



دانشگاه گوارن و سوان شون

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد بیست و چهارم، شماره پنجم، ۱۳۹۶  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## ارزیابی شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی توسط مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4 (مطالعه موردی: حوضه توپسرکان، استان همدان)

\*عبدالله طاهری‌تیزرو<sup>۱</sup>، مهرانه خدامرادپور<sup>۲</sup> و محمدجواد مشهدیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، آستادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان،

<sup>۲</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان

<sup>۳</sup>تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۹

### چکیده

**سابقه و هدف:** مدل‌سازی اقلیم منطقه‌ای برای ریزمقیاس‌نمایی به داده‌های شرایط مرزی از یک مدل گردش کلی نیازمند است. مدل‌سازی اقلیمی منطقه‌ای نیز در واقع یک روش زیرمقیاس‌نمایی دینامیکی است. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد طرحواره سطح CLM4.5 جفت شده در مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4 در برآورد مؤلفه‌های بودجه انرژی و آبی با استفاده از سناریوی جدید RCP (RCP4.5) در محدوده دشت توپسرکان است. بدین منظور مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4 جفت شده با طرحواره سطح CLM4.5 با استفاده از خروجی‌های مدل گردش کلی HadGEM2 در محدوده دشت توپسرکان برای دو دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۰۵) و چشم‌انداز (۲۰۱۵-۲۰۲۵) اجرا می‌شود. سپس عملکرد مدل در دوره پایه ارزیابی شده و مؤلفه‌های بیلان آب و توازن آب سطحی در دوره چشم‌انداز، با توجه به اهمیت منابع آب در منطقه مورد مطالعه، بررسی می‌شوند.

**مواد و روش‌ها:** در دوره پایه بارندگی، دما و رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های موجود در منطقه در مقیاس زمانی روزانه مقایسه شدند. همچنین عملکرد مدل توسط شاخص‌های ضریب کارایی مدل، ضریب همبستگی، اریبی، میانگین قدر مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطا بررسی شد. بارندگی شبیه‌سازی شده با مشاهدات ۶ ایستگاه موجود در منطقه مقایسه شد، همچنین دمای اندازه‌گیری شده در ایستگاه سینوپتیک همدان- فرودگاه به منظور ارزیابی دما مورد استفاده قرار گرفت. برای صحت‌سنجی رواناب نیز تنها ایستگاه آب‌سنجی موجود در خروجی حوضه مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌بینی‌ها با استفاده از سناریوی RCP4.5 از گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم انجام گرفتند. در دوره چشم‌انداز تغییرات زمانی و مکانی مؤلفه‌های بیلان آب سطحی شامل بارندگی، تبخیر- تعرق و رواناب بررسی شدند و سپس معادله توازن آب سطحی در حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت.

**یافته‌ها:** نتایج ارزیابی عملکرد مدل در دوره پایه نشان می‌دهد که مدل دارای بهترین عملکرد در برآورد بارندگی (برای ۵ ایستگاه نخست) و دما به دلیل ضرایب کارایی مناسب و خطاهای کوچک است. در رابطه با رواناب، ضریب کارایی

\* مسئول مکاتبه: [attizro@gmail.com](mailto:attizro@gmail.com)

مثبت اما به نسبت کوچک است، ضریب همبستگی نیز دارای مقدار قابل قبولی است که نشان از عملکرد نسبتاً مناسب مدل در برآورد رواناب دارد. در نخستین سال دوره چشم‌انداز (۲۰۱۵) بیش‌ترین مقادیر بارندگی در بخش‌های شرقی و مرکزی (نواحی مرتفع) و کم‌ترین مقادیر در جنوب‌غرب دشت اتفاق می‌افتد. پیش‌بینی بارندگی در ۱۰ سال آینده (۲۰۱۶-۲۰۲۵) نشان از کاهش بارندگی در بیش‌تر بخش‌ها، به‌جز بخش کوچکی در شرق و جنوب، دارد که بیش‌ترین مقادیر کاهش (حدود ۱۲٪)، در شمال‌شرق و مرکز دشت است. از آن‌جا که بارندگی تعیین‌کننده میزان رطوبت در دسترس است بالتبع توزیع مکانی و تغییرات تبخیر- تعرق، مشابه بارندگی است. بیش‌ترین مقادیر رواناب در شرق و شمال‌شرق (بخش مرتفع) دشت اتفاق افتاده و در دوره ۱۰ ساله ۲۰۱۶-۲۰۲۵ یک افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصدی در بخش شرقی و یک کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی در بخش مرکزی اتفاق خواهد افتاد. ارزیابی بیلان آب سالانه نشان می‌دهد که در ۷ سال توازن آبی برقرار بوده اما در ۳ سال باقی‌مانده (۲۰۱۷، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) اختلاف‌ها میان طرفین معادله بیلان آب محسوس هستند.

**نتیجه‌گیری:** با توجه به مساحت کوچک حوضه و دوره زمانی کوتاه چشم‌انداز که در آن آثار تغییر اقلیم قابل تشخیص نیست حصول مقدار متوسط ۱/۳ میلی‌متر اختلاف در معادله بیلان برای این دوره ۱۰ ساله می‌تواند بیانگر عملکرد مطلوب مدل در برقراری توازن آبی حوضه باشد. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت علی‌رغم بهبود توازن آب، عملکرد طرحواره سطح هنوز در پارامترسازی بودجه آبی، به‌ویژه رواناب مطلوب نیست، در حالی که در برآورد بودجه انرژی، با توجه به برآورد خوب در شبیه‌سازی میانگین دما، عملکرد مناسبی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** اعتبارسنجی مدل‌های اقلیمی، مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM4، شاخص‌های ارزیابی مدل، توازن آبی، طرحواره سطح CLM4.5

### مقدمه

آینده شناخته شده‌اند. اما به‌دلیل عملکرد آن‌ها در مقیاس بزرگ، تنها نمایش بزرگی از توپوگرافی، تفاوت (مرز) خشکی و دریا و پوشش زمین را شامل می‌شوند و شبیه‌سازی گردش‌های جوی کوچک مقیاس در آن‌ها محدود است (۳۹). بنابراین در مقیاس‌های کوچک مکانی (شبکه‌های دارای تلاقی حدود ۱۰×۱۰ کیلومتر) و زمانی (حدود ساعتی یا روزانه) خطاهای قابل‌توجهی در همه این نوع مدل‌ها وجود دارند. از نظر پیش‌بینی اقلیم، خروجی و نتایج این مدل‌ها تنها می‌تواند گرایش‌های کلی را نشان دهد، بنابراین استفاده از این برآوردها در مقیاسه با ضرورت تجزیه و تحلیل منابع آب در این مقیاس‌های مکانی و زمانی دارای محدودیت است (۴۵).

امروزه خروجی مدل‌های اقلیمی بزرگ مقیاس موسوم به مدل گردش کلی<sup>۱</sup> به‌عنوان پایه‌ای در مطالعات مدل‌سازی منطقه‌ای اقلیمی با مقیاس کوچک بسیار قابل‌توجه هستند. مدل‌های گردش کلی در برآورد توازن آبی- اقلیمی بر روی شبکه جغرافیایی بسیار وسیع و نیز بر روی مقیاس‌های زمانی بزرگ (فصلی یا سالانه) استفاده می‌شوند. این مدل‌ها ابزارهای مهمی در فهم ساختار جو، ارتفاع و فرآیندهای مرتبط با سیاره‌های مختلف هستند که به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی گردش عمومی در زمین استفاده می‌شوند و امروزه به‌عنوان ابزاری کاربردی برای بررسی تغییرات اقلیمی محتمل در

1- GCM, General Circulation Model

که در اکثر مطالعات مربوط به تغییر اقلیم به کار برده شده است (۱۵، ۱۶، ۲۰، ۳۰، ۳۰، ۴۴ و ۴۱). در این پژوهش نیز نسخه چهارم این مدل، RegCM، به دلیل ارتقای طرحواره‌های سطح خشکی‌ها، لایه مرزی سیاره‌ای و بهبود شار جو-اقیانوس و هم‌چنین بهبود انعطاف‌پذیری و کاربرپسندی و سایر ویژگی‌های جدید مورد بررسی قرار گرفت.

جیورجی و همکاران (۲۰۱۲) خروجی‌های مدل RegCM4 را در چهار محدوده معین‌شده در چارچوب CORDEX<sup>۱</sup>، شامل آفریقا، آمریکای جنوبی، آسیای شرقی و اروپا، ارایه کردند و به بررسی رفتار و حساسیت‌های مدل در رژیم‌های اقلیمی مختلف پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که کارایی نسخه چهارم مدل (RegCM4) در جنبه‌های مختلف در مقایسه با نسخه‌های قبلی به‌طورکلی بهبود یافته است (۱۶).

تورما و همکاران (۲۰۱۱) صحت‌سنجی سومین نسخه RegCM را با توان تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر (بیش‌ترین دقت قابل دستیابی در مدل RegCM3) در حوضه کارپتین و نواحی اطراف آن ارایه کردند. توانایی مدل در شبیه‌سازی تغییرات مکانی و زمانی دما و بارندگی در منطقه مورد مطالعه با کاربرد شاخص‌هایی که دامنه وسیعی از مقیاس‌های زمانی (از روزانه تا مقیاس‌های اقلیم‌شناسی) و مکانی (از میانگین درونی محدوده تا مقیاس محلی) را در بر می‌گیرند، در مقایسه با داده‌های مشاهداتی مختلف در دوره زمانی ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی ارزیابی شد. نتایج مقایسه خروجی‌های مدل و مشاهدات نشان‌دهنده اختلاف‌های کوچک در دما است، در حالی که بارندگی اختلافات بزرگی، به‌دلیل فرا-برآورد قابل ملاحظه مدل به‌ویژه در زمستان، دارد. آنان اشاره کرده‌اند که این

با توجه به نیاز به متغیرهای اقلیمی در توان تفکیک کوچک (مقیاس منطقه‌ای) در مدیریت کشاورزی و منابع آب، برای استفاده از خروجی مدل‌های گردش کلی از روش‌های ریزمقیاس استفاده می‌شود. به‌طور کلی دو روش ریزمقیاس‌کننده آماری و دینامیکی به کار می‌روند، که هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی است (۴۰ و ۴۶). دیدگاه ریزمقیاس‌کننده‌های آماری اغلب نسبت به دیدگاه دینامیکی، به دلیل کاربرد نسبتاً آسان‌تر و هزینه‌های کم‌تر، ترجیح داده می‌شد، در حالی که امروزه با پیشرفت سریع علوم رایانه و در دسترس بودن سیستم‌های رایانه‌ای سریع، دیدگاه دینامیکی به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است. دیدگاه دینامیکی توان تفکیک افقی را بهبود می‌دهد.

مدل‌های دینامیکی شامل دو بخش دینامیک و فیزیک می‌باشند. در بخش دینامیک، مدل جزئیات مربوط به روابط دینامیکی حاکم بر جو و حل آن‌ها با طرحواره‌های زمانی و مکانی مختلف وارد می‌شود، در حالی که در بخش فیزیک، مدل شامل طرحواره‌های سطح خشکی‌ها، تابش، میکروفیزیک ابر، لایه مرزی و کومولوس می‌باشد. اگرچه این مدل‌ها بهترین ابزار برای برآورد قابل‌قبولی از تغییرات منطقه‌ای اقلیم می‌باشند، اما هنوز هم خطاهای سیستمی محلی در آنان مشهود است (۴۶). در این مدل‌ها شرایط مرزی اتمسفری جانبی<sup>۱</sup>، شرایط سطح اولیه و برخی از شرایط مرزی سطح مانند دمای سطح دریا<sup>۲</sup> و یخ دریایی برای مدل اقلیم منطقه‌ای از طریق تحلیل داده‌های مشاهده‌ای، مدل‌های گردش عمومی جوی و مدل‌های گردش عمومی جفت شده‌ی اقیانوس-جو<sup>۳</sup> یا داده‌های باز تحلیل شده<sup>۴</sup> تأمین می‌شوند (۴۳). مدل منطقه‌ای اقلیمی<sup>۵</sup> RegCM یک مرجع کلیدی است

- 1- LBCs, lateral atmospheric boundary conditions
- 2- SST, sea surface temperature
- 3- AOGCM, coupled atmosphere-ocean GCMs
- 4- Reanalysis data sets
- 5- Regional Climate Model

6- International coordinated regional climate downscaling experiment

تطبيق با پدیده تغییر اقلیم، بهینه‌سازی سطح زیر کشت با استفاده از مدل Lingo مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن برای دوره‌های آتی به ترتیب ۱۶۰ و ۴۲۳ هکتار کاهش سطح زیر کشت را نسبت به دوره پایه برآورد نمود (۸).

آشفته و بزرگ‌حداد (۲۰۱۵) عملکرد مدل‌های AOGCM را با رویکردی جدید مورد ارزیابی قرار دادند به نحوی که عملکرد مدل‌های اقلیمی از دو دیدگاه هیدرولوژیکی و منابع آبی مدنظر قرار گرفته است. در این پژوهش مدل‌های AOGCM تحت سناریوی A2 برای برآورد متغیرهای دما و بارندگی در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای حوضه آیدوغموش در استان آذربایجان شرقی، مورد استفاده قرار گرفتند؛ رواناب ماهانه نیز با معرفی این خروجی‌ها در مدل هیدرولوژیکی IHACRES شبیه‌سازی شد. آنان نشان دادند که مدل‌ها توانایی خوبی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و در نتیجه رواناب دارند (۳).

اخوان و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات مقدار نیاز خالص آبیاری محصولات عمده کشت شده در دشت همدان- بهار را با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG5 مورد مطالعه قرار دادند. آنان ابتدا با استفاده از مقادیر بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر و ساعات آفتابی روزانه ایستگاه سینوپتیک همدان- فرودگاه طی دوره آماری ۳۰ ساله پایه ۱۹۸۱-۲۰۱۰ توانایی مدل LARS-WG5 برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی را بررسی و تأیید نمودند؛ سپس با استفاده از داده‌های مدل HadCM3 مبتنی بر سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 مقادیر دمای حداقل و حداکثر، تابش خورشیدی و بارش را در دوره ۲۰۱۱-۲۰۴۰ شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که میانگین بارش در ماه‌های اکتبر، دسامبر و فوریه در هر سه سناریو افزایش و میانگین بارش ماه‌های مارس و آوریل و مه در سناریوهای A2 و B1 کاهش خواهد یافت. آنان

فرا- برآورد ممکن است به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در مشاهدات، افزایش یافته باشد (۳۸).

او و همکاران (۲۰۱۴) تغییرات مکانی و زمانی بارندگی را در محدوده آسیای شرقی از چارچوب CORDEX برای دوره حاضر (۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵ میلادی) و آینده (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰ میلادی) با استفاده از مدل RegCM4 بررسی کردند. پیش‌بینی‌های اقلیم آینده که توسط نسخه دوم مدل جهانی جفت شده جو- اقیانوس<sup>۱</sup> هدلی بر اساس سناریوهای واداشت تابشی<sup>۲</sup> RCP 4.5 و RCP 8.5 تولید شده‌اند به‌عنوان شرایط مرزی هواشناسی برای مدل RegCM4 استفاده شدند. در این پژوهش مدل RegCM4 توزیع‌های مکانی بارندگی را با ضریب همبستگی ۰/۷ در مقایسه با داده‌های واحد پژوهش اقلیمی<sup>۳</sup> CRU شبیه‌سازی کرد. در رابطه با تغییرات زمانی، مهارت‌های شبیه‌سازی مدل بر اساس مناطق جغرافیایی و فصول تغییر کرده و به‌طور کلی نشان‌دهنده کارایی نسبتاً ضعیف‌تر (فرو- برآورد بارش) در تابستان نسبت به زمستان است (۳۰).

دهقان و همکاران (۲۰۱۴) در پژوهشی بهینه‌سازی سطح زیر کشت و ارزیابی عملکرد شبکه آبیاری تحت فشار بیل سوار استان اردبیل را در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار دادند. داده‌های دما و بارش برای دوره اقلیمی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۰ و دو دوره آتی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و ۲۰۵۰-۲۰۸۰ با استفاده از خروجی‌های مدل HadCM3 و روش ریزمقیاس نمایی IDW برای دو سناریوی اقلیمی A2 و B2 تولید شدند. نتایج نشان داد که سناریوی A2 نسبت به B2 شرایط جدی‌تری در پی دارد. به‌عنوان یک راهکار برای

- 1- HadGEM2-AO, Hadley Center Global Environmental Model version 2 coupled with the Atmosphere-Ocean
- 2- RCPs, Representative Concentration Pathways
- 3- CRU, Climate Research Unit

طرحواره‌ها نقش مهمی در برآورد مؤلفه‌های بودجه آب و انرژی سطح ایفا می‌کند (۱۳، ۷، ۲۲، ۱۰، ۲۳، ۱۹ و ۳۷). مؤلفه‌های چرخه آبی طرحواره‌های سطح، شامل رواناب، بارندگی، تبخیر-تعرق و تغییرات رطوبت خاک، به دلیل پیچیدگی‌های فیزیکی نمی‌توانند با دقت کافی در مدل‌های منطقه‌ای اقلیمی پارامترسازی شوند و تأثیر قابل توجهی در شبیه‌سازی توسط این مدل‌ها دارند.

طرحواره‌های سطح خشکی جفت‌شده در آخرین نسخه ارائه شده مدل RegCM، شامل طرحواره انتقال زیست‌کره-جو<sup>۱</sup>، ارائه شده توسط دیکینسون و همکاران (۱۹۹۳) (۹) و طرحواره‌های جدید و پیچیده‌تر نسخه‌های ۳/۵ و ۴/۵ از مدل جامع خشکی<sup>۲</sup>، السن و همکاران (۲۰۱۳ و ۲۰۰۸) (۳۳) و (۳۱) است.

اجرای مدل RegCM4 با دو طرحواره سطح خشکی‌های BATS و CLM3.5 در شبیه‌سازی‌های فصل زمستان در هیمالیای غربی بیانگر بهبود شبیه‌سازی بارش و دمای سطح توسط طرحواره سطح CLM3.5 است، که از دلایل آن می‌توان به افزایش تعداد لایه‌های خاک، بهبود مدل کردن ناهمگنی سطح، با وارد کردن گروه‌های بیش‌تری از پوشش گیاهی (۲۴ نوع پوشش گیاهی) در کسر پوشش گیاهی سلول شبکه، و بهبود مدل کردن پوشش گیاهی، با جفت کردن مدل انتقال فتوسنتزی، در طرحواره CLM3.5 اشاره کرد (۳۷). هم‌چنین کانگ و همکاران (۲۰۱۴) با مقایسه شبیه‌سازی‌های بارش روزانه توسط مدل RegCM4 جفت‌شده با دو طرحواره سطح BATS و CLM3.5 در فصل تابستان در آسیای شرقی نشان دادند بهبود برآورد شدت و فراوانی بارندگی روزانه

نتیجه گرفتند که با توجه به تغییرات افزایشی مقدار نیاز خالص آبیاری محصولات مختلف، به‌گزینی الگوی کشت متناسب با تغییرات اقلیمی ضروری است (۱).

بذرافشان و همکاران (۲۰۱۵) فراوانی‌های انتقال و فراوانی‌های غیرشرطی خشک‌سالی در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۱۰۰-۲۰۵۶) را با شرایط اقلیمی فعلی (۱۹۵۶-۲۰۰۵) در دو اقلیم حدی ایران (بندرانزلی و بوشهر) مقایسه کردند. برای ریزمقیاس نمایی داده‌های بارندگی از خروجی مدل بزرگ مقیاس HadCM3 تحت سناریوی A2 استفاده شده و ریزمقیاس نمایی توسط مدل LARS-WG انجام شده است. نتایج این پژوهش بیانگر افزایش معنادار فراوانی‌های انتقال در ایستگاه بندرانزلی (انتقال از طبقه خشک‌سالی شدید به غیرخشک‌سالی و بالعکس) و کاهش معنادار در ایستگاه بوشهر (ماندگاری در طبقه خشک‌سالی شدید) می‌باشد (۴).

مالمیر و همکاران (۲۰۱۶) اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش و تغییرات دبی رودخانه قره‌سو در حوضه آبریز قره‌سو را در استان کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، داده‌های بزرگ مقیاس مدل گردش کلی HadCM3 تحت دو سناریوی اقلیمی A2 و B2 با استفاده از مدل SDSM ریزمقیاس شده و سپس با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی دبی رودخانه قره‌سو در دوره آتی شبیه‌سازی شد. نتایج بیانگر افزایش دما و کاهش بارندگی و آبدهی رودخانه بودند (۲۶).

طرحواره‌های سطح خشکی‌ها از مهم‌ترین مؤلفه‌ها در مدل‌های اقلیمی و هواشناسی هستند و انتقال تلاطمی تکانه، جرم و انرژی را در سطح مشترک جو و سطح بر عهده دارند. بنابراین انتخاب این

1- BATS, Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme

2- CLM, Community Land Model

(شکل ۱). دو ایستگاه باران‌سنجی به نام‌های باباپیرعلی و سرابی در جنوب و شمال دشت قرار دارند. میانگین بارش سالانه در دوره آماری ۱۸ ساله برای دو ایستگاه سرابی و باباپیرعلی به ترتیب ۴۲۸ و ۴۳۲ میلی‌متر گزارش شده است. هم‌چنین ماه‌های خرداد تا مهر به‌عنوان دوره خشک و دیگر ماه‌های سال (آبان تا اردیبهشت) به‌عنوان دوره تر در محدوده مورد مطالعه محسوب می‌گردند. میزان متوسط تبخیر سالانه از تشت تبخیر ۲۶۶۵/۱۴ میلی‌متر است، به‌طوری‌که بیشینه آن معادل ۳۴۹۹/۵ میلی‌متر و کمینه آن معادل ۲۲۸۰ میلی‌متر می‌باشد. با بررسی ایستگاه‌های باران‌سنجی در دشت‌های اطراف، از ایستگاه‌های مجاور نیز برای ارزیابی مدل در دوره پایه استفاده گردید، که مشخصات ایستگاه‌های مذکور در جدول ۱ و موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

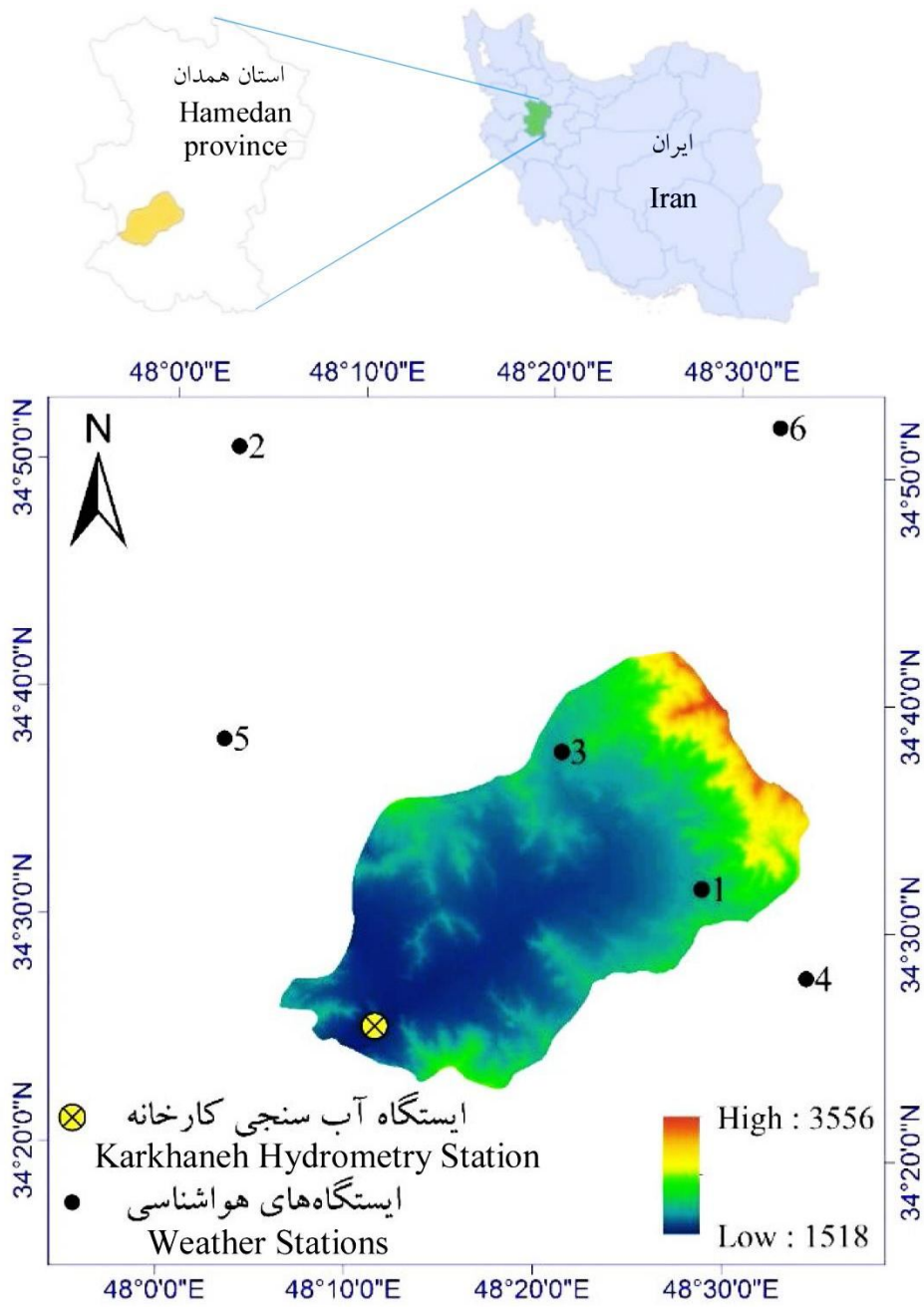
دلیل انتخاب دشت تویسرکان در این پژوهش ورود رودهایی مانند سرکان، کرزان، آرتیمان و سرابی، سرچشمه گرفته شده از دامنه جنوبی کوه‌های الوند، به این دشت است. به هم پیوستن این آبراهه‌ها سبب شکل‌گیری رودخانه تویسرکان می‌گردد که با خروج از بخش جنوب‌غربی دشت، در نهایت به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. آب خروجی از دشت تویسرکان در محلی به نام ایستگاه کارخانه اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱ و جدول ۱). بر اساس آمار بلندمدت این ایستگاه (۵۱ ساله) متوسط رواناب سالانه معادل ۴۹/۹۸ میلیون مترمکعب و دبی متوسط سالانه برابر با ۱/۳۷ مترمکعب در ثانیه می‌باشد (۲۹).

شبیه‌سازی‌شده توسط طرحواره CLM3.5، به‌دلیل مدل کردن مناسب خاک و در نتیجه بهبود برآورد رطوبت خاک است (۲۳). طرحواره سطح CLM4.5 علاوه بر ویژگی‌های طرحواره CLM3.5، دارای پارامتره‌سازی زیرشبکه‌ای رواناب و مدل ساده آب زیرزمینی است که سبب بهبود برآورد بودجه آبی این طرحواره می‌شود (۳۳). بنابراین طرحواره سطح CLM4.5 برای جفت‌شدن با مدل RegCM4 در این پژوهش در نظر گرفته شد.

پژوهش حاضر به ارزیابی شبیه‌سازی‌های مدل RegCM4 جفت شده با طرحواره سطح CLM4.5، در دشت تویسرکان می‌پردازد. این ارزیابی در دوره پایه (از ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵) صورت گرفته و داده‌های ورودی به مدل، خروجی‌های مدل گردش کلی RCP4.5، تحت سناریوی جدید اقلیمی RCP4.5 هستند. هم‌چنین با توجه به اهمیت منابع آب در این منطقه، مؤلفه‌های بیلان آب سطحی شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در دوره چشم‌انداز (۲۰۲۵-۲۰۱۵) با مقدار آن‌ها در سال ۲۰۱۵ مقایسه می‌شود و میانگین ده‌ساله توازن آب شبیه‌سازی‌شده در دوره چشم‌انداز بررسی می‌شود.

### مواد و روش‌ها

**معرفی منطقه مورد مطالعه:** دشت تویسرکان با وسعت حوضه آبریز ۸۰۵ کیلومترمربع یکی از دشت‌های حوضه علیای رودخانه کرخه محسوب می‌گردد که در جنوب کوه الوند بین طول‌های جغرافیایی ۴۸°۵' و ۴۸°۳۵' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۴°۲۲' و ۳۴°۴۲' شمالی قرار گرفته است



شکل ۱- موقعیت و توپوگرافی دشت توپسرکان و ایستگاه‌های مورد مطالعه.  
Figure 1. Location and topography of Toyserkan plain and stations.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه.

Table 1. Properties of stations.

متغیر مورد استفاده در صحت‌سنجی Variable	ارتفاع (متر) Altitude (m)	عرض جغرافیایی (شمالی) Latitude (N)	طول جغرافیایی (شرقی) Longitude (E)	نام Name	شماره No
بارندگی (Precipitation)	1925	34° 31'	48° 28'	سرابی (Sarabi)	1
بارندگی (Precipitation)	1802	34° 50'	48° 03'	آغاجانپلاغی (Aghajanbolaghi)	2
بارندگی (Precipitation)	1917	34° 37'	48° 20'	باباپیرعلی (Babapirali)	3
بارندگی (Precipitation)	1770	34° 27'	48° 34'	خیرآباد (Kheirabad)	4
بارندگی (Precipitation)	1525	34° 37'	48° 02'	خسروآباد (Khosroabad)	5
بارندگی و دما Precipitation and ) (Temperature)	1742	34° 52'	48° 32'	سینوپتیک همدان - فرودگاه (Hamedan- Airport)	6
رواناب (Runoff)	1572	34° 25'	48° 11'	آب‌سنجی کارخانه (Karkhaneh)	7

مدل گردش کلی: در این مطالعه نسخه دوم مدل محیطی جهانی مرکز هدلی (HadGEM2) به‌عنوان مدل گردش کلی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل برای هدف خاص شبیه‌سازی و فهم ارزیابی اقلیم در مقیاس صدساله شامل بازخوردهای بیوژئوشیمی<sup>۲</sup> طراحی شده است (۶). در گروه مدل HadGEM2 اضافه شدن مؤلفه‌های سیستم زمین به مدل اقلیمی مرکز هدلی، توانایی لازم را برای ارائه بازخوردهای بیوژئوشیمی برای ارزیابی آینده سیستم اقلیم فراهم می‌کند (۶).

مدل اقلیمی منطقه‌ای RegCM: چهارمین نسخه مدل RegCM در این پژوهش مورد بررسی قرار

سناریو و داده‌های مورد استفاده: یافته‌های گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (۲۰۱۳) بر پایه گروه جدیدی از سناریوهای که جایگزین استانداردهای گزارش ویژه سناریوهای انتشار<sup>۱</sup> که در دو گزارش پیشین به‌کار رفت، شده‌اند. سناریوهای جدید به‌عنوان نمایندگان مسیرهای تمرکز نامیده می‌شوند. این گروه شامل چهار سناریوی RCP4.5, RCP6, RCP8.5 و RCP2.6 است. این سناریوها بر اساس واداشت تابشی کل تقریبی در سال ۲۱۰۰، به‌ترتیب ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر مترمربع برای RCP4.5, RCP2.6, RCP6 و RCP8.5 هستند. در مطالعه حاضر برای پیش‌بینی از سناریو RCP4.5 استفاده شده است (۲۱).

2- Biogeochemical feedbacks

1- SRES, Special report on emissions scenarios



نظر گرفته شد، به عبارتی مدل اتمسفری در هر ۶۰۰ ثانیه با مدل سطح زمین در ارتباط است. برای آماده‌سازی شرایط مرزی جانبی از روش واهلش نمایی<sup>۳</sup> که توسط جیورجی و همکاران (۱۹۹۳) تشریح شده است (۱۴)، استفاده شد. برای دمای سطح دریا داده‌های ماهانه مدل HadGEM2 مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های ارتفاعی جهانی USGS با دقت ۳۰ ثانیه قوسی نیز به‌عنوان توپوگرافی استفاده شدند. طرحواره‌های امانوئل و CLM4.5 به‌عنوان طرحواره‌های همرفت و سطح خشکی‌ها انتخاب شدند، که پارامتره‌سازی طرحواره CLM4.5 در این بخش بررسی می‌شود. پارامتره‌های سطح زمین در مدل CLM4.5 توسط یک زیر شبکه لانه‌بندی شده که در آن ناهمگنی مکانی سطح زمین برای هر یک از سلول‌های شبکه مدل لحاظ می‌شود، نمایش داده می‌شوند. سلول‌های شبکه ترکیبی از تعداد متفاوتی واحدهای زمین شامل یخچال، دریاچه، مرداب، مناطق شهری و سطوح دارای پوشش گیاهی هستند. سطوح دارای پوشش گیاهی نیز با ترکیبی از ۱۵ نوع عملکرد گیاهی<sup>۴</sup> به علاوه زمین بایر نمایش داده می‌شوند. برای ویژگی‌های پوشش گیاهی، پارامتره‌های شاخص سطح برگ و ساقه و ارتفاع بالایی و پایینی آسمانه گیاه برای هر یک از انواع توابع عملکرد گیاهی معین شده‌اند. رنگ خاک، بافت خاک و چگالی ماده آلی خاک به‌علاوه تعدادی از پارامتره‌های مناطق شهری برای مؤلفه‌های سطح زمین مورد نیاز هستند (۲۴).

بخش‌های مختلف بیلان آب در مدل CLM4.5 شامل آب آسمانه گیاه، برف، رواناب و ذخیره سطحی، نفوذ، آب خاک و اندرکنش آب زیرزمینی (آبخوان آزاد) با آب خاک می‌باشند. رطوبت ورودی در سطح سلول شبکه (qliq,0) برابر با مجموع بارندگی

گرفته است که جزئیات آن به تفصیل توسط جیورجی و همکاران (۲۰۱۲) ارائه شده است (۱۶). مدل RegCM نخستین مدل منطقه‌ای اقلیمی بود که برای شبیه‌سازی اقلیمی منطقه‌ای بلندمدت ایجاد شد. طراحی مدل به‌گونه‌ای است که منبع باز<sup>۱</sup> و کاربر پسند است که می‌تواند برای هر منطقه‌ای از جهان مورد استفاده قرار گیرد (۱۶). ساختار دینامیکی RegCM شامل ورژن هیدرواستاتیک نسخه پنجم مدل میان مقیاس<sup>۲</sup> مرکز ملی تحقیقات اتمسفری (NCAR) و دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا است؛ که معادلات دینامیکی مدل و گسسته‌سازی عددی توسط گرل و همکاران (۱۹۹۴) تشریح شده‌اند (۱۸). مختصه قائم مدل، دستگاه مختصات سیگما و در راستای افقی شبکه B اراکاو است. بخش فیزیک مدل شامل طرحواره تابش CCM3 (۲۵)، طرحواره لایه مرزی غیرمحلی (۲۰)، طرحواره‌های همرفتی شامل طرحواره‌های اصلاح‌شده کو (۲)، گرل (۱۷)، امانوئل (۱۱) و تیدکه (۳۶)، طرحواره بارش و ابر بزرگ مقیاس شامل تغییرات زیرشبکه‌ای ابر (۳۴) و طرحواره‌های سطح BATS (۹)، CLM4 (۳۲) و CLM4.5 (۳۳) است.

در مطالعه حاضر داده‌های شرایط مرزی مدل RegCM با گام زمانی ۳ ساعت از داده‌های تاریخی مدل گردش کلی اخذ شدند؛ سیستم مختصات مخروطی لامبرت که برای عرض‌های میانی و بالای جغرافیایی مناسب است برای اجرا در نظر گرفته شد. مدل برای محدوده‌ای که نقطه مرکزی آن در  $48^{\circ}16'51''$  شرقی و  $34^{\circ}29'43''$  شمالی قرار دارد اجرا می‌شود، تعداد نقاط شبکه مدل ۲۰ نقطه در طول و عرض جغرافیایی و فواصل نقاط شبکه ۱۰ کیلومتر می‌باشد. گام زمانی محاسباتی ۳۰ ثانیه در نظر گرفته شد؛ گام زمانی برای مدل سطح زمین نیز ۶۰۰ ثانیه در

3- Exponential Relaxation  
4- PFTs, Plant Functional Types

1- Open source  
2- MM5, Mesoscale model, Version 5

که در آن،  $f_{over}$  فاکتور میرایی ( $m^{-1}$ ) و  $Z_T$  عمق سطح ایستابی ( $m$ ) است.

در مدل CLM یک بخش ذخیره آب سطحی برای نمایش مرداب‌ها و برکه‌های کوچک در مقیاس زیر شبکه تعریف شده است. متغیرهای حالت برای آب سطحی، جرم آب  $W_{sfc}$  ( $kg\ m^{-2}$ ) و دما  $T_{h2osfc}$  هستند. ذخیره آب سطحی و جریان خروجی، توابعی از تغییرات ارتفاعی ریزمقیاس (میکروتوپوگرافی) هستند؛ فرض می‌شود که میکروتوپوگرافی با توزیع نرمال پیرامون ارتفاع متوسط سلول شبکه توزیع شده است. هم‌چنین با استفاده از انحراف معیار توزیع میکروتوپوگرافی  $\sigma_{micro}$  ( $m$ )، کسر اشباع سلول شبکه محاسبه می‌شود. ذخیره آب سطحی  $W_{sfc}$  به شکل رابطه ۳ با ارتفاع آب سطحی  $d$  (نسبت به ارتفاع متوسط سلول شبکه) مرتبط است:

$$W_{sfc} = \frac{d}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d}{\sigma_{micro} \sqrt{2}} \right) \right) + \frac{\sigma_{micro}^{-2} d^2}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d^2}{2\sigma_{micro}^2}} \quad (۳)$$

که در آن،  $\operatorname{erf}$  نشان‌دهنده تابع خطاست. رابطه ۳ با مقدار معلوم  $W_{sfc}$  با استفاده از روش نیوتن-رافسون برای  $d$  حل شده و با داشتن  $d$  کسر مساحت اشباع شده تعیین می‌شود.

$$f_{h2osfc} = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{d}{\sigma_{micro} \sqrt{2}} \right) \right) \quad (۴)$$

از آن‌جا که داده‌های جهانی برای میکروتوپوگرافی وجود ندارند، پارامترسازی پیش‌فرض به صورت تابعی از شیب است:

$$\sigma_{micro} = (\beta + \beta_0)^\eta \quad (۵)$$

که در آن،  $\beta$  شیب توپوگرافیک است،  $\beta_0 = (\sigma_{max})^{-\frac{1}{\eta}}$  تعیین‌کننده مقدار حداکثر  $\sigma$  است و  $\eta$  یک پارامتر

رسیده به زمین و آب حاصل از ذوب برف (بر حسب  $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) است. شار رطوبتی بین رواناب سطحی، ذخیره آب سطحی و نفوذ به داخل خاک تقسیم می‌شود. برای پارامتره کردن رواناب، مدل رواناب ساده مبتنی بر روش تاپ‌مدل<sup>۱</sup> (۵) که توسط نیو و همکاران (۲۰۰۵) تشریح شده است (۲۸)، مورد استفاده قرار می‌گیرد. اساس تاپ‌مدل، شاخص توپوگرافی است که به صورت لگاریتم طبیعی نسبت مساحت بالادست به شیب محلی تعریف می‌شود. فرض اساسی دیگر در تاپ‌مدل کاهش نمایی هدایت هیدرولیکی اشباع با عمق خاک است. برتری تاپ‌مدل ساده‌شده نسبت به تاپ‌مدل در کاهش تعداد پارامترهای تنظیمی، بهبود کسر اشباع سلول شبکه و در نتیجه برآورد بهتر رواناب سطحی به‌ویژه در نواحی کوهستانی است.

یک مفهوم کلیدی در این روش سطح اشباع‌شده جزئی یا کسر اشباع ( $f_{sat}$ ) است که توسط خصوصیات توپوگرافیکی و وضعیت رطوبت خاک در یک سلول شبکه تعیین می‌شود. رواناب سطحی ناشی از اضافی اشباع ( $q_{over}$ ) تابعی از کسر اشباع سلول شبکه بوده و کسر اشباع نیز تابعی از بیشینه کسر اشباع ( $f_{max}$ ) می‌باشد. بیشینه کسر اشباع برابر است با مقدار تابع توزیع تجمعی احتمال (CDF) شاخص توپوگرافی زمانی که عمق متوسط سطح ایستابی ( $Z_T$ ) سلول شبکه صفر باشد.

$$q_{over} = f_{sat} q_{liq,0} \quad (۱)$$

کسر اشباع جزئی نیز تابعی از رطوبت خاک است:

$$f_{sat} = f_{max} \exp(-0.5 f_{over} Z_T) \quad (۲)$$

1- SIMTOP, The simple TOPMODEL-based runoff model

تنظیم‌پذیر است. مقادیر پیش فرض مدل،  $\sigma_{max}=0.4$  و  $\eta=-3$  هستند.

پس از حذف رواناب سطحی، شار رطوبتی باقیمانده عبارت است از:

$$q_{in, surface} = (1-f_{sat})q_{liq, 0} \quad (6)$$

که بین شارهای ورودی به آب سطحی ( $q_{in, h2osfc}$ ) و خاک ( $q_{in, soil}$ ) تقسیم می‌شود. اگر شار ورودی به خاک از حداکثر ظرفیت نفوذ خاک  $q_{inf, max}$  (بر حسب  $kg\ m^{-2}s^{-1}$ ) تجاوز کند، رواناب اضافی نفوذ ( $q_{infl, excess}$ ) تولید شده و از شار ورودی به خاک تبدیل به شار ورودی به آب سطحی می‌شود.

$$q_{infl, max} = (1-f_{sat})\Theta_{ice}k_{sat} \quad (7)$$

که در آن،  $k_{sat}$  هدایت هیدرولیکی اشباع و  $\Theta_{ice}$  فاکتور رسانش یخ هستند. فاکتور رسانش یخ تابعی است از حجم یخ، زمانی که بخشی از فضای خالی توسط یخ پر شده باشد، افزایش پیچیدگی جریان آب را می‌سازد (۳۳).

$$q_{infl, excess} = \max(q_{in, soil} - (1-f_{h2osfc})q_{infl, max}, 0) \quad (8)$$

پس از حذف تلفات تبخیری (شارهای تبخیر از آب سطحی و خاک)، این شارهای رطوبتی به صورت زیر هستند:

$$q_{in, h2osfc} = f_{h2osfc}q_{in, surface} + q_{infl, excess} - q_{evap, h2osfc} \quad (9)$$

$$q_{in, soil} = (1-f_{h2osfc})q_{in, surface} - q_{infl, excess} - (1-f_{sno} - f_{h2osfc})q_{evap, soil} \quad (10)$$

که در آن،  $f_{sno}$  کسر پوشیده از برف سلول شبکه است که با روش سونسن و لورنس (۲۰۱۲) محاسبه می‌شود (۳۵).

سپس توازن آب سطحی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta W_{sfc} = (q_{in, h2osfc} - q_{out, h2osfc} - q_{drain, h2osfc})\Delta t \quad (11)$$

که در آن،  $q_{drain, h2osfc}$  زهکشی زیرین از ذخیره آب سطحی است:

$$q_{drain, h2osfc} = \min(f_{h2osfc}q_{infl, max}, \frac{W_{sfc}}{\Delta t}) \quad (12)$$

رطوبت خاک از مدل چندلایه پیش‌بینی می‌شود، به این شکل که انتقال عمودی رطوبت خاک توسط نفوذ، رواناب سطحی و زیر سطحی، پراکنش شیب، نیروی جاذبه، تعرق آسمانه گیاه از طریق جذب ریشه‌ای و تبادلات با آب زیرزمینی کنترل می‌شود (۳۳).

اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه: مؤلفه‌های بیلان آب سطحی شامل بارندگی، تبخیر-تعرق و رواناب هستند که معادله پایستگی آب سطحی به شکل زیر است:

$$Pr - ET - Ro = \Delta S + Gr \quad (13)$$

که در آن،  $Pr$  بارندگی،  $ET$  تبخیر-تعرق،  $Ro$  رواناب،  $\Delta S$  تغییر در ذخیره رطوبتی بخش غیراشباع خاک و  $Gr$  تغذیه آب زیرزمینی است. تغذیه آب زیرزمینی می‌تواند مثبت (ورود آب از ناحیه غیراشباع خاک به آبخوان) یا منفی (ورود آب از آبخوان به ناحیه غیراشباع خاک) باشد. مدل  $RegCM4.4$  جفت‌شده با طرحواره سطح  $CLM4.5$  در دو دوره پایه (سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۵ میلادی) و چشم‌انداز (۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ میلادی) در محدوده دشت تویسرکان اجرا شد. صحت‌سنجی مدل با مقایسه بارش، دما و رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه

هرچه مقادیر RMSE به صفر نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده شبیه‌سازی بهتر مدل است. ضریب همبستگی نیز بین ۱- و ۱ متغیر است که مقدار ۱ نشان‌دهنده همبستگی کامل مستقیم، ۱- همبستگی کامل معکوس و صفر نشان‌دهنده عدم وجود همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

### نتایج و بحث

ارزیابی خروجی‌های مدل RegCM-CLM4.5 در دوره پایه: این بخش به ارزیابی بارندگی، دما و رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM جفت شده با طرحواره سطح CLM4.5 با ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌پردازد.

سری‌های زمانی روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۹) برای بارندگی، دما و رواناب در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ آورده شده‌اند. بررسی بارندگی روزانه ایستگاه ۱ (شکل ۲- الف) بیانگر فرو- برآورد بارندگی در برخی از روزها به ویژه در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ می‌باشد. بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه ۲ نیز در برخی زمان‌های مورد مطالعه کم‌تر برآورد شده است (شکل ۲- ب)، در حالی که برای ایستگاه‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ در بسیاری از روزها شاهد فرا- برآورد بارندگی هستیم. مقایسه بارندگی ایستگاه‌ها با یکدیگر (شکل ۲) بیانگر شبیه‌سازی بهتر بارندگی در ایستگاه‌های ۱، ۲ و ۳ است که سبب بالاتر بودن ضرایب همبستگی این ایستگاه‌ها است (جدول ۲). بررسی ضرایب همبستگی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (جدول ۲) بیانگر بهترین ضریب همبستگی در ایستگاه ۲ (۰/۸۸) است، هر چند که مقدار ضریب همبستگی در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه مقادیری قابل قبول (در محدوده ۰/۷۵-۰/۸۸) است. ارزیابی مدل در جدول ۲ در تمام ایستگاه‌ها، مثبت است

در مقیاس زمانی روزانه انجام می‌شود. همچنین مؤلفه‌های بیلان آب سطحی در سال ۲۰۱۵ با میانگین دوره چشم‌انداز مقایسه می‌شود و در نهایت صحت عملکرد مدل در برآورد بیلان آب سطحی بر اساس معادله پایستگی (رابطه ۱۳) ارزیابی می‌شود. برای ارزیابی کارایی مدل، ضریب کارایی مدل EF از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۲۷).

$$EF=1-\frac{\sum_{i=1}^n(O_i-M_i)^2}{\sum_{i=1}^n(O_i-\bar{O})^2} \quad (14)$$

که در آن،  $O_i$ ،  $M_i$  و  $\bar{O}$  به ترتیب داده مشاهداتی و داده مدل در زمان  $i$  و میانگین داده‌های مشاهداتی در کل گام‌های زمانی مورد نظر  $n$  هستند. مقدار EF نیز از منفی بی‌نهایت تا ۱ متغیر بوده و EF برابر با یک نشان‌دهنده شبیه‌سازی کاملاً دقیق مدل است. همچنین ارزیابی مدل،  $b$  و میانگین قدرمطلق خطا، نیز از رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$b=\bar{M}-\bar{O} \quad (15)$$

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|M_i-O_i| \quad (16)$$

که در آن،  $\bar{M}$  میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده مدل در کل زمان مورد بررسی است.

مجذور میانگین مربعات خطا RMSE و ضریب همبستگی<sup>۳</sup> نیز به شکل زیر تعریف می‌شوند:

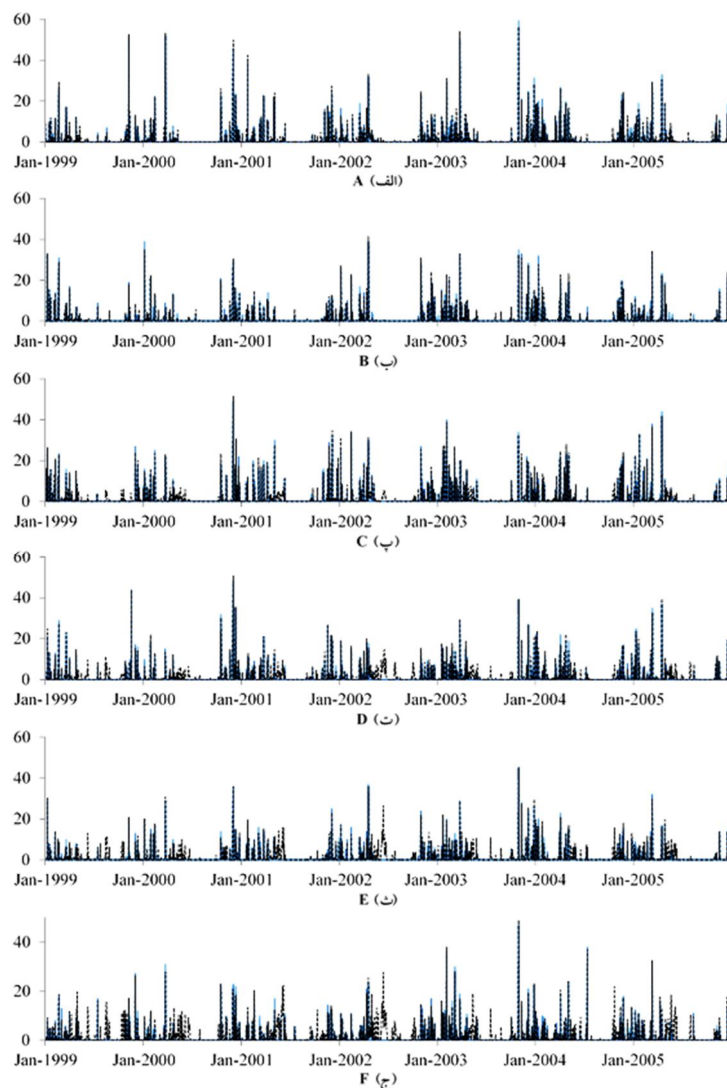
$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(O_i-M_i)^2}{n-1}} \quad (17)$$

$$Correl=\frac{\sum(O_i-\bar{O})(M_i-\bar{M})}{\sqrt{\sum(O_i-\bar{O})^2 \sum(M_i-\bar{M})^2}} \quad (18)$$

- 1- Bias  
2- MAE, Mean Absolute Error  
3- Correlation

میانگین مطلق خطا و مجذور میانگین مربعات خطاها در برآورد بارندگی (جدول ۲) بیشترین مقدار را در ایستگاه ۶ و کمترین مقدار را در ایستگاه ۲ دارد. از دلایل این کاهش و افزایش خطاها می‌توان به کاهش و افزایش اریبی مدل در ایستگاه‌های ۲ و ۶ اشاره کرد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل در برآورد بارندگی روزانه در اکثر ایستگاه‌ها عملکرد مطلوبی دارد.

که نشان از فرا- برآورد کلی بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل در این ایستگاه‌ها دارد. بیشترین فرا- برآورد بارندگی در ایستگاه ۶ (فرا- برآورد ۰/۸۶ میلی‌متر) و کمترین مقدار آن در ایستگاه ۲ (۰/۰۷ میلی‌متر فرا- برآورد) است. تورما و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرده‌اند که فرا- برآورد قابل ملاحظه بارندگی به‌ویژه در زمستان ممکن است به دلیل عدم قطعیت‌های موجود در مشاهدات، افزایش یافته باشد (۳۸).



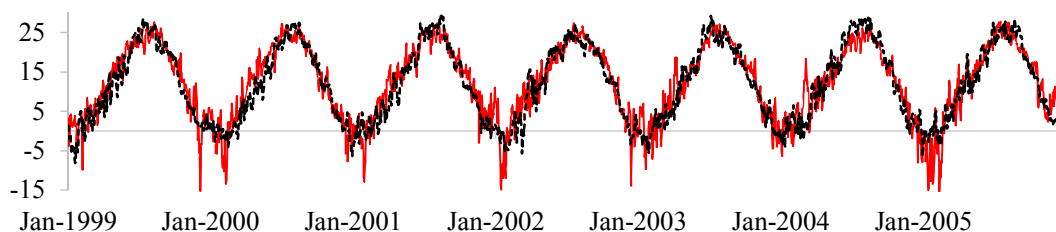
شکل ۲- مقایسه بارندگی روزانه ( $\text{mm day}^{-1}$ ) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 و مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۰۵)، نمودارهای (الف) تا (ج) به ترتیب نشان‌دهنده ایستگاه‌های ۱ تا ۶، خطوط پیوسته مقادیر مشاهداتی و خط‌چین‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده هستند.

Figure 2. Comparison of observed and simulated daily precipitation ( $\text{mm day}^{-1}$ ) in the reference period (1999-2005), charts (A) to (F) are related to stations 1-6 respectively, Continuous and dashed lines represent observed and simulated values respectively.

تورما و همکاران (۲۰۱۱) صحت‌سنجی سومین نسخه RegCM را در حوضه کارپتین و نواحی اطراف آن ارایه کردند؛ آنان حصول ضرایب همبستگی ۰/۹ و ۰/۶ به ترتیب برای دما و بارندگی در مقیاس‌های زمانی کوتاه را نشان‌دهنده وجود همبستگی بالا بین شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات دانسته‌اند (۳۸).

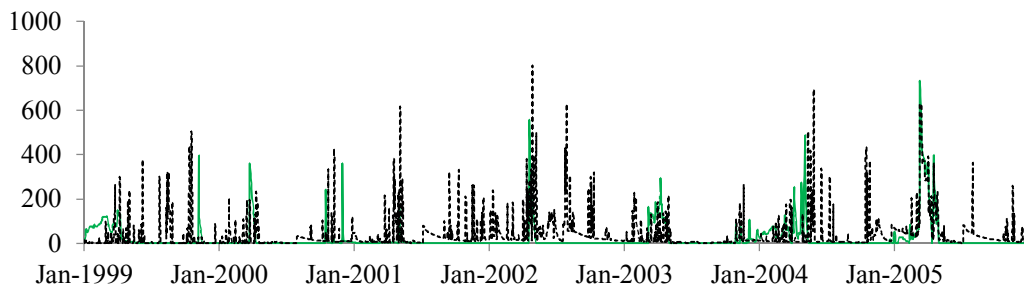
شکل ۴ رواناب روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه کارخانه را نشان می‌دهد که شبیه‌سازی‌ها و مشاهدات در زمان‌های وقوع حداقل و حداکثر رواناب دارای تطابق نسبی هستند، همچنین با توجه به ضریب کارایی ۰/۲ و ضریب همبستگی ۰/۶۵، عملکرد مدل در برآورد رواناب روزانه نسبتاً مناسب است (جدول ۲). آشفته و بزرگ‌حداد (۲۰۱۵) رواناب را با معرفی خروجی‌های مدل‌های AOGCM در مدل هیدرولوژیکی IHACRES شبیه‌سازی نمودند، آنان اشاره کردند که نتایج صحت‌سنجی مدل بیانگر ضریب همبستگی ۰/۸۲ و عملکرد قابل‌قبول این مدل در شبیه‌سازی رواناب است (۳).

میانگین دمای روزانه شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی تنها در ایستگاه ۶ (ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان) مقایسه می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. بررسی شکل ۳ بیانگر بیش‌ترین اختلاف‌ها (عموماً به شکل فرا- برآورد) در برآورد دمای مدل در ماه‌های سرد سال (دسامبر تا مارس) است، در حالی‌که در ماه‌های مه و آوریل دما کم‌تر برآورد می‌شود. ضرایب کارایی و همبستگی دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهدات، مقادیر بالایی در ایستگاه ۶ (به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۹۱) دارد (جدول ۲). اریبی مدل بیانگر فرو- برآورد نسبتاً کوچکی (۰/۳۹- میلی‌متر) از دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل است و میانگین مطلق خطا و مجذور مربعات میانگین خطاها نیز کوچک است (۲/۹۷ و ۳/۹ میلی‌متر). با توجه به بررسی ضرایب عملکرد مدل در برآورد دما، مدل RegCM به خوبی توانسته است دما را برآورد کند.



شکل ۱- مقایسه دمای متوسط روزانه (°C) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 و مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۰۵) در ایستگاه ۶، خطوط پیوسته مقادیر مشاهداتی و خط چین‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده هستند.

Figure 3. Comparison of observed and simulated daily mean temperature (°C) in the reference period (1999-2005) for station 6. Continuous and dashed lines represent observed and simulated values respectively.



شکل ۲- مقایسه رواناب روزانه ( $1000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 و مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۰۵) در ایستگاه آب‌سنجی کارخانه، خطوط پیوسته مقادیر مشاهداتی و خط‌چین‌ها مقادیر شبیه‌سازی شده هستند.

Figure 4. Comparison of observed and simulated daily runoff ( $1000 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ ) in the reference period (1999-2005) for the hydrometry station (Karkhaneh). Continuous and dashed lines represent observed and simulated values respectively.

جدول ۲- ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی بارندگی، دما و رواناب توسط مدل RegCM-CLM4.5 در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۰۵).

Table 2. Model verification results for precipitation, temperature and runoff in the reference period (1999-2005).

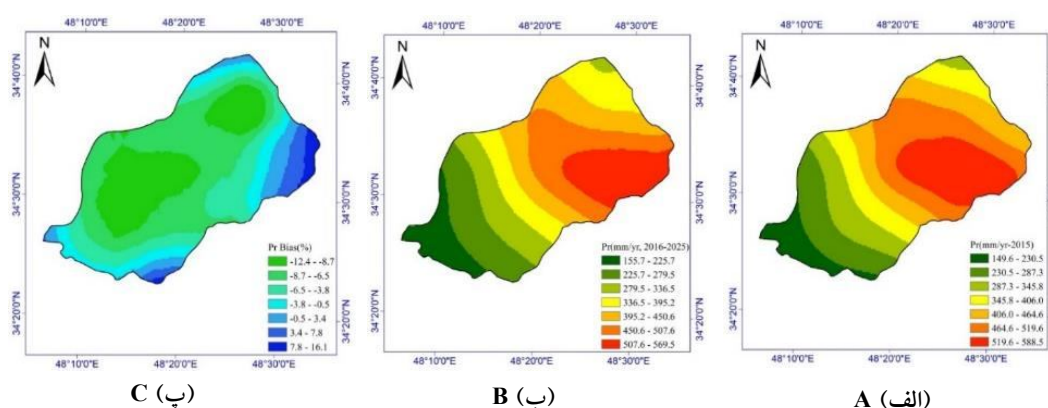
رواناب ( $\text{m}^3$ ) Runoff ( $\text{m}^3$ )	دما ( $^{\circ}\text{C}$ ) Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	بارندگی (mm) Precipitation (mm)							متغیر مورد بررسی Variable
									ایستگاه Station
7	6	6	5	4	3	2	1		
0.20	0.83	0.26	0.61	0.71	0.81	0.85	0.84		ضریب کارایی مدل (Modeling efficiency)
0.65	0.91	0.75	0.84	0.82	0.86	0.88	0.87		ضریب همبستگی (Correlation coefficient)
18636.49	-0.39	0.86	0.54	0.51	0.42	0.07	0.22		اریبی مدل (Model bias)
40643.17	2.97	1.05	0.72	0.68	0.54	0.27	0.44		میانگین مطلق خطا (Mean Absolute Error)
78611.04	3.91	2.62	2.03	1.55	1.21	0.79	0.99		مجذور میانگین مربعات خطا (Root Mean Squared Error)

توزیع مکانی بارندگی، تبخیر- تعرق و رواناب برای سال ۲۰۱۵، میانگین دوره چشم‌انداز (۲۰۱۶-۲۰۲۵) و اختلاف آن‌ها نیز به ترتیب در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ ملاحظه می‌شود بیش‌ترین مقادیر بارندگی در بخش‌های شرقی و مرکزی دشت و کم‌ترین مقادیر آن در بخش‌های جنوب‌غربی رخ می‌دهد. بر اساس نقشه

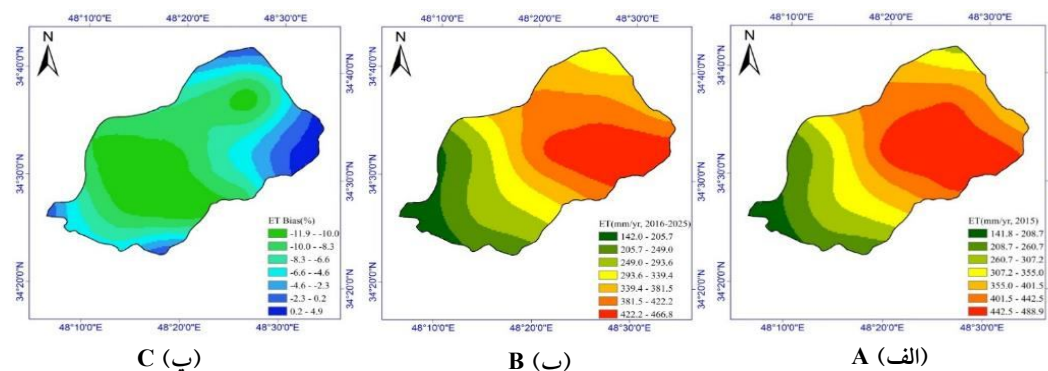
بررسی توازن آب سطحی در دوره چشم‌انداز (۲۰۱۶-۲۰۲۵): این بخش به بررسی اختلاف مؤلفه‌های توازن آب سطحی شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM جفت‌شده با طرحواره سطح CLM4.5 در دوره ۱۰ ساله ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۵ میلادی و داده‌های مشاهداتی سال ۲۰۱۵ می‌پردازد و هم‌چنین توازن آب سطحی مدل نیز بررسی می‌شود. هم‌چنین

افزایش (کاهش) بارندگی، به دلیل افزایش (کاهش) رطوبت در دسترس برای تبخیر، تبخیر- تعرق نیز افزایش (کاهش) را نشان می‌دهد (شکل ۶- پ و ۵- پ). مقایسه تبخیر- تعرق در دوره چشم‌انداز و سال ۲۰۱۵ بیانگر افزایش تبخیر- تعرق در اکثر نواحی دشت، به جز نواحی کوچکی در شمال و شرق می‌باشد، به طوری که بیش‌ترین کاهش در شمال و در مرکز دشت (۱۱٪ کاهش) قرار دارد (شکل ۶- پ).

اختلاف بارندگی (۵- پ) در اکثر دشت، به استثنای بخش کوچکی از شرق و جنوب دشت، شاهد کاهش بارندگی در دوره ۱۰ ساله نسبت به سال ۲۰۱۵ هستیم، به طوری که بیش‌ترین کاهش نیز در بخش شمال‌شرقی و مرکزی دشت (حدود ۱۲٪ کاهش) رخ می‌دهد. الگوی توزیع مکانی تبخیر- تعرق شبیه‌سازی شده در دوره چشم‌انداز (شکل ۶- الف) کاملاً مشابه بارندگی (شکل ۵- الف) است، به طوری که در نواحی



شکل ۵- بارندگی سالانه سال ۲۰۱۵ (الف)، میانگین بارندگی سالانه دوره چشم‌انداز (۲۰۱۶-۲۰۲۵) (ب) و اختلاف بارندگی سالانه در دوره چشم‌انداز و ۲۰۱۵ (پ) (٪) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 با سناریوی RCP4.5 در حوضه دشت تویسرکان.  
Figure 5. Yearly precipitation for 2015 (A), Average yearly precipitation for the projection period (2016-2025) (mm year<sup>-1</sup>) (B) and Precipitation bias (%) (C) in Toysekan plain.

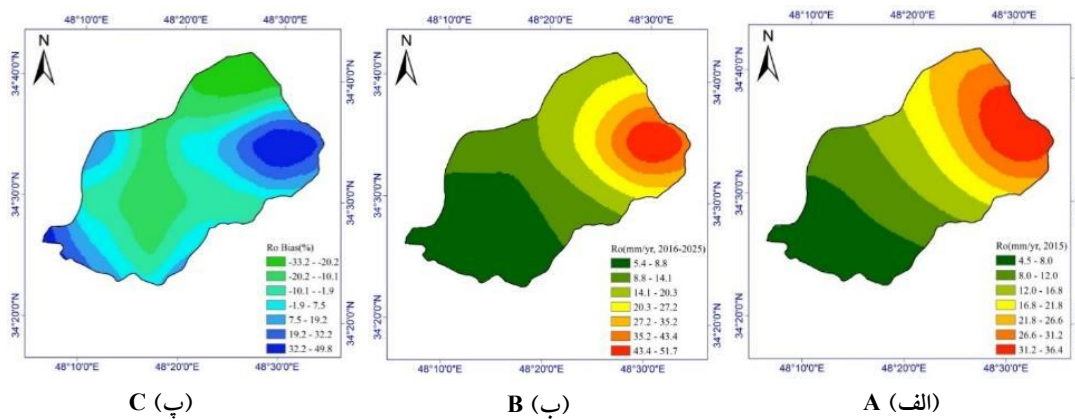


شکل ۶- تبخیر- تعرق سالانه برای سال ۲۰۱۵ (الف)، میانگین تبخیر- تعرق سالانه دوره چشم‌انداز (۲۰۱۶-۲۰۲۵) (ب) و اختلاف تبخیر- تعرق سالانه در دوره چشم‌انداز و ۲۰۱۵ (پ) (٪) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 با سناریوی RCP4.5 در حوضه دشت تویسرکان.  
Figure 6. Yearly evapotranspiration for 2015 (A), Average yearly evapotranspiration for the projection period (2016-2025) (mm year<sup>-1</sup>) (B) and Evapotranspiration bias (%) (C) in Toysekan plain.



رواناب دوره چشم‌انداز با سال ۲۰۱۵ نشان‌دهنده افزایش حدود ۳۰ تا ۵۰ درصدی رواناب در بخش شرقی و کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی در بخش مرکزی دشت است (شکل ۷-پ).

بررسی توزیع مکانی رواناب در دوره چشم‌انداز (شکل ۷-الف) نشان‌دهنده بیش‌ترین مقادیر رواناب در نواحی شرق و شمال‌شرق (بخش مرتفع دشت) است که هماهنگ با نواحی افزایش بارندگی (شکل ۵-الف) است. الگوی تغییرات مکانی اختلاف



شکل ۴- رواناب سالانه برای سال ۲۰۱۵ (الف)، میانگین رواناب سالانه دوره چشم‌انداز (۲۰۱۶-۲۰۲۵) ( $\text{mm year}^{-1}$ ) (ب) و اختلاف رواناب سالانه در دوره چشم‌انداز و ۲۰۱۵ (%) (پ) شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 با سناریوی RCP4.5 در حوضه دشت توپسرکان.

**Figure 7. Yearly runoff for 2015 (A), Average yearly runoff for the projection period (2016-2025) ( $\text{mm year}^{-1}$ ) (B) and Runoff bias (%) (C) in Toysekan plain.**

آخر جدول ۳ سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ بالاترین مقادیر اختلاف وجود دارند که بیانگر عدم برقراری توازن میان مؤلفه‌های آبی در این سال‌هاست. توازن آبی در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ برقرار است، به طوری که مقادیر آن کم‌تر از ۱ میلی‌متر در سال است. بقیه سال‌ها نیز اختلاف‌ها در برقراری توازن آب چشمگیر نیست و می‌توان گفت، با توجه به مساحت کوچک حوضه، بیلان آبی به خوبی برآورد شده است. متوسط اختلاف ۱/۳ میلی‌متر در بازه ۱۰ ساله نشان می‌دهد که عملکرد مدل در برآورد توازن آبی در بلندمدت نسبتاً مطلوب است.

توازن آب سطحی به این شکل تعریف می‌شود که مقدار کل بارندگی به تبخیر-تعرق، رواناب، تغذیه آب زیرزمینی و تغییر در مجموع ذخیره محتوای رطوبتی بخش غیراشباع خاک تقسیم می‌شود (رابطه ۱۳). مؤلفه‌های بیلان آب به صورت سالانه در دوره چشم‌انداز در جدول ۳ آورده شده‌اند.

طبق رابطه ۱۳ در صورت برقراری توازن آبی باید مقدار اختلاف طرفین رابطه (ستون آخر در جدول ۳) برابر یا نزدیک به صفر باشد. مقادیر منفی ستون آخر جدول ۳ نشان‌دهنده کمبود در آب سطحی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده مازاد آب هستند. بر اساس ستون

جدول ۳- مؤلفه‌های بیلان آب شبیه‌سازی شده توسط مدل RegCM4-CLM4.5 با سناریوی RCP4.5 در محدوده حوضه دشت تویسرکان (mm year<sup>-1</sup>).

**Table 3. RegCM4-CLM4.5 simulated water budget components in Toysekan plain (mm year<sup>-1</sup>).**

(Pr-ET-Ro)-(ΔS+Gr)	تغییر در ذخیره رطوبتی غیراشباع خاک ΔS	تغذیه آب زیرزمینی Gr	Pr-ET-Ro	رواناب Ro	تبخیر- تعرق ET	بارندگی Pr	سال year
-3.46	102.90	0.05	99.49	22.03	377.87	499.39	2016
-10.62	109.82	41.98	141.18	26.43	414.05	581.65	2017
5.41	-51.48	-5.08	-51.15	12.40	275.41	236.66	2018
0.79	4.64	-0.97	4.45	22.25	432.17	458.87	2019
-0.60	45.32	31.93	76.66	27.82	392.98	497.46	2020
-4.64	-29.50	-12.23	-46.37	18.02	362.51	334.16	2021
3.06	-26.26	-27.20	-50.41	7.49	186.81	143.89	2022
21.49	2.54	-18.85	5.18	17.80	345.21	368.19	2023
-28.43	99.16	13.94	84.67	23.59	362.92	471.19	2024
3.99	-22.02	-6.79	-24.82	18.35	354.56	348.09	2025
-1.30	23.51	1.68	23.89	19.62	350.45	393.95	میانگین average

### نتیجه‌گیری کلی

مقایسه بارندگی شبیه‌سازی شده توسط مدل و مشاهدات در دوره پایه، نشان از عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی بارندگی در مقیاس زمانی روزانه، به دلیل ضرایب کارایی و همبستگی مناسب و نیز خطاهای کوچک دارد. از دلایل اختلاف بارندگی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌توان به خطاهای پارامتره کردن بارندگی به دلیل پیچیدگی در مدل کردن آن و خطا در داده‌های ورودی مدل (خروجی مدل گردش کلی) اشاره کرد. هر چند که در این پژوهش نیز، کوتاه بودن دوره پایه (به دلیل در دسترس نبودن داده‌های بیش‌تر جهت اجرای مدل) در ارزیابی مدل خود می‌تواند منشا خطای دیگری باشد. مدل در دوره پایه در مقیاس روزانه، به دلیل کارایی مثبت، ضریب همبستگی مناسب و خطاهای نسبتاً کوچک، برآورد مناسبی از رواناب دارد. همچنین با توجه به انطباق نسبی سری مشاهداتی رواناب و شبیه‌سازی شده توسط

مدل به‌ویژه در زمان‌های حداقل و حداکثر رواناب در مقیاس روزانه می‌توان نتیجه گرفت پارامتره‌سازی زیر- شبکه‌ای رواناب به شکل نسبتاً مناسبی در برآورد رواناب عمل کرده است. صحت‌سنجی مدل در برآورد میانگین دما در دوره پایه نشان از شبیه‌سازی خوب مدل در مقیاس زمانی روزانه، به دلیل ضریب کارایی مثبت و بالا دارد. همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره شد، نتایج کار سایر پژوهشگران نیز نشان‌دهنده اختلاف‌های کوچک در دما است، در حالی که بارندگی اختلاف‌های محسوسی، به دلیل فرا- برآورد ناشی از عدم قطعیت‌های موجود در مشاهدات (۳۸) و یا فرو- برآورد بارش (۳۰) دارد.

بررسی توازن آب سطحی نیز نشان می‌دهد که در ۷ سال توازن نسبی برقرار بوده و در ۳ سال باقی‌مانده (۲۰۱۷، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴) اختلاف‌های محسوسی وجود دارد. با توجه به مساحت کوچک حوضه و دوره زمانی کوتاه چشم‌انداز که در آن آثار تغییر اقلیم قابل

سطح زمین هم وابسته است؛ بنابراین انتخاب اندیشمندان یک طرحواره پارامترسازی سطح زمین توسط گروه‌های مدل‌سازی اقلیمی برای پیش‌بینی متغیرهایی مانند تبخیر و رواناب مهم است (۲۲). به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت علی‌رغم بهبود طرحواره‌های سطح و پیچیده‌تر شدن پارامترسازی آن‌ها، هنوز هم مدل‌ها در برآورد بودجه آبی، به‌ویژه رواناب، دارای ضعف هستند، هر چند که توازن بیلان آب سطحی در درازمدت بهبود یافته است. هم‌چنین عملکرد مناسب مدل در برآورد دما، نشان از برآورد مناسب بخش بودجه انرژی طرحواره‌های سطح دارد.

تشخیص نیست حصول مقدار متوسط  $1/3$  میلی‌متر اختلاف در معادله بیلان برای این دوره ۱۰ ساله می‌تواند بیانگر عملکرد مطلوب مدل در برقراری توازن آبی حوضه باشد. ایران‌نژاد و هندرسون سلرز (۲۰۰۷) مؤلفه‌های بیلان آبی شبیه‌سازی شده توسط ۲۰ مدل گردش جهانی جوی مشارکت‌کننده در فاز دوم پروژه هم‌سنجی مدل‌های اتمسفری<sup>۱</sup> را به‌صورت جهانی و هم‌چنین در ۷ حوضه آزمایش چرخه جهانی آب و انرژی بررسی کردند. آنان نتیجه گرفتند که شبیه‌سازی بیلان آب سطحی در حوضه‌های اصلی، علاوه بر بارندگی شبیه‌سازی شده به نوع طرحواره

#### منابع

1. Akhavan, S., Ghabaei Sough, M., and Mosaedi, A. 2015. Investigation of the effect of climate change on net irrigation requirement of main crops of Hamadan-Bahar plain using LARS-WG downscaling model. *J. Water Soil Cons.* 22: 4. 25-46. (In Persian)
2. Anthes, R.A., Hsie, E.Y., and Kuo, Y.H. 1987. Description of the Penn State/NCAR Mesoscale Model Version 4 (MM4). National Center for Atmospheric Research technical note TN-282 + STR. Boulder-Colorado.
3. Ashofteh, P.S., and Bozorg Haddad, O. 2015. A new approach for performance evaluation of AOGCM models in simulating runoff. *J. Water Soil Cons.* 22: 2. 95-110. (In Persian)
4. Bazrafshan, J., Hejabi, S., and Hashemi Nasab, A. 2015. Future Climate Change Impact on Drought Classes Transition Probabilities in Extreme Climates of Iran (Case study: Bandar Anzali and Bushehr Stations). *J. Water Soil Cons.* 22: 1. 131-150. (In Persian)
5. Beven, K.J., and Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin.* 24: 1. 43-69. doi: 10.1080/02626667909491834.
6. Collins, W.J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C.D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S. 2011. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. *Geoscientific Model Development.* 4: 4. 1051-1075. doi: 10.5194/gmd-4-1051-2011.
7. Cox, P.M., Betts, R.A., Bunton, C.B., Essery, R.L.H., Rowntree, P.R., and Smith, J. 1999. The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics.* 15: 3. 183-203.
8. Dehghan, Z., Kouchakzadeh, M., and Alikhasi, M. 2014. Vulnerability of irrigation networks under climate change with optimum cultivation in limited water resources and implementation strategies. *J. Water Soil Cons.* 21: 1. 23-43. (In Persian)
9. Dickinson, R.E., Henderson-Sellers, A., and Kennedy, P.J. 1993. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. National Center for Atmospheric Research Technical Note. Boulder-Colorado.

10. Diro, G.T., Rauscher, S.A., Giorgi, F., and Tompkins, A.M. 2012. Sensitivity of seasonal climate and diurnal precipitation over Central America to land and sea surface schemes in RegCM4. *Climate Research*, 31p.
11. Emanuel, K.A. 1991. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atm. Sci.* 48: 21. 2313-2335.
12. Fuentes-Franco, R., Coppola, E., Giorgi, F., Graef, F., and Pavia, E.G. 2014. Assessment of RegCM4 simulated inter-annual variability and daily-scale statistics of temperature and precipitation over Mexico. *Climate Dynamics*. 42: 3-4. 629-647.
13. Garratt, J.R. 1993. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments-A review. *J. Clim.* 6: 3. 419-448.
14. Giorgi, F., Marinucci, M.R., Bates, G.T., and De Canio, G. 1993. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective Processes and Assimilation of Lateral Boundary Conditions. *Monthly Weather Review*. 121: 10. 2814-2832.
15. Giorgi, F., Bi, X., and Pal, J. 2004. Mean interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Climate Dynamics*. 23: 7-8. 839-58.
16. Giorgi, F., Coppola, E., Solmon, F., Mariotti, L., Sylla, M.B., Bi, X., Elguindi, N., Diro, G.T., Nair, V., Giuliani, G., Turuncoglu, U.U., Cozzini, S., Güttler, I., O'Brien, T.A., Tawfik, A.B., Shalaby, A., Zakey, A.S., Steiner, A.L., Stordal, F., Sloan, L.C., and Brankovic, C. 2012. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Climate Research*. 52: 7-29. doi: 10.3354/cr01018.
17. Grell, G.A. 1993. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations. *Mon. Wea. Rev.* 121: 764-787.
18. Grell, G.A., Dudhia, J., and Stauffer, D.R. 1994. Description of the fifth generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), National Center for Atmospheric Research. Boulder-Colorado.
19. Halder, S., Dirmeyer, P.A., and Saha, S.K. 2015. Sensitivity of the mean and variability of Indian summer monsoon to land surface schemes in RegCM4: Understanding coupled land-atmosphere feedbacks. *J. Geophys. Res. Atm.* 120: 18. 9437-9458.
20. Holtslag, A.A.M., de Bruijn, E.I.F., and Pan, H.L. 1990. A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.* 118: 1561-1575.
21. IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
22. Irannejad, P., and Henderson-Sellers, A. 2007. Evaluation of AMIP II Global Climate Model Simulations of the Land Surface Water Budget and Its Components over the GEWEX-CEOP Regions. *J. Hydrometeorol.* 8: 3. 304-326.
23. Kang, S., Im, E.S., and Ahn, J.B. 2014. The impact of two land-surface schemes on the characteristics of summer precipitation over East Asia from the RegCM4 simulations. *Inter. J. Climatol.* 34: 15. 3986-3997.
24. Ke, Y., Leung, L.R., Huang, M., Coleman, A.M., Li, H., and Wigmosta, M.S. 2012. Development of high resolution land surface parameters for the Community Land Model. *Geoscientific Model Development*. 5: 6. 1341-1362.
25. Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Breigleb, B., Williamson, D., and Rasch, P. 1996. Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3). National Center for Atmospheric Research technote NCAR/TN-420 + STR. Boulder-Colorado.
26. Malmir, M., Mohamadrezapour, O., Sharifazari, S., and Ghandehari, Gh. 2016. The effect of climate change on stream flow used Statistical downscaling of HADCM3 model and Artificial Neural Networks. *J. Water Soil Cons.* 23: 3. 317-326. (In Persian)
27. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 3. 282-290.

28. Niu, G.Y., Yang, Z.L., Dickinson, R.E., and Gulden, L.E. 2005. A simple TOPMODEL-based runoff parameterization (SIMTOP) for use in global climate models. *J. Geophys. Res.* 110: D21. doi: 10.1029/2005jd006111.
29. Office of Water Resources Research. 2009. Justificative report on extending the ban on development of water resources in Toyserkan plain. Ministry of Energy, Iranian Water Resources Management Company, Regional Water Company of Hamedan. (In Persian)
30. Oh, S.G., Park, J.H., Lee, S.H., and Suh, M.S. 2014. Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. *J. Geophys. Res. Atm.* 119: 6. 2913-2927. doi: 10.1002/2013jd020693.
31. Oleson, K.W., Niu, G.Y., Yang, Z.L., Lawrence, D.M., Thornton, P.E., Lawrence, P.J., Stöckli, R., Dickinson, R.E., Bonan, G.B., Levis, S., Dai, A., and Qian, T. 2008. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *J. Geophys. Res.* 113: G1. doi: 10.1029/2007jg000563.
32. Oleson, K.W., Lawrence, D.M., Bonan, G.B., Flanner, M.G., Kluzek, E., Lawrence, P.J., Levis, S., Swenson, S.C., and Thornton, P.E. 2010. Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM). National Center for Atmospheric Research Technical Note. Boulder-Colorado.
33. Oleson, K.W., Lawrence, D.M., Bonan, G.B., Drewniak, B., Huang, M., Koven, C.D., Levis, S., Li, F., Riley, W.J., Subin, Z.M., Swenson, S.C., and Thornton, P.E. 2013. Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM). National Center for Atmospheric Research Technical Note. Boulder-Colorado.
34. Pal, J.S., Small, E.E., and Eltahir, E.A.B. 2000. Simulation of regional scale water and energy budgets: representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J. Geophys. Res.* 105: D24. 29579-29594. doi:10.1029/2000JD900415.
35. Swenson, S.C., and Lawrence, D.M. 2012. A new fractional snow-covered area parameterization for the Community Land Model and its effect on the surface energy balance. *J. Geophys. Res. Atm.* 117: D21. D21107. doi: 10.1029/2012JD018178.
36. Tiedtke, M. 1989. A comprehensive mass-flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.* 117: 1779-1800.
37. Tiwari, P.R., Kar, S.C., Mohanty, U.C., Dey, S., Sinha, P., Raju, P.V.S., and Shekhar, M.S. 2015. The role of land surface schemes in the regional climate model (RegCM) for seasonal scale simulations over Western Himalaya. *Atmósfera.* 28: 2. 129-142.
38. Torma, C., Coppola, E., Giorgi, F., Bartholy, J., and Pongrácz, R. 2011. Validation of a High-Resolution Version of the Regional Climate Model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeorol.* 12: 1. 84-100. doi: 10.1175/2010jhm1234.1.
39. Roosmalen, L., Christensen, J.H., Butts, M.B., Jensen, K.H., and Refsgaard, J.C. 2010. An intercomparison of regional climate model data for hydrological impact studies in Denmark. *J. Hydrol.* 380: 3-4. 406-419. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.014.
40. Von Storch, H. 1995. Inconsistencies at the interface of climate impact studies and global climate research. *Meteorologische Zeitschrift.* 4: 2. 72-80.
41. Wang, X., Yang, M., and Pang, G. 2015. Influences of Two Land-Surface Schemes on RegCM4 Precipitation Simulations over the Tibetan Plateau. *Advances in Meteorology.* 1-12. doi: 10.1155/2015/106891.
42. Xue-Jie, G., Mei-Li, W., and Giorgi, F. 2013. Climate change over China in the 21<sup>st</sup> century as simulated by BCC\_CSM1. 1-RegCM4.0. *Atmospheric and Oceanic Science Letters.* 6: 5. 381-6.
43. Xue, Y., Janjic, Z., Dudhia, J., Vasic, R., and De Sales, F. 2014. A review on regional dynamical downscaling in intraseasonal to seasonal simulation/prediction and major factors that affect downscaling ability. *Atmospheric Research.* 147-148. 68-85. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.05.001.

44. Yu, Y., Xie, Z., and Zeng, X. 2014. Impacts of modified Richards equation on RegCM4 regional climate modeling over East Asia. *J. Geophys. Res. Atm.* 119: 22. 12642-12659.
45. Zahabioun, B. 2002. Climate change impacts on water resources. Ministry of Energy- Iranian National Committee on Large Dams, No. 49. (In Persian)
46. Zorita, E., and Von Storch, H. 1999. The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *J. Clim.* 12: 8. 2474-2489.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 24(5), 2018*  
<http://jwsc.gau.ac.ir>

## **Evaluation of RegCM4 Regional Climate Model simulations for the land surface water budget components (A case study in Toyserkan plain, Hamedan province)**

**\*A. Taheri Tizro<sup>1</sup>, M. Khodamoradpour<sup>2</sup> and M.J. Mashhadian<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Associate Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,

<sup>2</sup>Assistant Prof., Dept. of Water Science and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran,

<sup>3</sup>M.Sc. Graduate, Dept. of Water Resources Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Received: 08/19/2016; Accepted: 12/30/2017

### **Abstract**

**Background and Objectives:** In regional and local climate studies usually coarse-resolution outputs of global climate models are downscaled to produce necessary fine scale data. Regional climate modeling is a dynamical downscaling method. In this study HadGEM2 general circulation model outputs have been downscaled by RegCM4 Regional Climate Model coupled CLM4.5 land surface scheme. The model was run over Toyserkan plain for a reference period (1999-2005) for model evaluation and a projection period (2015-2025). In the projection period, regarding to the importance of water resources in the study area, water budget components and surface water balance equation have been evaluated.

**Materials and Methods:** For the reference period, daily modeled precipitation, temperature and runoff were compared with observed values at available meteorological stations in the region. Modeling efficiency, correlation coefficient, bias, mean absolute error and root mean squared error statistical indices were used to evaluate model's simulations. Modeled precipitation was compared with observations of 6 available stations in the region, Observed temperatures of the station of Hamedan- Airport were also used for modeled temperature verification; For runoff verification, the only river station at the outlet of the catchment was used. Projections are based on RCP4.5 scenario of the Fifth Assessment Report of Intergovernmental panel on climate change. For the projection period spatiotemporal variations of surface water budget components including precipitation, evapotranspiration and runoff have been studied and water balance equation in the catchment has been evaluated.

**Results:** Model evaluation results showed that the model has its worst performance for runoff, because of low modeling efficiency and relatively large errors while has its best performance in simulating precipitation (especially for the first five stations) and temperature. Finally, the model shows its best performance for temperature and precipitation respectively, regarding to more positive efficiency, higher correlation and smaller errors. For the first year of projection period (2015) the highest values of precipitation occur in eastern and central parts while the lowest values occur in southwestern part of the catchment. Through the next 10 years (2016-2025), precipitation decreases in most parts except small parts in east and south of the catchment. The highest values of precipitation decrease (about %12) also occur in northeastern and central parts. Since the amount of precipitation determines available moisture, spatial distribution and variation of evapotranspiration are same as those for precipitation. The highest values of runoff occur in eastern and northeastern (high elevation) parts and during 2016-2025 a %30-50 increase in eastern part and a %10-20 decrease in central part will occur. Annual water budget evaluation shows that for 7 years there is a water balance, but for the remaining 3 years (2017, 2023 and 2024) differences between two sides of the water balance equation are large.

---

\* Corresponding Author; Email: [attizro@gmail.com](mailto:attizro@gmail.com)

**Conclusion:** Considering small area of the catchment and short time of projection period that does not allow to detect impacts of climate change, small amount of mean 10-year difference between two sides of the equation (1.3 mm) shows that the model performance in estimating water balance for the catchment is acceptable. Generally, although the water balance estimation has been improved, the land surface scheme has shortcomings in water budget parametrization especially for runoff. But regarding to improvement of mean temperature simulation, model has an appropriate performance in simulating the energy budget.

**Keywords:** Verification of climate models, RegCM4 Regional Climate Model, Model evaluation indices, Water balance, CLM4.5 land surface scheme