توان برنامه‌ریزی واقع‌بینانه‌ای را در زمینه بهره‌برداری از منابع آب انجام داد [۲۶]. مقدار رواناب سطحی، یکی از شاخص‌های مهم در طراحی سدها (حجم مخزن، دریچه‌ها و غیره) و توسعه کشاورزی است؛ از این رو پیش‌بینی

تغییرات آینده این شاخص در بحث مدیریت آبی منابع آب بسیار مهم است؛ چراکه طراحی مخازن ذخیره آب براساس مقدار رواناب و نوسان‌های آن و تقاضا برای مصرف آب صورت می‌گیرد [۸]. مقدار رواناب، آبدی رودخانه‌ها، شدت سیلاب و خشکسالی، همگی متأثر از دما و بارش‌اند که از مهم‌ترین عناصر اقلیمی هستند. از این رو با توجه به تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر فرایندهای هیدرولوژیکی، بررسی مطالعات منطقه‌ای تأثیر تغییرات اقلیم بر پارامترهای هیدرولوژیکی و تأثیر آن بر منابع آب در دسترس ضروری می‌نماید. امروزه مدل‌های گردش عمومی جو، قوی‌ترین ابزار به‌منظور تولید سناریوهای اقلیمی هستند. خروجی‌های این مدل‌ها، دقت مکانی کمی دارند؛ از این رو در صورتی که خروجی این مدل‌ها به‌طور مستقیم ورودی مدل‌های هیدرولوژیکی قرار گیرد، سبب افزایش عدم قطعیت می‌شود. به همین منظور برای افزایش دقت مکانی این داده از روش‌های ریزمقیاس‌گردانی استفاده می‌شود که به روش‌های آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند [۲۱، ۲۰]. مساح‌بوانی و مرید [۳۵] تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آبی حوضه زاینده‌رود را در دو دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ تحت دو سناریوی مدل HadCM3 بررسی کردند. نتایج نشان داد که برای هر دو دوره، میانگین بارش سالانه کاهش و دما افزایش پیدا کرده است. هریچ و همکاران [۲۸] به بررسی اثر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه‌های آبریز کشور لبنان پرداختند نتایج نشان می‌دهد که افزایش ۲ درجه سلسیوس دما سبب می‌شود که بیشینه دبی جریان دو ماه زودتر رخ دهد. مینویل و همکاران [۳۶] با استفاده از پنج مدل GCM تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه کانادا را بررسی کردند. نتایج نشان از افزایش ۱ تا ۱۴ درجه‌ای دما و ۹ تا ۵۵ درصدی بارش فصلی داشت که مقدار رواناب حوضه را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. عبدو و همکاران [۱۹] از مدل HadCM3 و ریزمقیاس‌گردانی آماری برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر هیدرولوژی در حوضه گیلجل‌ابی^۱ در اتیوپی استفاده کردند. یافته‌های آنها نشان داد که حجم رواناب در دوره زمانی ۲۰۹۹-۲۰۷۱ تحت سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱۱/۶ و ۱۰/۱ درصد کاهش خواهد یافت. هاشمی و همکاران [۲۷] به مقایسه دو مدل LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا در

همکاران [۱۵] با استفاده از دو مدل HadCM3 و CSIRO تحت دو سناریوی A2 و B1، تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه کارون طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ را بررسی کردند که نتایج بیانگر افزایش دما و کاهش بارش در منطقه است. آشفته و بزرگ‌حداد [۱] به ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب با استفاده از مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG تحت سناریوی A2 مدل HadCM3 و مدل بارش- رواناب IHACRES در حوضه آیدوغموش پرداختند. نتایج حاکی از کاهش متوسط بلندمدت رواناب سالانه در سه دوره زمانی آتی نسبت به دوره پایه است. حمیدیان‌پور و همکاران [۴] به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه بار و طاغان نیشابور تحت دو سناریوی A2 و B2 مدل HadCM3 و روش ریزمقیاس‌گردانی آماری SDSM پرداختند که نتایج بیانگر افزایش دما، کاهش بارندگی و رواناب در حوضه است. رسولی و همکاران [۶] به بررسی اثر عوامل مورفواقلیمی بر دقت ریزمقیاس‌گردانی مدل LARS-WG در شمال غرب کشور پرداختند و نتیجه گرفتند که دقت مدل در ایستگاه‌های منتخب متفاوت بود، ولی شبیه‌سازی دما با دقت مناسب‌تری انجام گرفت و در برآورد بارش از دقت کمتری برخوردار بود. طائی و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG و خروجی مدل HadCM3 تحت سه سناریوی A1B، A2 و B1 به پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در سه دوره زمانی مختلف در حوضه بار نیشابور پرداختند. نتایج حاکی از کاهش بارش و افزایش تابش، دمای کمینه و دمای بیشینه در دوره‌های آتی است. بحری و همکاران [۳] به بررسی خشکسالی‌های دهه ۲۰۲۰ حوضه اسکندری در استان اصفهان تحت تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG و برون‌داد مدل HadCM3 پرداختند که نتایج نشان داد بارش سالانه بین ۷/۲ تا ۱۰/۹ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به بررسی صورت‌گرفته، بیشتر هیدرولوژیست‌ها به‌منظور ریزمقیاس‌گردانی داده‌های اقلیمی بیشتر از روش‌های آماری استفاده می‌کنند [۴۳]. یکی از دلایل استفاده از این مدل‌ها، عملکرد سریع و آسان آنها نسبت به روش‌های دیگر است [۲۲، ۳۱]. در این پژوهش نیز از مدل ریزمقیاس‌گردانی آماری LARS-WG و خروجی مدل جهانی HadCM3 برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر تغییرات رواناب سطحی با استفاده از مدل بارش- رواناب

نیوزیلند پرداختند نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی در شبیه‌سازی بارش‌های شدید دارند و برای پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌توان از آنها استفاده کرد. ضرغامی و همکاران [۴۵] با استفاده از مدل HadCM3 و ریزمقیاس‌گردانی آماری به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رواناب در استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج حاکی از کاهش بارش و رواناب و افزایش دماست. گودرزی و همکاران [۲۴] به بررسی تغییرات آب‌وهوایی با استفاده از روش ریزمقیاس‌گردانی آماری SDSM تحت سناریوهای A2 و B2 در کرمانشاه پرداختند. نتایج حاکی از شبیه‌سازی مناسب مدل برای دماست؛ در حالی که برای شبیه‌سازی بارش کمی کمتر تخمین می‌زند. سیلبرستین و همکاران [۴۲] با استفاده از مدل‌های GCM به شبیه‌سازی مقدار رواناب در ۱۳ حوضه رودخانه‌ای در جنوب غربی استرالیا پرداختند. نتایج نشان از افزایش ۰/۷ تا ۱/۳ درجه‌ای دما و کاهش ۱۶ درصدی بارش در بیشتر از ۵۰ درصد حوضه‌ها و در نتیجه، کاهش رواناب داشت. نونس و همکاران [۳۸] با استفاده از مدل‌های ترکیبی هیدرولوژیکی به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر مقدار رواناب در دو حوضه آبریز دریای مدیترانه پرداختند. نتایج بیانگر افزایش دما و کاهش بارش و رطوبت خاک است. جوو و همکاران [۲۵] به تأثیرات تغییرات اقلیمی بر اکوهیدرولوژی حوضه رودخانه جیوشو^۱ در کشور چین با استفاده از مدل HadCM3 و ریزمقیاس‌گردانی SDSM در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۹۹ پرداختند. نتایج حاکی از روند افزایشی درجه حرارت و تبخیر و تعرق، و روند کاهشی بارش و رواناب‌های سطحی است. مساح بوانی [۱۶] به ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب حوضه زاینده‌رود با استفاده از هفت مدل GCM پرداخت. نتایج از احتمال زیاد کاهش رواناب حوضه حکایت دارد. زارعی و همکاران [۷] به شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES در حوضه آبخیز کسلیان پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد. آشفته و مساح بوانی [۲] با بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر دی‌های حداکثر در حوضه آیدوغموش در آذربایجان شرقی با استفاده از مدل HadCM3 دریافتند که تغییر اقلیم بر دی‌های حداکثر در دوره‌های آتی تأثیر دارد. لاله‌سیاه و

1. Guishui

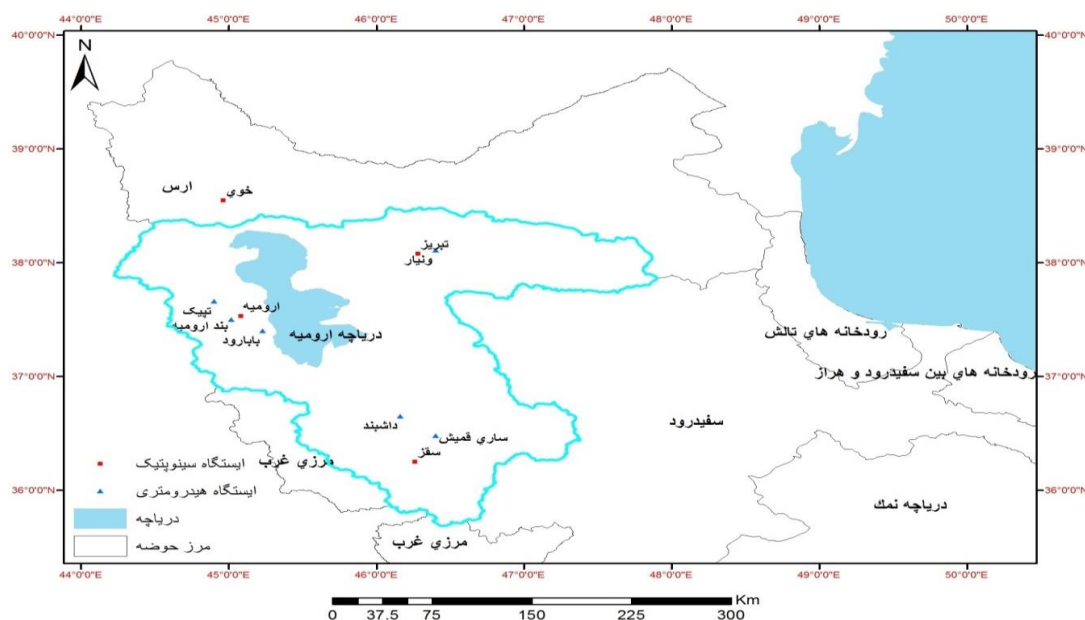
شمالی در شمال غرب ایران قرار گرفته است. وسعت این حوضه ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع است که ۳/۱۵ درصد مساحت کل کشور را در بر می‌گیرد [۱۴]؛ از این مقدار حدود ۵۸۲۲ کیلومترمربع وسعت خود دریاچه است که با ارتفاع آب دریاچه رابطه دارد و با افزایش یا کاهش آن تغییر پیدا می‌کند [۱۷]. پژوهش حاضر بر روی شش ایستگاه هیدرومتری و چهار ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام گرفته است. موقعیت حوضه آبریز و ایستگاه‌های منطقه مطالعاتی در شکل ۱ و همچنین مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

IHACRES در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در سه دوره زمانی مختلف (۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) استفاده خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه تحقیق

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد مطالعه در سطح حوضه

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
سقز	سینوپتیک	۴۶° ۱۶'	۳۶° ۱۵'	۱۵۲۲/۸
تبریز	سینوپتیک	۴۶° ۱۷'	۳۸° ۵'	۱۳۶۱
ارومیه	سینوپتیک	۴۵° ۳'	۳۷° ۴'	۱۳۲۸
خوی	سینوپتیک	۴۴° ۵۸'	۳۸° ۳۳'	۱۱۰۳
بابارود	هیدرومتری	۴۵° ۱۴'	۳۷° ۲۴'	۱۲۸۵
بند ارومیه	هیدرومتری	۴۵° ۰۱'	۳۷° ۳۰'	۱۳۹۰
تپیک	هیدرومتری	۴۴° ۵۴'	۳۷° ۴۰'	۱۴۵۰
ونبار	هیدرومتری	۴۶° ۲۴'	۳۸° ۰۷'	۱۴۵۰
داشبند	هیدرومتری	۴۶° ۱۰'	۳۶° ۳۹'	۱۳۵۰
ساری قمیش	هیدرومتری	۴۶° ۲۹'	۳۶° ۲۹'	۱۳۸۰

مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG

این مدل یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید دمای حداقل و حداکثر، بارش و تابش به صورت روزانه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده به کار می‌رود؛ ابتدا راسکو و همکاران [۳۹] این مدل را معرفی کرده و سپس سمنوف و همکاران [۴۰] آن را بازنگری کردند. دلیل اصلی تولید این مدل، غلبه بر ضعف‌های زنجیره مارکوف بود. این مدل به عنوان یک مدل ریزمقیاس‌سازی، در عین پیچیدگی کمتر فرایند شبیه‌سازی داده‌های ورودی و خروجی، توانایی زیادی در پیش‌بینی تغییر اقلیم دارد [۴۱] که در این پژوهش برای ریزمقیاس‌گردانی مدل جهانی HadCM3 استفاده شد. مدل HadCM3 از نوع مدل‌های جفت‌شده جوی-اقیانوسی است که در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است و دارای شبکه‌ای به ابعاد $2/5$ درجه عرض جغرافیایی در $3/75$ درجه طول جغرافیایی است [۲]؛ داده‌های آنها از سال ۱۹۶۱ تا ۲۱۰۰ موجود است. برای اجرای مدل از داده‌های روزانه دمای حداقل و دمای حداکثر و بارش روزانه در دوره آماری ۱۹۹۰-۱۹۶۱ استفاده شد که به عنوان مبنای تغییر اقلیم گذشته و شبیه‌سازی اقلیم آینده استفاده شده است. ابتدا مدل برای دوره آماری پایه اجرا می‌شود تا یک سری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجدداً ایجاد شود سپس این خروجی‌ها با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتولیدی، نشان می‌دهد که مدل از توانمندی مناسبی برای پیش‌بینی داده‌های اقلیمی برخوردار است. در مطالعه حاضر از سه سناریوی تغییر اقلیم A1B، A2 و B1 استفاده شد که هر یک نشان‌دهنده ویژگی‌هایی از جمله رشد اقتصادی جهان، جمعیت جهان و آگاهی‌های اجتماعی است [۱۸].

مدل بارش - رواناب IHACRES

این مدل را هیدرولوژیست‌های مرکز مدیریت و ارزیابی جامع حوضه آبخیز دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی انجمن پژوهش‌های زیست‌محیطی انگلستان به صورت مشترک توسعه داده‌اند [۷]. اساس این

روش، مدول غیرخطی کاهش^۱ و مدول خطی هیدروگراف^۲ است. به این منظور در ابتدا بارندگی (r_k) و دما (t_k) در هر گام زمانی (k) توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر (u_k) تبدیل شده و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود [۱۳]. این مدل دارای شش پارامتر است که سه پارامتر آن مربوط به بخش تلفات غیرخطی است، شامل (t_w)، f و c (به ترتیب مدت زمانی که طول می‌کشد تا حوضه خشک شود، فاکتور تعدیل دما و ظرفیت ذخیره رطوبت حوضه) و سه پارامتر مربوط به تابع تبدیل خطی شامل t^q و t^s (به ترتیب مدت زمانی که طول می‌کشد جریان سریع و آهسته کاهش یابد و v^s حجمی از جریان آهسته که در ایجاد جریان رودخانه مشارکت دارد) است [۷]. در ابتدا باید مدل IHACRES برای حوضه تحت مطالعه واسنجی شود. برای این کار از داده‌های مشاهداتی دما، بارش و دبی روزانه حوضه در دوره پایه استفاده می‌شود. پس از صحت‌سنجی مدل، رواناب روزانه این حوضه در سه دوره زمانی مختلف (۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) با معرفی داده‌های دما و بارش کوچک‌مقیاس‌شده برای حوضه، شبیه‌سازی خواهد شد؛ در شبیه‌سازی بارش-رواناب روزانه حوضه در مدل IHACRES در دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) بهترین دوره واسنجی و صحت‌سنجی برای به حداقل رساندن خطای شبیه‌سازی انتخاب می‌شود.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل‌ها

برای ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل‌های تخمین و پیش‌بینی، شاخص‌های عملکردی مختلفی وجود دارد که در این پژوهش از مهم‌ترین آنها استفاده شد. شاخص NSE^۳ با عنوان ضریب کارایی نش - ساتکلیف شناخته می‌شود. اگر مقدار NSE برابر با یک باشد نشان‌دهنده این است که تناسب کامل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود دارد. اگر این مقدار بین $0/36$ و $0/75$ باشد، نتایج مدل رضایت‌بخش به شمار می‌رود و اگر بیشتر از $0/75$ باشد نتایج شبیه‌سازی مدل خوب توصیف می‌شود [۳۶]. در واقع معیار کارایی نش - ساتکلیف اهمیت نسبی واریانس

1. Non- linear loss module
2. Linear unit hydrograph module
3. Nash- Sutcliffe Efficiency

می‌کند و یک ابزار ریاضی است که در پایه‌ریزی تحلیل‌های اقلیمی بسیار کاربرد دارد [۹].

یافته‌های پژوهش

برای کالیبره کردن و اطمینان از صحت مدل LARS-WG، ابتدا یک سناریوی حالت پایه برای دوره آماری پایه تدوین و مدل برای این دوره اجرا شد و نتایج حاصل از خروجی مدل که شامل دمای حداقل و حداکثر و بارش ماهانه و انحراف معیار آنهاست با داده‌های مشاهده‌ای (۱۹۹۰-۱۹۶۱) مقایسه شد؛ نتایج با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف در جدول ۲ آورده شده است. یافته‌ها بیانگر آن است که اختلاف معناداری بین مقادیر مدل‌سازی شده و مقادیر مشاهده‌ای آنها با خطای بحرانی ۵ درصد وجود ندارد و مقادیر همبستگی پیرسون بین داده‌های مدل‌سازی شده و واقعی در سطح معناداری ۱ درصد قابل قبول‌اند. برای اطمینان از صحت واسنجی مدل از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MSE و MAE نیز استفاده شد که نتایج حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در منطقه تحقیق است (جدول ۲).

مقادیر شبیه‌سازی شده را در مقایسه با واریانس داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. ضریب تعیین (Rsqr) نیز معیاری بدون بعد و بهترین مقدار آن برابر با یک است [۹]. سایر معیارها براساس معیار ضریب تعیین بنا نهاده شده‌اند با این تفاوت که مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر ریشه مربعات (R^2 sqrt)، لگاریتم (R^2 log) و عکس مقادیر (R^2 Inv) جایگزین شده‌اند و برای ارزیابی خطا در جریان‌های کم مناسب‌ترند [۳۴]. معیار خطای نسبی (ER) که مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده خطای کمتر مدل در شبیه‌سازی جریان است و به درصد بیان می‌شود. میانگین مربعات خطا (MSE) که می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند [۱۲]. مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز به‌عنوان قیاسی برای نشان دادن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری به کار می‌رود این معیار به‌عنوان مرسوم‌ترین شاخص خطا استفاده می‌شود [۳۳]. میانگین مطلق خطا (MAE) برای مقایسه عبارت به عبارت خطای نسبی مقادیر شبیه‌سازی شده با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌رود [۲۹]. ضریب همبستگی (R) ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه‌گیری

جدول ۲. عملکرد مدل LARS-WG با استفاده از شاخص‌های مختلف

ایستگاه	پارامتر	RMSE	MSE	MAE	R^2	R
۳	بارش	۳/۶۵	۱۳/۳۴	۳/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹
	دمای حداکثر	۰/۲۸	۰/۰۸	۰/۲۴	۰/۹۹	۰/۹۹
	دمای حداقل	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۹۹	۰/۹۹
۳	بارش	۳/۵۳	۱۲/۴۸	۲/۷۷	۰/۹۶	۰/۹۸
	دمای حداکثر	۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۳۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	دمای حداقل	۱/۳۳	۰/۱۱	۰/۲۷	۰/۹۹	۰/۹۹
۳	بارش	۴/۳۶	۱۹/۰۵	۳/۰۳	۰/۹۴	۰/۹۷
	دمای حداکثر	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۱۷	۰/۹۹	۰/۹۹
	دمای حداقل	۰/۲۵	۱/۰۶	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹
۳	بارش	۲/۰۷	۴/۲۷	۱/۵	۰/۹۸	۰/۹۹
	دمای حداکثر	۰/۲۶	۰/۰۷	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹
	دمای حداقل	۰/۳	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹

نتایج حاصل از مدل LARS-WG براساس متوسط سناریوهای مورد بررسی و همچنین براساس متوسط پارامترهای اقلیمی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی دوره آماری ۲۰۹۹-۲۰۱۱ و سه دوره زمانی مختلف (۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به غیر از دهه ۲۰۲۰ که مقدار بارش افزایش جزئی (۴/۳ میلی‌متر) داشته است، در سایر دوره‌های مورد بررسی

نتایج حاصل از مدل LARS-WG براساس متوسط سناریوهای مورد بررسی و همچنین براساس متوسط پارامترهای اقلیمی در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه در طی دوره آماری ۲۰۹۹-۲۰۱۱ و سه دوره زمانی مختلف

این کاهش در سطح حوضه در دهه ۲۰۸۰ در تمام ماه‌های سال نسبت به دوره پایه وجود خواهد داشت. در مورد دمای حداکثر و دمای حداقل نیز انتظار می‌رود که دمای حداقل و حداکثر حوضه در تمامی ماه‌های سال و در هر سه دوره زمانی مورد بررسی افزایش یابد.

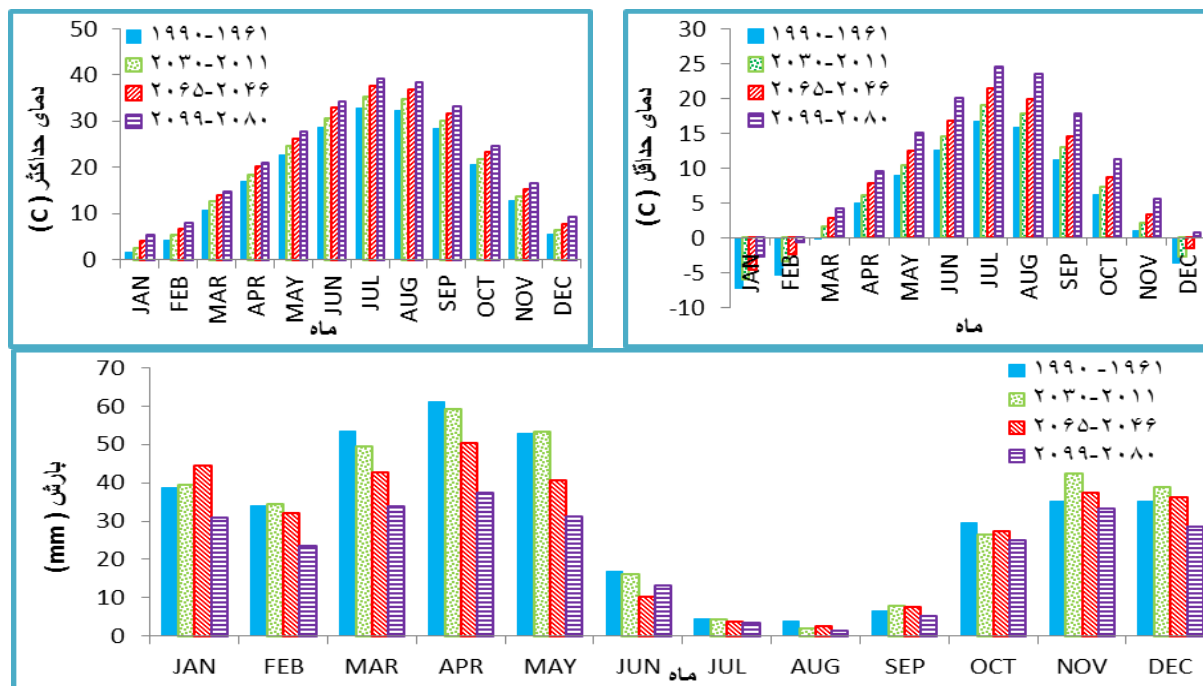
به‌منظور شبیه‌سازی جریان در مقیاس‌های روزانه و ماهانه ابتدا مدل IHACRES کالیبره شده و در مرحله بعد ارزیابی شد، نتایج حاصل از پارامترهای محاسبه‌شده مدل برای ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه در مرحله واسنجی که با استفاده از روش سعی و خطا در دوره‌های مختلف صورت گرفت در جدول ۴ آورده شده است. مقدار پارامتر v^* نشان‌دهنده حد مشارکت جریان پایه در ایجاد جریان رودخانه‌ای است، به‌گونه‌ای که مقادیر زیاد این پارامتر نشان‌دهنده وجود جریان پایه بیشتر در رودخانه است. مقادیر به‌دست‌آمده در این پژوهش حاکی از وجود جریان پایه به‌نسبت متوسط در ایجاد جریان رودخانه‌ای است. مقدار پارامتر c (ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه) نشان‌دهنده سرعت واکنش حوضه آبریز نسبت به بارش است، به‌گونه‌ای که هرچه این مقدار بیشتر باشد، حوضه واکنش آهسته‌تری نسبت به بارش نشان می‌دهد که براساس نتایج، مقدار پارامتر یادشده بسیار کم است. بنابراین حوضه آبریز مورد بررسی نسبت به بارش با سرعت زیادی واکنش نشان می‌دهد که ناشی از نبود یا کمبود پوشش گیاهی و جنگلی، کاربری اراضی زراعی و مرتع است؛ چراکه کاربری جنگلی و پوشش گیاهی مناسب موجب نگهداشت بارش می‌شود تا با تأخیر به جریان رودخانه اضافه شود.

کاهش چشمگیری پیدا کرده است؛ به‌طوری که متوسط بارش سطح حوضه از $371/8$ میلی‌متر در دوره پایه به میانگین $327/4$ میلی‌متر در دوره‌های آتی رسیده و مقدار بارش به‌طور متوسط بلندمدت $44/4$ میلی‌متر ($11/94$ درصد) در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرده است؛ این مقدار کاهش در سطح حوضه در انتهای دوره مورد پیش‌بینی (دهه ۲۰۸۰) به $269/1$ میلی‌متر ($27/62$ درصد کاهش) رسیده است. در مورد پارامترهای دمایی نیز نتایج حاکی از افزایش دما در سطح حوضه است. این افزایش برای پارامترهای دمای حداقل و حداکثر به ترتیب $3/4$ و $2/9$ درجه سلسیوس به‌طور متوسط در دوره‌های آتی است. ضمن اینکه شدت این تغییرات در پایان قرن بیست‌ویکم نسبت به دوره پایه بیشتر نیز است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انتظار می‌رود دمای متوسط حوضه در سه دوره آتی به ترتیب $1/45$ ، $2/95$ و 5 درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یابد که به‌طور متوسط در سطح حوضه در دوره‌های آتی ($2099-2011$) بین $0/55$ تا $3/15$ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت.

متوسط ماهانه بلندمدت دما و بارش سطح حوضه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه نیز در شکل ۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار بارش در سطح حوضه در دهه ۲۰۲۰ در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه نسبت به دوره پایه خواهد افزایش خواهد یافت. این افزایش در ماه‌های می و سپتامبر نیز در طول این دوره مشهود است و در سایر ماه‌های سال از مقدار بارش نسبت به دوره پایه کاسته شده است. افزایش بارش در ماه ژانویه در دهه ۲۰۵۰ نیز ادامه خواهد داشت، ولی در سایر ماه‌های سال از مقدار بارش نسبت به دوره پایه کاسته خواهد شد.

جدول ۳. نتایج حاصل از مدل LARS-WG به‌طور متوسط سالانه بلندمدت

پارامتر	بارش	دمای حداقل	دمای حداکثر
میانگین دوره پایه	۳۷۱/۸	۵/۱	۱۸/۲
دهه ۲۰۲۰	۳۷۶/۱	۶/۶	۱۹/۶
دهه ۲۰۵۰	۳۳۷	۸/۲	۲۱
دهه ۲۰۸۰	۲۶۹/۱	۱۰/۷	۲۲/۶
میانگین دهه‌های آتی	۳۲۷/۴	۸/۵	۲۱/۱



شکل ۲. متوسط بلندمدت ماهانه دما و بارش سطح حوضه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه

جدول ۴. مقادیر پارامترهای به‌دست آمده از فرایند واسنجی مدل IHACRES

متغیر ایستگاه	t^s	v^s	b^s	a^s	f	tw	c
بابارود	۲۷/۳۲	۰/۹۹	۰/۰۳	-۰/۹۷	۴	۱۲	۰/۰۰۵
بند ارومیه	۳۷/۴۵	۱	۰/۰۲۶	-۰/۹۷	۴	۲۲	۰/۰۰۸
تپیک	۳۷/۹	۱	۰/۰۲۶	-۰/۹۷	۴	۲۷	۰/۰۰۴
ونیار	۱۹/۳۲	۰/۹۶	۰/۰۵	-۰/۹۵	۴	۲۲	۰/۰۰۱
ساری‌قمیش	۳۲/۸	۱	۰/۰۳	-۰/۹۷	۴	۲	۰/۰۱۳
داشند	۲۱/۳۷	۱	۰/۰۴۶	-۰/۹۵	۳/۵	۲	۰/۰۰۴

دو مقیاس روزانه و ماهانه می‌توان دریافت که نتایج صحت‌سنجی ضعیف‌تر از نتایج واسنجی مدل بوده و با این حال با استناد به مقادیر معیارهای مورد بررسی، نتایج ارزیابی مدل در مقیاس ماهانه رضایت‌بخش است. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) در مقیاس ماهانه نیز در جدول ۷ آورده شده است. با استناد به نتایج، بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مقیاس ماهانه تفاوت معناداری مشاهده نشد. با این حال براساس نتایج، مدل توانایی خوب و مناسبی در شبیه‌سازی جریان در ایستگاه‌های مورد بررسی دارد.

جدول‌های ۵ و ۶ نیز وضعیت عملکرد مدل در دوره واسنجی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهند. براساس نتایج به‌دست آمده مدل IHACRES با ضریب تعیین بالای ۰/۵۴ به‌صورت روزانه و ۰/۶۸ به‌صورت ماهانه در دوره واسنجی و ضریب تعیین بالای ۰/۳۷ به‌صورت روزانه و ۰/۴ به‌صورت ماهانه در دوره صحت‌سنجی به‌خوبی توانسته است الگوی تغییرات رواناب در حوضه مورد مطالعه را شبیه‌سازی کند. از طرف دیگر براساس نتایج، دقت مدل در شبیه‌سازی جریان در مقیاس ماهانه نسبت به مقیاس روزانه بیشتر است و مدل، نتایج پذیرفتنی و رضایت‌بخشی را براساس معیارهای مورد بررسی ارائه کرده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل در

جدول ۵. نتایج حاصل از دوره واسنجی مدل IHACRES

معیارهای ارزیابی	بابرود	بند ارومیه	تپیک	ونیار	ساری قمیش	داشبند
ضریب تعیین (R sqrt)	۰/۵۸	۰/۵۴	۰/۷	۰/۵۴	۰/۶۷	۰/۵۹
ریشه مربعات خطا (R ² sqrt)	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۵	۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۷۴
لگاریتم مربعات خطا (R ² log)	۰/۶	۰/۷	۰/۶۱	۰/۸۲	۰/۶۵	۰/۸۲
عکس مربعات خطا (R ² Inv)	۰/۲۹	۰/۵۳	۰/۲	۰/۶۶	۰/۲۷	۰/۳۱
خطای بایاس (mm)	۱۰/۲	۲/۹۲	۱۴/۶	۱۱/۳	۱۹/۴	۲/۳
ضریب تعیین ماهانه (R ² Month)	۰/۶۹	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۶۸	۰/۸	۰/۷۹

جدول ۶. نتایج حاصل از دوره صحت سنجی مدل IHACRES

معیارهای ارزیابی	بابرود	بند ارومیه	تپیک	ونیار	ساری قمیش	داشبند
ضریب تعیین (R sqrt)	۰/۴۴	۰/۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۶	۰/۳۷
ریشه مربعات خطا (R ² sqrt)	۰/۵۶	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۴۹	۰/۶۲
لگاریتم مربعات خطا (R ² log)	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۷۷	۰/۴۴	۰/۷۸
عکس مربعات خطا (R ² Inv)	۰/۴	۰/۴۹	۰/۴۱	۰/۵۲	۰/۸۶	۰/۴۴
خطای بایاس (mm)	۴۰/۱	۳۳/۱	۲۲/۴	۱۶/۹	۲۰/۵	۲۸/۱
ضریب تعیین ماهانه (R ² Month)	۰/۵۵	۰/۴	۰/۴۷	۰/۵۳	۰/۵۲	۰/۵۲

جدول ۷. ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس ماهانه بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی دوره پایه

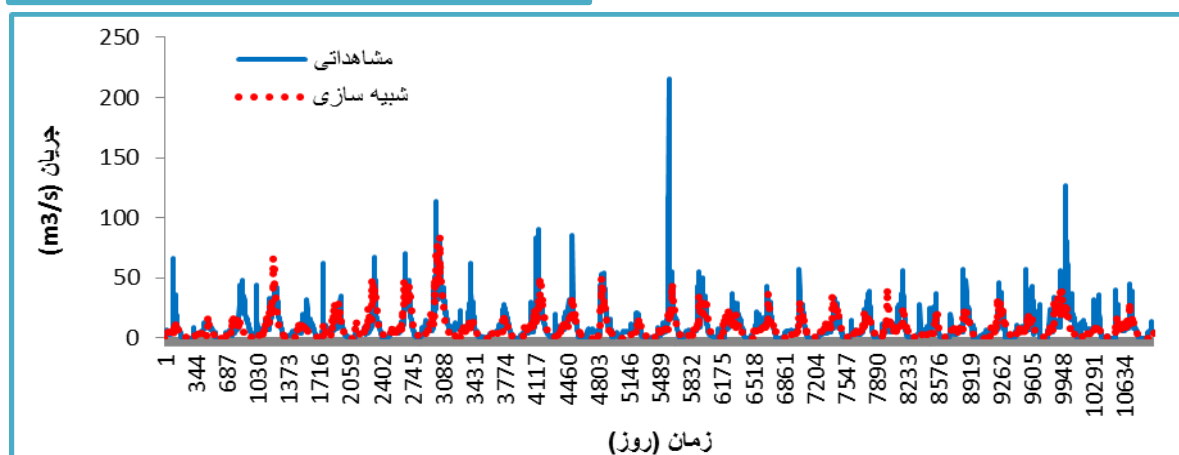
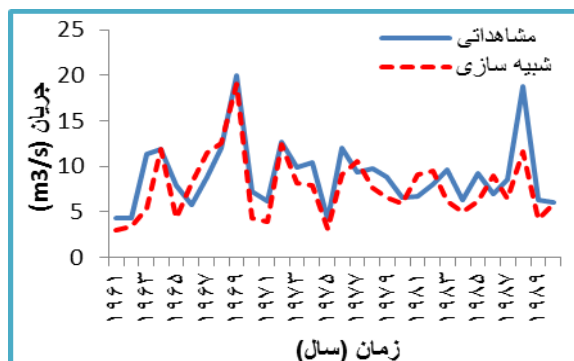
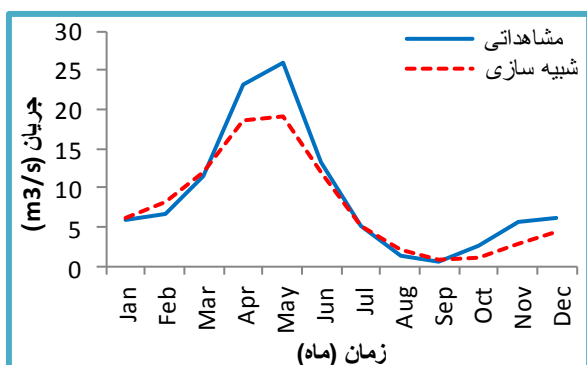
معیارهای ارزیابی	بابرود	بند ارومیه	تپیک	ونیار	ساری قمیش	داشبند
ضریب تعیین (R ²)	۰/۹۴	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۷	۰/۷۵	۰/۸۸
ضریب همبستگی (R)	۰/۹۷	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۶	۰/۹۴
میانگین مربعات خطا (MSE)	۶/۸	۷/۵	۲۶	۶۰/۵	۵۲۷	۶۶/۲
مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)	۲/۶	۲/۷	۵/۱	۷/۸	۲۳	۸/۱
میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	۱/۷۶	۱/۹۴	۳/۷	۴/۴	۱۹/۶	۴/۹
درصد خطای نسبی (ER)	۷/۵	۳۶/۲	۲۵/۵	۵/۶	۸/۳	۸/۵
ضریب کارایی نش - ساتکلیف (NSE)	۰/۸۹	۰/۸	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۶۷	۰/۸۲

آتی به مدل معرفی شد تا مقادیر رواناب حوضه در دوره‌های آتی پیش‌بینی شود. بر طبق نتایج سناریوهای مختلف در دهه ۲۰۲۰ به غیر از ایستگاه‌های ساری قمیش و داشبند که با افزایش جزئی رواناب نسبت به دوره پایه مواجه شده‌اند، به‌طور متوسط در سطح حوضه مورد مطالعه مقدار جریان کاهش پیدا خواهد کرد که این میزان برابر با ۵/۴ درصد خواهد بود. در دهه ۲۰۵۰ این کاهش برابر با ۲۲/۳۵ درصد (۴ متر مکعب در ثانیه) و در دهه ۲۰۸۰ برابر با ۶۵/۴ درصد (۱۱/۷۷ متر مکعب در ثانیه) خواهد بود. بر طبق نتایج انتظار می‌رود در هر سه دهه

مقایسه ظاهری هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل را فراهم می‌کند. به همین منظور، به مقایسه گرافیکی مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در سه مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه در دوره پایه برای هر یک از ایستگاه‌ها پرداخته شد که به‌علت تعداد زیاد هیدروگراف‌ها و ایستگاه‌های مورد مطالعه، برای نمونه هیدروگراف مربوط به ایستگاه بابرود در سه مقیاس زمانی آورده شده است (شکل ۳). پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل بارش - رواناب، پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی شده برای دوره‌های

خواهد بود که خلاصه نتایج آن برای هر سه سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه به تفکیک ایستگاه‌ها در دهه‌های مختلف در جدول ۸ آورده شده است.

مورد بررسی مقدار رواناب نسبت به دوره پایه کاهش یابد که به طور متوسط بلندمدت سالانه در دوره آتی (۲۰۹۹-۲۰۱۱) برابر با ۳۰/۹ درصد (۵/۶ متر مکعب در ثانیه)



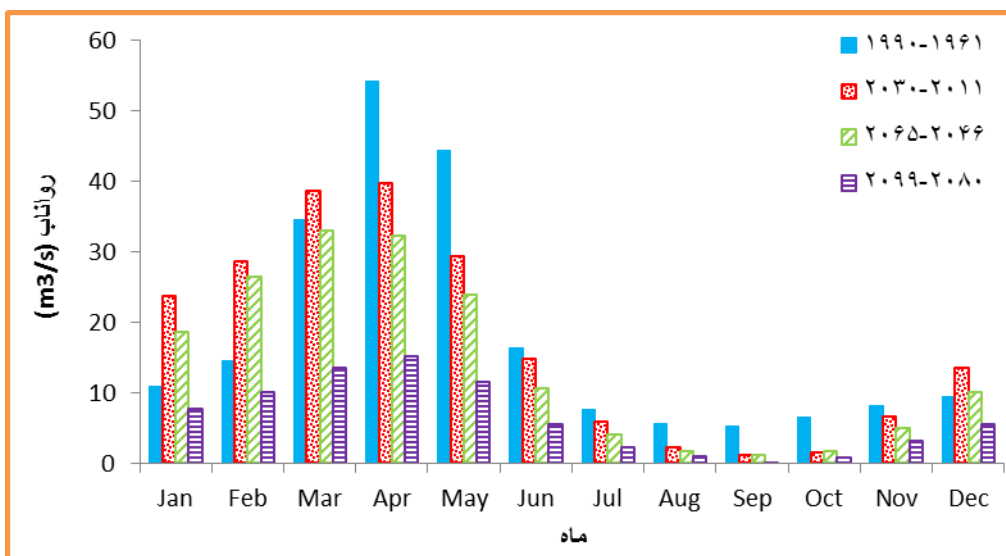
شکل ۳. مقادیر جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دوره پایه در ایستگاه بابرود در سه مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه

جدول ۸. متوسط رواناب بلندمدت سالانه دوره پایه و آتی تحت سه سناریوی مدل HadCM3

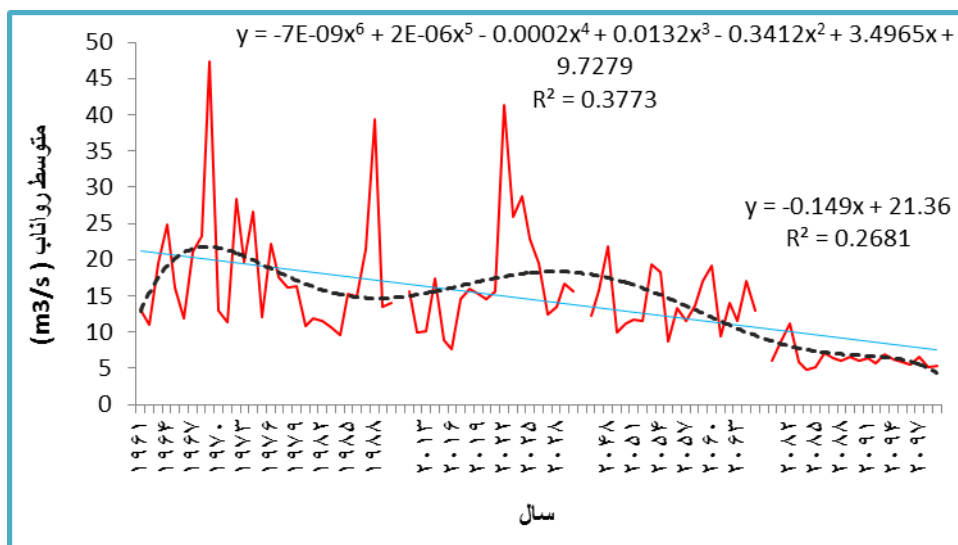
ایستگاه	بابرود	بند ارومیه	تپیک	ونیار	ساری قمیش	داشبند
دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰)	۹	۵/۴۵	۱۱/۸۹	۱۵/۲۶	۵۱/۸۶	۱۵/۴۸
دهه ۲۰۲۰	A1B	۶/۱۵	۴/۲	۹/۸۷	۵۱/۷۲	۱۴/۴۲
	A2	۵/۷	۳/۸۹	۹/۱۶	۵۶/۳	۱۴/۹۳
	B1	۶/۲۳	۴/۲۷	۱۰/۰۵	۸/۳۸	۱۸/۵۲
متوسط دهه ۲۰۲۰	۶/۰۳	۴/۱۲	۹/۶۹	۸/۷۷	۵۸/۴۷	۱۵/۹۶
دهه ۲۰۵۰	A1B	۵/۵	۳/۷۳	۸/۸۱	۴۰/۴۳	۱۱/۱۳
	A2	۶/۸	۴/۶۹	۱۱/۰۵	۵۰/۱۳	۱۳/۷۹
	B1	۶/۱	۴/۱۶	۹/۷۸	۳۹/۳۲	۱۰/۸۷
متوسط دهه ۲۰۵۰	۶/۱۵	۴/۱۹	۹/۸۸	۹/۱۱	۴۳/۳	۱۱/۹۳
دهه ۲۰۸۰	A1B	۴/۸	۳/۳۲	۷/۸۶	۱۲/۸۳	۳/۵
	A2	۳/۹	۲/۷۳	۶/۴۸	۸/۸۶	۲/۴
	B1	۵/۸۷	۴/۰۷	۹/۶۴	۷/۲۶	۳/۹۵
متوسط دهه ۲۰۸۰	۴/۸۷	۳/۳۸	۷/۹۹	۶/۷۸	۱۲/۰۴	۳/۲۹

بررسی روند سری زمانی تغییرات رواناب سالانه در سطح حوضه با استفاده از دو روش رگرسیون خطی و نیمه خطی (پولی‌نومیال) حاکی از کاهش رواناب در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه در سطح حوضه است میزان شیب تغییرات با استفاده از روند خطی برابر با ۱۵ درصد از ابتدای دوره آماری تا انتهای قرن بیست‌ویکم خواهد بود (شکل ۵).

متوسط بلندمدت ماهانه رواناب سطح حوضه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه نیز نشان می‌دهد که مقدار رواناب در دهه ۲۰۲۰ در ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و در دهه ۲۰۵۰ نیز در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت و در سایر ماه‌ها در هر دو دهه و همچنین در تمامی ماه‌های دهه ۲۰۸۰ از مقدار رواناب نسبت به دوره پایه کاسته خواهد شد (شکل ۴).



شکل ۴. میانگین بلندمدت ماهانه رواناب سطح حوضه در دوره‌های آبی نسبت به دوره پایه



شکل ۵. سری زمانی تغییرات بلندمدت رواناب سالانه در سطح حوضه طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۹۹

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی سناریوهای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و تأثیر آن بر تغییرات رواناب در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی (دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) پرداخته شد. بدین منظور از مدل اقلیمی HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) و همچنین مدل بارش- رواناب IHACRES برای شبیه‌سازی رواناب در سطح حوضه استفاده شد. براساس نتایج انتظار می‌رود دما در هر سه دوره آتی به ترتیب ۱/۴۵، ۲/۹۵ و ۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش یابد. همچنین حوضه در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱ شاهد افزایش جزئی بارش و کاهش آن در دو دوره آتی خواهد بود. ضمن اینکه مدل ریزمقیاس‌گردانی LARS-WG در زمینه پیش‌بینی بارش بلندمدت سالانه دوره‌ای موفق عمل کرده است. پس از پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی در دهه‌های مختلف، خروجی حاصل از مدل ریزمقیاس‌گردانی (دما و بارش) و همچنین مقدار رواناب مشاهداتی در ایستگاه‌های هیدرومتری، ورودی مدل بارش- رواناب IHACRES برای محاسبه تغییرات رواناب سطحی در دوره‌های آتی قرار گرفت. نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی بارش- رواناب، براساس معیارهای عملکردی مختلف، حاکی از دقت خوب و مناسب مدل در شبیه‌سازی تغییرات رواناب در ایستگاه‌های مورد بررسی است که با نتایج مطالعات زارعی و همکاران [۷] در حوضه آبریز کسلیان مبنی بر توانایی خوب مدل و مطالعات آشفته و بزرگ‌حداد [۱] در حوضه آیدوغموش در آذربایجان شرقی مطابقت دارد. همچنین مدل توانایی بیشتری در تخمین رواناب در زیرحوضه‌های با مساحت کم دارد که با مطالعات دای و

کروک [۲۳] در چند حوضه آفریقای جنوبی مطابقت دارد. نتایج حاصل از مدل بارش- رواناب نشان داد که متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۹۸، ۴/۰۶ و ۱۱/۷۷ متر مکعب در ثانیه کاهش خواهد یافت (جدول ۹). در دوره ۲۰ ساله اول، هرچند کاهش به نسبت کمی دارد، به این دلیل که متوسط دمای سالانه بلندمدت در این دوره ۱/۴۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد این در حالی است که متوسط بارندگی سالانه بلندمدت در دهه ۲۰۲۰ به میزان ۴/۳ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش یافته است. بنابراین افزایش دما به کاهش رطوبت خاک و در نتیجه کاهش رواناب منجر می‌شود. اما دلیل کاهش شدید متوسط رواناب سالانه بلندمدت در دوره‌های بعدی به‌ویژه دهه ۲۰۸۰ در ازای افزایش دما و البته کاهش بارش نسبت به دوره پایه بوده است یعنی هر دو عامل در جهت کاهش تولید رواناب عمل کرده‌اند. همچنین نتایج نشان داد به‌رغم کاهش حجم کل رواناب در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه، این کاهش به جریان‌های متوسط و زیاد مرتبط می‌شود و در جریان‌های کم، حجم رواناب دوره‌های آتی کمتر کاهش خواهد یافت. این پدیده به دلیل تأثیر بیشتر متغیر دما در جریان‌های کم و تأثیر بیشتر متغیر بارندگی در جریان‌های زیاد است که با مطالعات آشفته و بزرگ- حداد [۱] مطابقت دارد.

در مجموع براساس نتایج حاصل از مدل اقلیمی HadCM3 و مدل بارش- رواناب IHACRES به ترتیب برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و شبیه‌سازی مقدار رواناب، انتظار می‌رود دما در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه افزایش و مقدار بارش کاهش یابد؛ متوسط رواناب نیز با توجه با افزایش دما و کاهش بارش حوضه در هر سه

جدول ۹. نتایج حاصل از مدل IHACRES به‌طور متوسط بلندمدت سالانه در دهه‌های مختلف

پارامتر	مقدار رواناب (m ³ /s)	اختلاف با دوره پایه (m ³ /s)	اختلاف با دوره پایه (درصد)
میانگین دوره پایه	۱۸/۱۶	-	-
دهه ۲۰۲۰	۱۷/۱۷	۰/۹۸	۵/۴
دهه ۲۰۵۰	۱۴/۱	۴/۰۶	۲۲/۳۵
دهه ۲۰۸۰	۶/۳۹	۱۱/۷۷	۶۵/۴
میانگین دهه‌های آتی	۱۲/۵۵	۵/۶۱	۳۰/۹

هواشناسی ایران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران. ۱۱ ص.

[۵]. ذهبیون، باقر، گودرزی، محمدرضا، مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۹، کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره‌های ۱ و ۲: ۴۳-۵۸.

[۶]. رسولی، علی‌اکبر، رضایی‌بنفشه، مجید، مساح‌بوانی، علیرضا، خورشیددوست، علی‌محمد، قرمزچشمه، باقر، ۱۳۹۳، بررسی اثر عوامل مرفو- اقلیمی بر دقت ریزمقیاس گردانی مدل LARS-WG، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲۴: ۹-۱۸.

[۷]. زارعی، مهدی، قنبریور، محمدرضا، حبیب‌نژادروشن، محمود، شاهدهی، کاکا، ۱۳۸۸، شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش- رواناب IHACRES (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کسلیان)، علوم مهندسی و آبخیزداری ایران، شماره ۸: ۲۰-۱۱.

[۸]. شائمی، اکبر، حبیبی‌نوخندان، مجید، ۱۳۸۸، گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، چاپ اول، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ۲۱۶ ص.

[۹]. صداقت‌کردار، علی، فتاحی، ابراهیم، ۱۳۸۷، شاخص‌های پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دانشگاه سیستان و بلوچستان، جلد ششم، شماره ۱۱: ۷۶-۵۹.

[۱۰]. صمدی، سیده زهرا، مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۷، معرفی روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و SDSM به منظور کوچک‌مقیاس کردن آماری داده‌های دما و بارندگی، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، دانشگاه تبریز، تبریز، ۹ ص.

[۱۱]. طائی‌سمیرمی، سیاوش؛ مرادی، حمیدرضا؛ خدقلی، مرتضی، ۱۳۹۴، پیش‌بینی تغییرات برخی از متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG و خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوهای مختلف، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز، جلد هفتم، شماره ۲: ۱۵۶-۱۴۵.

دوره آتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. نتایج این پژوهش با مطالعات مینویل و همکاران [۳۶]، عبدو و همکاران [۱۹]، زرغامی و همکاران [۴۵]، سیلبرستین و همکاران [۴۲]، جوو و همکاران [۲۵]، مساح‌بوانی [۱۶]، لاله‌سیاه و همکاران [۱۵]، آشفته و بزرگ‌حداد [۱]، و حمیدیان‌پور و همکاران [۴] مطابقت دارد. از آنجا که حوضه مورد مطالعه نیز از حوضه‌های مهم و حساس در شمال غرب کشور محسوب می‌شود و دریاچه موجود در آن در چند دهه اخیر با کاهش شدید سطح آب مواجه بوده است، براساس نتایج سناریوهای مختلف، این حوضه با مشکل کاهش رواناب سطحی، کاهش بارندگی و افزایش دما و در نتیجه افزایش تبخیر روبه‌رو خواهد بود. از این‌رو کمبود آب در این حوضه در آینده جدی‌تر خواهد بود. بنابراین از نظر برنامه‌ریزی منابع آب و تعیین سیاست‌های بهره‌برداری و تخصیص منابع آب حوضه، باید بازنگری‌هایی صورت گیرد؛ چراکه مقدار رواناب سطحی و توزیع جریان با توجه به تغییرات اقلیمی مورد انتظار کاملاً تغییر کرده است.

منابع

- [۱]. آشفته، پریس‌اسادات؛ بزرگ‌حداد، امید، ۱۳۹۲، ارائه رویکرد احتمالاتی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب، مجله مهندسی منابع آب، سال ششم: ۶۶-۵۱.
- [۲]. آشفته، پریس‌اسادات، مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۹، تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوضه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال چهاردهم، شماره ۵۳: ۳۹-۲۵.
- [۳]. بحری، معصومه، دستورانی، محمدتقی، گودرزی، مسعود، ۱۳۹۴، بررسی خشکسالی‌های دهه ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت اثر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوزه آبخیز اسکندری، استان اصفهان، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۲: ۱۷۱-۱۵۷.
- [۴]. حمیدیان‌پور، محسن، سلطانی، جابر، قندهاری، قاسم، ۱۳۹۲، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه بار و طاغان نیشابور با استفاده از برون‌داد مدل گردش عمومی جو (HadCM3)، نخستین کنفرانس ملی آب و

- Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- [21]. Beecham, Simon. Rashid, Mamuner. and Chowdhury Rezaul K, 2014, Statistical downscaling of multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a Generalized Linear Model. *International Journal of Climatology*, 34(14): 3654–3670.
- [22]. Dibike, Yonas B. and Coulibaly, Paulin, 2005, Hydrologic impacts of climate change in the Saguenay Watershed: Comparison of Ownscaling Methods and Hydrologic Models. *Journal of Hydrology*, 307(1-4): 145–163.
- [23]. Dye, Peter J. and Croke, Bary FW, 2003, Evaluation of stream flow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modeling and Software*, 18: 705-712.
- [24]. Goodarzi, Massoud. Jahanbakhsh, Saeed. Rezaee, Majid. Ghafouri, Abdulmohammad. Mahdian, Mohammad Hossein, 2011, Assessment of Climate Change Statistical Downscaling Methods in a Single Site in Kermanshah, Iran, *American-Eurasian Journal. Agric. & Environ. Sci.*, 6 (5): 564-572.
- [25]. Guo, Binbin. Zhang, Jing. Gong, Huili. and Cheng, Xiaoguang, 2014, Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin China, *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(1): 55-67.
- [26]. Hardy, John T, 2003, *Climate Change: Causes, Effects, and Solutions*. John Wiley & Sons, Ltd. 247 P.
- [27]. Hashmi, Muhammad Zia ur Rahman. Shamseldin, Asaad Y. and Melville, Bruce, 2009, Downscaling of future rainfall extreme events: a weather generator based approach. 18th World IMACS. MODSIM Congress, Cairns, Australia, 7p.
- [28]. Hreiche, Antoine. Najem, Wajdi. and Bocquillon, Claude, 2007, Hydrological impact simulation of climate change on Lebanese coastal rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 52(6): 1119-1133.
- [29]. Hu, T.S. Lam, K.C. and Ng, S. Thomas, 2001, River flow time series prediction with a range dependent neural network. *Hydrological Science Journal*, 46(5): 729-745.
- [30]. Ingol, Eusebio. and Mckinney, Daene C, 2009, Hydrologic model for Rio Conchos Basin: Calibration and Validation. CRWR Online Report 08-09. Bureau of Engineering Research, the University of Texas at Austin, 52p.
- [۱۲]. کارآموز، محمد، رمضانی، فرید، رضوی، سامان، ۱۳۸۵، پیش‌بینی بلندمدت بارش با استفاده از سیگنال‌های هواشناسی: کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، تهران. ۱۱ص.
- [۱۳]. کمال، علیرضا، مساح‌بوانی، علیرضا، ۱۳۸۹، تأثیر تغییر و نوسانات اقلیمی بر رواناب حوضه با دخالت عدم قطعیت دو مدل هیدرولوژی، نشریه آب و خاک، جلد بیست و چهارم، شماره ۵: ۹۳۱-۹۲۰.
- [۱۴]. گلیان، سعید، ابریشم‌چی، احمد، تجریشی، مسعود، ۱۳۸۶، تحلیل سیاست‌های بهره‌برداری از منابع در حوضه آبریز با روش پویایی سیستم، فصلنامه علمی پژوهشی آب و فاضلاب، شماره ۶۳: ۸۰-۷۰.
- [۱۵]. لاله‌سیاه، میترا، فتاحی، ابراهیم، مهسافر، حمید، ۱۳۹۱، تأثیر اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه رودخانه کارون، اولین همایش ملی بیابان، ۱۵ ص.
- [۱۶]. مساح بوانی، علیرضا، ۱۳۸۵، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم و تأثیر آن بر منابع آب مطالعه موردی: حوضه زاینده‌رود اصفهان، رساله دکتری گروه مهندسی سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- [۱۷]. مهسافر، حمید، مکنون، رضا، ثقفیان، بهرام، ۱۳۹۰، اثرات تغییر اقلیم بر بیابان آبی دریاچه ارومیه، فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، سال هفتم، شماره ۱: ۵۸-۴۷.
- [۱۸]. هاشمی‌نسب، فریده السادات، موسوی بایگی، محمد، بختیاری، بهرام و داوری، کامران، ۱۳۹۲، پیش‌بینی تغییرات بارش ۲۰ سال آینده در استان کرمان با استفاده از مدل ریزمقیاس‌کننده LARS-WG و گردش عمومی HadCM3، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال سوم، شماره ۱۲: ۵۸-۴۳.
- [19]. Abdo, Kedir Shaka. Fiseha, B.M. Rientjes, Tome. Gieske, A.S.M. and Haile, A.T, 2009, Assessment of climate change impacts on the hydrology of Gilgel Abay catchment in Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrological Processes*, 23 (26): 3661-3669.
- [20]. Bates, Bryson. Kundzewicz, Zbigniew. Wu, Shaohong. and Palutikof, Jean, 2008, *Climate Change and Water*. Technical paper of the

- [31]. Kilsby, Chris. Jones, Philip. Burton, A. Ford, A.C. Fowler, Hayley. Harpham, C. James, P. Smith, A. and Wilby, Robert, 2007, A daily weather generator for use in climate change studies. *Environmental Modeling and Software*, 22(12): 1705-1719.
- [32]. Lane, Melissa. Kirshen, Paul. and Vogel, Richard, 1999, Indicators of impact of global climate change on U.S water resources. *ASCE, Journal of Water Resource, Planning and Management*, 125(4): 194-204.
- [33]. Lin, JianYi. Cheng, Chun Tian. Chau, Kwok Wing, 2006, Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Science Journal*, 51(4): 599-612.
- [34]. Littlewood, Ian. Clarke, Robin. Collischonn, Walter. and Croke, Bary, 2007, Predicting daily stream flow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modeling and Software*, 22(9): 1229-1239.
- [35]. MassahBavani, Alireza and Morid, Saeed, 2006, Impact of climate change on water resources and food production of zayandeh rud basin. *Iranian journal of water resources*. 1(1): 40-47.
- [36]. Minville, Marie. Brissette, Francois. and Leconte, Robert, 2008, Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed, *Journal of Hydrology*, 358 (1-2): 70– 83.
- [37]. Motovilov, Yuri G. Gottschalk, Lars. Engeland, Kolbjorn. and Rohde, Allan, 1999, Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agriculture and Forest Meteorology*, 98-99: 257-277.
- [38]. Nunes, Joao Pedro. Seixas, J. and Keizer, J.J, 2013, Modeling the response of within-storm runoff and erosion dynamics to climate change in two Mediterranean watersheds: A multi-model, multi-scale approach to scenario design and analysis, *CATENA*, 102: 27-39.
- [39]. Racsco, P., L. Szeidl and. Semenov, Mikhail, 1991, A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modeling*, 57(1-2): 27-41.
- [40]. Semenov, Mikhail. Brooks, Roger. Barrow, Elaine. and Richardson, Clarence, 1998, Comparison of the WGEN and LARSWG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research*, 10: 95-107
- [41]. Semonov, Mikhail. and Stratonovitch, Pierre, 2010, Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts, *Climate Research*, 41: 1-14.
- [42]. Silberstein, Richard. Aryal, Santosh. Durrant, Jacqueline. Pearcey, Mark. Braccia, Michael. Charles, Stephen. Boniecka, Lidia. Hodgson, Geoffrey. Bari, Michele. Viney, Neil. and McFarlane, Don, 2012, Climate change and runoff in south-western Australia, *Journal of Hydrology*, 475: 441-455.
- [43]. Wilks, Daniel S. and Robert L. Wilby. 1999, The weather generation game: a review of stochastic weather models." *Progress in Physical Geography* 23(3): 329-357.
- [44]. Yimer, Girma, Andreja Jonoski, and Ann Van Griensven, 2009, Hydrological response of a catchment to climate change in the Upper Beles River Basin, Upper Blue Nile, Ethiopia. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine*, 2: 49-59.
- [45]. Zarghami, Mahdi. Abdi, Amin. Babaeian, Iman. Hassanzadeh, Yousef. and Kanani, Reza, 2011, Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran, *Global and Planetary Change*, 78(3–4): 137-146.