

## شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رفتار هیدرولوژی حوضه (مطالعه موردی حوضه معرف کسلیان)

هوشنگ خیری<sup>\*۱</sup>

### چکیده

در این پژوهش، شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه معرف کسلیان با استفاده از مدل BROOK90 انجام شد. این مدل، بیلان آب یک منطقه را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل: بارش، بیشینه و کمینه دما، شدت تابش خورشیدی، فشار بخار آب و سرعت باد روزانه است. مدل با داده‌های مربوط به دوره آماری ۱۹۹۲-۱۹۹۷ واسنجی و با داده‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ به روش سعی و خطا اعتبارسنجی شد؛ سپس، داده‌های ورودی مدل برای انعکاس تأثیر تغییرات اقلیمی تغییر داده شدند تا مقادیر مؤلفه‌های بیلان شبیه‌سازی شده از سناریوهای مختلف با مقادیر مشابه آن در حالت اجرای بهینه مقایسه شود. نتایج نشان داد افزایش دما سبب کاهش حجم مؤلفه‌های بیلان و تغییر در نحوه توزیع زمانی آن‌ها می‌شود. افزایش دما با تغییر نوع بارش و تغییر در زمان ذوب برف سبب افزایش پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه و سبب کاهش آب به‌هنگام در فصول زراعی می‌شود. افزایش مقدار بارش، سبب افزایش کلیه مؤلفه‌های بیلان می‌شود که بیشترین افزایش مربوط به مؤلفه رواناب سطحی است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حساسیت مؤلفه‌های رواناب حوضه به تغییرات بارش بیشتر است؛ در صورتی که مؤلفه‌های تبخیر و تعرق به تغییرات دما حساس‌ترند.

**واژه‌های کلیدی:** بیلان آب، سیل‌خیزی، مدل BROOK90، مدل گردش عمومی جو، مدل بارش - رواناب.

ارجاع: خیری ه. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رفتار هیدرولوژی حوضه (مطالعه موردی حوضه معرف کسلیان). مجله پژوهش آب ایران. ۳۳: ۱۱۷-۱۲۷.

۱- استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه دامغان.

\* نویسنده مسئول: [h.khairi@du.ac.ir](mailto:h.khairi@du.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۰۴

## مقدمه

بسیاری از دانشمندان بر اینکه تغییر آب و هوا باعث تغییر در متغیرهای اقلیمی و وقایع حدی می‌شود، توافق نظر دارند. افزایش گازهای گلخانه‌ای در جو باعث تغییر در الگوی بارش و دما می‌شود. تغییر در بارش و دما سبب تغییرات زیادی بر روی چرخه هیدرولوژی می‌شود. امروزه، مدل‌های گردش عمومی جو<sup>۱</sup> (GCMs) قوی‌ترین ابزار برای بررسی آثار تغییر اقلیم در مطالعات هیدرولوژی هستند؛ به طوری که خروجی‌های این مدل‌ها به‌عنوان ورودی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی قرار گرفته و به این ترتیب، آثار تغییر اقلیم بر جریان رودخانه بررسی می‌شود (طائی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین، مدل‌های بیلان آب، به‌عنوان یک ابزار بسیار مفید در ارزیابی خصوصیات هیدرولوژی حوضه‌ها و بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های حوضه‌ها کاربرد دارند و می‌توانند تأثیر تغییرات ایجادشده آب و هوا، شامل میزان بارش، دما و تبخیر و تعرق را بر جریان رودخانه‌ای مورد ارزیابی قرار دهند (کومبالیسر و همکاران، ۲۰۱۰). مدل‌ها براساس پیچیدگی ساختار و نیز مقیاس زمانی به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. براساس ساختار، عموماً مدل‌ها به دو نوع یکپارچه<sup>۲</sup> و توزیعی<sup>۳</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. مدل‌های توزیعی بیشتر قادر به شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌های بزرگاند و نیازمند صرف زمان و تلاش زیادی هستند (هوا و همکاران، ۲۰۱۵). مدل‌های یکپارچه برای حوضه‌های کوچک که تغییرات خصوصیات هیدرولوژی در نقاط مختلف آن زیاد نیست و یا حوضه‌های که داده‌های آن فقط برای یک نقطه ثبت شده باشد، مناسب هستند. در این نوع مدل‌ها، میانگین پارامترها و داده‌ها به‌عنوان اطلاعات ورودی به مدل داده می‌شود. مدل‌های بیلان آب را براساس زمان نیز می‌توان به سه گروه: مدل‌های سالانه، ماهانه و روزانه تقسیم کرد. این مدل‌ها داده‌های ورودی متفاوتی را نیاز دارند؛ ولی خروجی‌های تقریباً مشابهی دارند (وایت و همکاران، ۲۰۱۱). مدل‌های روزانه تأکید بر جنبه‌های دینامیکی فرایندهای هیدرولوژی دارند (ونگ و همکاران، ۲۰۱۱)؛ بنابراین، برای بررسی اثر تغییرات اقلیمی ابزاری مناسب‌اند. طی سالیان گذشته، مطالعات

زیادی در خصوص مدل‌سازی بیلان آب حوضه تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی با استفاده از خروجی‌های GCMs و مدل‌های تغییرات آب و هوایی منطقه‌ای<sup>۴</sup> (RCMs) انجام گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای چیو و همکاران (۱۹۹۵)، عباسپور و همکاران (۲۰۰۹)، طائی سمیرمی و همکاران، (۱۳۹۳)، لاماکووا و همکاران (۲۰۱۴) و لکزائیانپور و همکاران (۱۳۹۵) اشاره کرد. از جمله مدل‌های هیدرولوژی، مدل با ساختار فیزیکی<sup>۵</sup> است که به آمارهای طولانی‌مدت نیاز ندارد (فدرر، ۲۰۱۵) و در حوضه‌های کوچک کشور ما که عمدتاً آمارهای طولانی ثبت‌شده‌ای از آن‌ها وجود ندارد، می‌تواند کاربرد داشته باشد. مدل هیدرولوژی BROOK90، یک مدل یکپارچه با ساختار فیزیکی است. با استفاده از این مدل، مطالعات زیادی در بازه زمانی ۱۹۹۳ تاکنون برای پیش‌بینی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر مؤلفه‌های بیلان آب انجام شد که نمونه‌هایی از آن، شامل تحقیقات نف (۱۹۹۳)، ناصری (۱۹۹۷)، فدرر و همکاران (۲۰۰۳)، کومبالیسر و همکاران (۲۰۱۰)، تهپر (۲۰۱۲)، لاماکووا و همکاران (۲۰۱۴)، خیری (۱۳۷۸) و احمدی‌نژاد (۱۳۸۴) است. در حوضه معرف کسلیان در خصوص شبیه‌سازی رواناب با مدل‌های هیدرولوژی، می‌توان به تحقیقات سعادت و همکاران (۱۳۸۵) اشاره کرد که موضوع آن شبیه‌سازی رواناب و بررسی ارتباط کاربری اراضی با دبی روزانه و بیلان آبی بوده است؛ اما در خصوص مدل‌سازی تأثیر تغییرات اقلیمی بر بیلان آب، در این حوضه که نماینده بخش زیادی از حوضه جنگلی در حاشیه جنوبی دریای خزر است، کار زیادی انجام نشده است؛ از این‌رو، هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی برای بررسی تأثیر تغییرات جهانی آب و هوا بر مؤلفه‌های بیلان آب است که با استفاده از مدل BROOK 90 انجام گرفت.

## مواد و روش‌ها

## خصوصیات منطقه مورد مطالعه

حوضه معرف کسلیان، در قسمت‌های کوهستانی البرز شمالی است با ۶۷ کیلومتر مربع و در عرض جغرافیایی ۵۱° ۵۸' تا ۳۷° ۳۶' شمالی و طول جغرافیایی ۹۱° ۵۳' تا ۴۴° ۱۵' شرقی واقع شده است. این حوضه از شرق

1- General Circulation Models

2- lump model

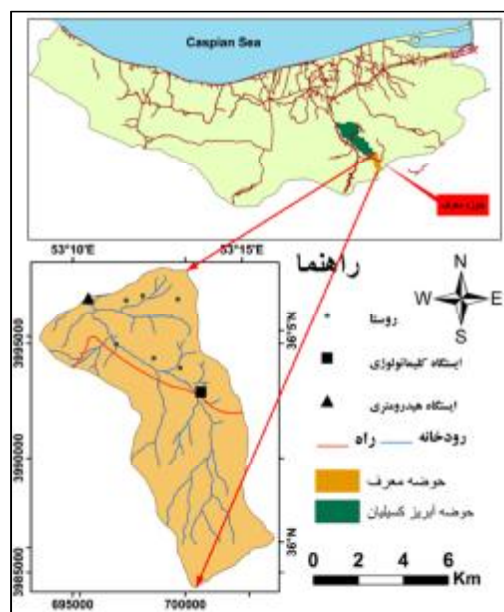
3- Distributed model

4- Regional Climate Models

5- Physically based model

به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند. ورودی‌های مدل شامل: بارش روزانه و یا با فواصل کوتاه‌تر، بیشینه و کمینه دما، شدت تابش خورشیدی، فشار بخار آب و سرعت باد روزانه هستند. این مدل، خاک را به صورت تعدادی از لایه‌های افقی و جریان آب بین لایه‌ها را مرتبط با گرادیان پتانسیل و هدایت هیدرولیکی در نظر می‌گیرد و برای شبیه‌سازی رطوبت خاک از مفاهیم هیدرولیکی استفاده می‌کند. در ساختمان مدل مذکور، می‌توان سه بخش اصلی را مشخص کرد که عبارت‌اند از: بخش تجمع و ذوب برف، بخش موازنه رطوبت خاک و بخش حرکت آب در خاک به سمت نقطه خروجی حوضه (فدرر و همکاران، ۲۰۰۳). این مدل فرایندهای بارش، تبخیر و رواناب را برای یک نقطه و یا یک منطقه کوچک و یکنواخت از حوضه شبیه‌سازی می‌کند. در مدل متوسط مقادیر داده‌ها، برای کل حوضه در نظر گرفته می‌شوند و فرایندهای تبخیر و تعرق، جریان قائم آب در خاک و تولید رواناب، با توجه به لایه‌های مختلف خاک با خصوصیات متفاوت فیزیکی، به‌طور مفصل شبیه‌سازی می‌گردد (خیری، ۱۳۷۸). در ورث و والاس (۱۹۸۵) که اصلاح‌شده روش پنمن-مونتیث است، استفاده می‌شود و در شبیه‌سازی خصوصیات آب و خاک از روش اصلاح‌شده بروک و کوری (۱۹۶۴) و ساکستون و همکاران (۱۹۸۶) استفاده شده است. تجمع و ذوب برف در مدل مبتنی بر فاکتور درجه روز، دما توده برف و محتوای آب موجود در برف است (خیری، ۱۳۷۸). اشکال مختلف ذخایر آبی در مدل، شامل برگاب باران<sup>۲</sup> (INTR)، برگاب برف<sup>۳</sup> (INTS)، برف موجود بر روی زمین (SNOW)، رطوبت خاک در هر یک از لایه‌ها<sup>۴</sup> (SWAT (N<sub>5</sub>)) و آب‌های زیرزمینی<sup>۶</sup> (GWAT) است. آب موجود در زمینه خاک به تبعیت از قانون دارسی-ریچارد به صورت جریان در محیط اشباع یا غیراشباع شبیه‌سازی می‌شود. رواناب از مجموع مؤلفه‌های جریان سطحی<sup>۷</sup> (SRFL)، جریان در جهت شیب<sup>۸</sup> (DSFL)، جریان میان‌بر<sup>۹</sup> (BYFL) و جریان آب

به حوضه رودخانه تجن، از غرب به حوضه تالار، از جنوب به حوضه دزلا و از شمال در امتداد حوضه کسلیان تا روستای ولیک بن محدود می‌شود (شکل ۱). رودخانه اصلی این حوضه، یکی از سرشاخه‌های رودخانه تالار است که از دامنه‌های شمال خاوری کوه گلرد سرچشمه می‌گیرد و به دریای خزر می‌ریزد (تماب، ۱۳۷۶).



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه معرف کسلیان

سازندهای زمین‌شناسی آن عمدتاً مربوط به دوران دوم زمین‌شناسی (ژوراسیک) بوده و رخنمون‌های اندکی از سنگ‌های دوران سوم زمین‌شناسی نیز مشاهده می‌گردد (سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۳۶۹). حدود ۶۵ درصد از مساحت این حوضه پوشیده از جنگل پهن‌برگ است. مقدار متوسط شیب حوضه مورد مطالعه برابر ۱۷/۸ درجه در برای ۷۹ N، متوسط ارتفاع آن ۱۵۷۶ متر و بیشترین و کمترین ارتفاع آن به ترتیب ۲۷۰۰ و ۱۰۰ متر است. ایستگاه هواشناسی سنگده در ارتفاع ۱۳۵۰ متری از سطح دریا، تقریباً در مرکز ثقل حوضه و ایستگاه آب‌سنجی ولیک بن در خروجی حوضه در نزدیکی دهکده ولیک بن واقع شده‌اند.

### مدل BROOK90

مدل هیدرولوژی BROOK90، یک مدل یکپارچه با ساختار فیزیکی<sup>۱</sup> است. این مدل، بیلان آب یک منطقه را

2- Rain interception, mm  
3- snow interception, mm  
4- soil water volume in layer, mm  
5- Layer number  
6- Ground water storage, mm  
7- Source area flow rate, mm/d  
8- Downslope flow rate from layer, mm/d  
9- Bypass flow from layer, mm/d

1- Physically based lump model

تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده با کمک "MAGICC-SCENGEN" استفاده شده است. این محققان شرایط اقلیم ایران را برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۲۵، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ با استفاده از خروجی دو مدل گردش عمومی جو HadCM2 و ECHAM4 و با در نظرگیری ۱۸ سناریوی انتشار، IPCC مدل‌سازی نموده‌اند. براساس بررسی‌های انجام شده، نتایج هر دو مدل بیانگر افزایش دمای تمامی استان‌های کشور در دهه‌های آینده است. این دو مدل تا سال ۲۱۰۰ به‌طور میانگین افزایش دمای ۳ تا ۴ درجه سلسیوس را برای ایران پیش‌بینی کردند. با توجه به نتایج مدل‌سازی مذکور، میزان افزایش تا ۴ درجه سلسیوس در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت؛ ولی نتایج شبیه‌سازی‌شده از بارش در مدل‌های مورد استفاده توسط محققان مختلف متفاوت بوده و در بعضی از مدل‌ها تغییرات کاهشی و در بعضی دیگر تغییرات افزایشی را می‌توان مشاهده کرد (مک‌کراکین و لوتر، ۱۹۸۵؛ عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ طائی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۳؛ یازرلو و همکاران، ۱۳۹۵). از این‌رو، در این تحقیق با احتساب نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده توسط محققان مذکور، برای بارش سناریوهای فرضی از کاهش ۲۰- درصد تا ۲۰+ مطابق جدول ۱ در نظر گرفته شده است. در ضمن، روزهای وقوع بارش، همان روزهای وقوع بارندگی داده‌های ثبت‌شده تاریخی فرض شده است.

### روش مطالعه

یکی از عمومی‌ترین روش‌ها برای تخمین تأثیر تغییرات آب و هوایی در هیدرولوژی، شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب است؛ بنابراین، در این تحقیق از مدل بارش-رواناب روزانه BROOK 90، به این منظور استفاده شده است. این روش، شامل واسنجی مدل تحت شرایط آب و هوایی موجود و کاربرد آن تحت شرایط فرضی آب و هوایی آینده است؛ به این صورت که ابتدا واسنجی مدل با توجه به شرایط آب و هوایی موجود که شامل تعیین مقادیر بهینه پارامترها برای به حداقل رساندن اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده رواناب با مقادیر اندازه‌گیری شده است، به روش سعی و خطا<sup>۹</sup> انجام می‌شود. معیارهای واسنجی در مدل براساس به حداقل رساندن

زیرزمینی<sup>۱</sup> (GWFL) یا جریان پایه تشکیل شده است. در مدل، آبی که توسط نیروی ثقل از لایه‌های فوقانی به آب زیرزمینی زهکشی می‌شود، توسط مؤلفه GWFL به‌صورت یک بخش ثابت از آب زیرزمینی، جریان رودخانه‌ای را به‌طور روزانه تغذیه می‌کند و یک بخش دیگر از خروجی آب زیرزمینی ممکن است به‌صورت نشت به اعماق<sup>۲</sup> (SEEP) در نظر گرفته شود. برای هر گام تکرار در مدل، مقدار ذخایر آب زیرزمینی برای اندازه‌گیری نشت و جریان آب زیرزمینی مورد نیاز است. در شبیه‌سازی آب زیرزمینی مدل BROOK 90 از مفهوم ذخایر خطی اولیه استفاده شده است. مؤلفه‌های تبخیر<sup>۳</sup> (EVAP) در مدل عبارت‌اند از: تبخیر از برگاب باران<sup>۴</sup> (IRVP)، تبخیر از برگاب برف<sup>۵</sup> (ISVP)، تبخیر از رطوبت خاک<sup>۶</sup> (SLVP)، تبخیر از برف<sup>۷</sup> (SNVP) و تعرق ناشی از هر یک از لایه‌های حاوی ریشه گیاه<sup>۸</sup> (TRAN(N)). برای آشنایی با نحوه محاسبه هر یک از پارامترها و کسب اطلاعات مفصل‌تر از مدل، مطالعه کتابچه راهنمای آن (فدرر، ۲۰۱۵) توصیه می‌شود. اطلاعات مربوط به پارامترها در شش گروه از پارامترهای مرتبط به محل مورد مطالعه، پوشش گیاهی، خصوصیات خاک، مؤلفه‌های جریان آب، پارامترهای ثابت و مقادیر اولیه در مدل دسته‌بندی شده است (فدرر، ۲۰۱۵).

### توصیف تغییرات آب و هوایی

یکی از روش‌های بررسی تغییرات بارش و دما، استفاده از داده‌های خروجی GCMs است. ضعف عمده GCMs، قدرت تفکیک فضایی کم و نیز ساده‌سازی‌هایی است که برای فرایندهای اقلیمی در نظر می‌گیرند؛ برای جبران این ضعف، باید خروجی این مدل‌ها برای محدوده ایستگاه هواشناسی کوچک‌مقیاس شود. روش‌های مختلفی برای کوچک‌مقیاس‌نمایی و یا تبدیل خروجی‌های GCMs به متغیرهای سطحی در مقیاس حوضه رودخانه توسعه یافته‌اند (یازرلو و همکاران، ۱۳۹۵). در این تحقیق، برای تهیه سناریوهای تغییرات آب و هوایی از نتایج تحقیق عباسی و همکاران (۱۳۸۹) تحت عنوان "ارزیابی تأثیر

- 1- Source area flow rate, mm/d
- 2- Deep seepage loss from groundwater, mm/d
- 3- Evapotranspiration, mm
- 4- Evaporation rate of intercepted rain, mm/d
- 5- Evaporation rate of intercepted snow, mm/d
- 6- Evaporation rate from soil, mm/d
- 7- Evaporation rate from snowpack, mm/d
- 8- Transpiration rate from layer, mm/d

9- Trial and error

سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ انجام پذیرفت. برای تعیین درستی و نادرستی فرایند واسنجی خروجی گرافیکی رواناب شبیه‌سازی شده (FLOW) با رواناب اندازه‌گیری شده (MESFL) از مدل برای دوره واسنجی و دوره اعتبارسنجی به همراه اندیس‌های آماری مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آماری برای دوره واسنجی و اعتبارسنجی (جدول ۲) مؤید اعتبار فرایند واسنجی است؛ همچنین شکل ۲، نمایشی از خروجی گرافیکی رواناب شبیه‌سازی شده با رواناب اندازه‌گیری شده بخشی از دوره واسنجی (۱۹۹۲-۱۹۹۳) است که مؤید اعتبار اندیس‌های آماری است. بعد از این مرحله، مدل با هر یک از سناریوهای تغییرات آب و هوایی (جدول ۱) اجرا شد و اثر این تغییرات با نتایج شبیه‌سازی مقایسه شد.

### مدل‌سازی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر رفتار هیدرولوژی حوضه

شرایط هیدرولوژی حوضه معرف کسلیان با مقادیر بهینه پارامترها و هر یک از سناریوهای تغییرات آب و هوایی به وسیله مدل شبیه‌سازی شد تا عکس‌العمل مؤلفه‌های بیلان آب، شامل تبخیر و تعرق، رواناب و تغییرات ذخایر رطوبت خاک نسبت به این تغییرات مورد ارزیابی قرار گیرد (جدول ۳).

### مؤلفه‌های تبخیر و تعرق

تغییرات مؤلفه‌های تبخیر و تعرق در شبیه‌سازی با مدل BROOK90 بستگی به چندین پارامتر، از جمله رطوبت خاک و دما دارد (فدرر، ۲۰۱۵). نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بیشینه تبخیر و تعرق در ماه مه و کمینه آن در ماه فوریه اتفاق می‌افتد (شکل ۳). افزایش دما سبب افزایش تبخیر و تعرق در کلیه ماه‌های سال می‌شود؛ به‌استثنای حالتی که در آن با افزایش یک درجه سلسیوس دما در ماه‌های ژانویه و فوریه، کاهش تبخیر و تعرق را در پی داشته است (شکل ۳). این کاهش‌ها طی بعضی از ماه‌های زمستان، در ارتباط با نقش تغییرات پوشش برف و در نتیجه کاهش مؤلفه تبخیر از برف است (شکل ۴)؛ به همین دلیل در ماه‌های مذکور، تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش یا کاهش تبخیر و تعرق در تابستان بر اثر تغییرات دما، بیشتر در ارتباط با تغییرات تبخیر از رطوبت خاک است. میزان تبخیر از برگاب برف

میانگین خطای انحراف<sup>۱</sup> (MBE)، به همراه مقایسه خروجی گرافیکی رواناب شبیه‌سازی شده با منحنی رواناب اندازه‌گیری شده است که با کمک آماره‌های ضریب همبستگی<sup>۲</sup> (R)، ضریب تعیین<sup>۳</sup> (R<sup>2</sup>) و ضریب کارایی<sup>۴</sup> (NES) مورد استفاده قرار گرفتند. بعد از مرحله واسنجی، برای اطمینان از درستی و نادرستی واسنجی، مدل با داده‌های غیر از دوره واسنجی اجرا می‌شود (تعیین اعتبار<sup>۵</sup> مدل). برای اجرای این مهم، از بقیه داده‌های آماده شده استفاده می‌شود و سپس، مقادیر داده‌های ورودی (بارش و دما) تغییر داده می‌شوند (افزایش دما و ضرب کردن مقادیر باران در یک ضریب افزایشده یا کاهشده ثابت) تا تغییرات آب و هوایی را منعکس کنند (جدول ۱). شبیه‌سازی با توجه به داده‌های تغییر داده شده (سناریوهای آب و هوایی) و مقادیر بهینه پارامترها، انجام گرفت و نتایج به‌دست‌آمده با مقادیر داده‌های رواناب موجود مقایسه شد تا تأثیر تغییرات فرضی تخمین زده شود.

جدول ۱- سناریوهای فرضی تغییرات آب و هوایی مورد استفاده در مدل

شماره سناریو	تغییرات	
	مقدار	نوع
Sc <sub>1</sub>	+10 (درصد)	بارش
Sc <sub>2</sub>	-10 (درصد)	بارش
Sc <sub>3</sub>	+20 (درصد)	بارش
Sc <sub>4</sub>	-20 (درصد)	بارش
Sc <sub>5</sub>	+1 °C	دما
Sc <sub>6</sub>	+2 °C	دما
Sc <sub>7</sub>	+4 °C	دما

### نتایج و بحث

#### ارزیابی عملکرد شبیه‌سازی

برای بررسی ارتباط بین پارامترهای مدل و خصوصیات حوضه با مؤلفه‌های بیلان آب، مدل BROOK90 برای حوضه معرف کسلیان به کار گرفته شد. این مدل، تحت شرایط آب و هوایی مربوط به سال‌های ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۷ واسنجی شد و سپس، تعیین اعتبار مدل با داده‌های

1- Mean Bias Error  
2- Correlation Coefficient  
3- Coefficient of Determination  
4- Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient  
5- Validation

افزایش تبخیر و تعرق کل در حوضه می‌شود (شکل ۵). مؤلفه‌های تبخیر و تعرق بیشتر به تغییرات دما حساس‌اند و به تغییرات بارش حساسیت کمتری دارند. افزایش ۲۰ درصدی بارش سبب افزایش ۳/۳ درصدی میزان کل تبخیر و تعرق می‌شود؛ این افزایش بیشتر در مؤلفه‌های تعرق، تبخیر از برگاب باران و تبخیر از برگاب برف مشاهده می‌شود (جدول ۳). نسبت تغییرات بارش با مقدار تبخیر و تعرق کل مستقیم است و به ازای افزایش یا کاهش بارندگی به ترتیب شاهد افزایش و کاهش تبخیر و تعرق خواهیم بود (جدول ۳ و ۴).

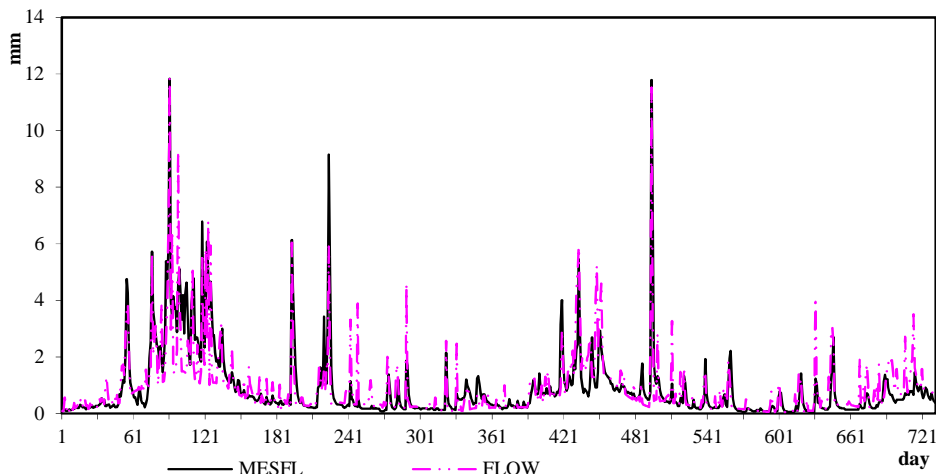
نسبت عکس با تغییرات دما دارد (شکل ۴)؛ علت این موضوع را می‌توان به کنترل مدت زمان بارش برف توسط دما بیان کرد. تبخیر از برگاب باران تغییرات زیادی را در مقابل تغییرات دما از خود نشان نمی‌دهد؛ ولی در ماه‌های اول سال بر اثر افزایش دما جایگزین برگاب برف می‌شود؛ همچنین، افزایش دما سبب تغییر در موقعیت زمانی کمینه و بیشینه تبخیر و تعرق کل می‌شود. به‌طور کلی، افزایش دما سبب کاهش مقدار بعضی از مؤلفه‌های تبخیر و تعرق از جمله تعرق و تبخیر از برگاب برف و تبخیر از برف می‌شود؛ ولی سبب افزایش مقدار مؤلفه‌های تبخیر از خاک و تبخیر از برگاب باران شده که در مجموع سبب

جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی رواناب در حوضه معرف کسپلیان

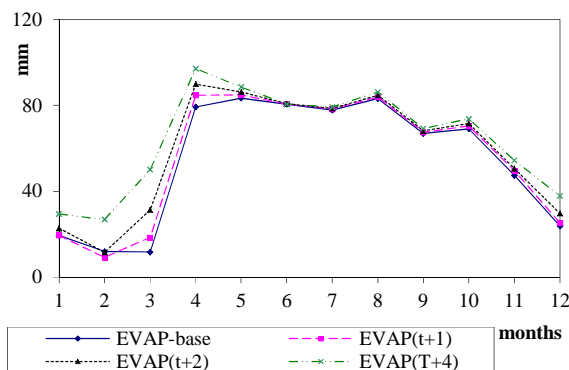
MBE	R	R <sup>2</sup>	رواناب (میلی‌متر)		دوره آماری	مرحله اجرا
			اندازه‌گیری	شبیه‌سازی		
-۰/۰۳۹	۰/۸۴	۰/۷۰۸	۱۴۵۷/۹۳	۱۳۴۸/۳۵	۱۹۹۲-۱۹۹۷	واسنجی
-۰/۰۴۳	۰/۸۱	۰/۶۶۵	۵۹۴/۳۹	۶۵۵/۰۸	۱۹۹۸-۲۰۰۰	اعتبارسنجی
-۰/۰۲۲	۰/۷۶	۰/۵۷۱	۴۳۲۰/۷۸	۴۲۲۴/۷۴	۱۹۹۲-۲۰۱۱	کل دوره

جدول ۳- عکس‌العمل مؤلفه‌های بیلان (میلی‌متر) بر اثر سناریوهای تغییرات باران و دما، شبیه‌سازی شده توسط مدل

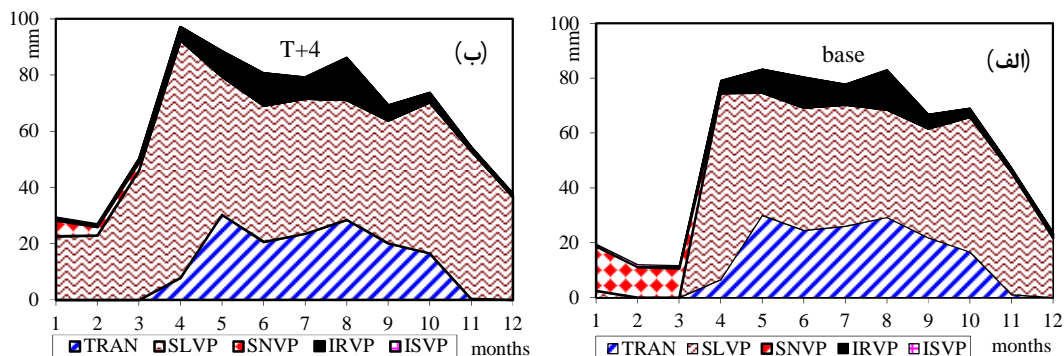
Sc <sub>7</sub>	Sc <sub>6</sub>	Sc <sub>5</sub>	Sc <sub>4</sub>	Sc <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub>	Sc <sub>1</sub>	Base run	سناریو
۱۴۸/۱	۱۵۲/۴	۱۵۴/۱	۱۱۰/۷	۱۷۹/۵	۱۳۶/۱	۱۶۹/۸	۱۵۵/۴	TRAN
۶۰/۵	۵۹	۵۸/۲	۴۹/۵	۶۳/۹	۵۳/۷	۶۰/۷	۵۷/۴	IRVP
۰/۹	۱/۵	۱/۷	۱/۶	۲/۴	۱/۸	۲/۲	۲	ISVP
۱۲/۲	۲۰/۸	۳۱/۹	۳۸/۵	۳۶/۱	۴۰	۳۹	۴۰/۲	SNVP
۵۵۱/۴	۴۷۲	۴۲۶/۳	۴۰۹/۲	۳۸۵/۱	۴۰۳/۷	۳۹۲	۳۹۹/۲	SLVP
۷۳۰	۷۰۵/۷	۶۷۲/۲	۶۰۹/۵	۶۶۷/۱	۶۳۵/۵	۶۶۳/۸	۶۵۴/۲	EVAP
۱۰۲/۴	۱۲۱/۱	۱۳۱/۱	۷۸/۵	۲۲۵/۹	۱۰۵/۷	۱۸۰	۱۳۹/۴	SRFL
۴۵	۵۴/۱	۵۸/۶	۳۳/۹	۹۵/۸	۴۶/۷	۷۸/۳	۶۸/۸	BYFL
۹۱/۱	۱۲۹/۸	۱۵۲/۴	۹۰/۵	۲۳۵/۶	۱۲۴/۷	۱۹۸/۹	۱۶۲/۵	GWFL
۲۳۸/۵	۳۰۵	۳۴۲/۱	۲۰۲/۹	۵۵۷/۳	۲۷۷/۲	۴۵۷/۲	۳۶۳/۶	Total Runoff
۲۳۴/۶	۲۴۵/۲	۲۴۸/۸	۲۲۹/۶	۲۶۲/۳	۲۴۱/۲	۲۷۵/۵	۲۵۱	SWAT



شکل ۲- مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده با رواناب اندازه‌گیری شده در دوره (۱۹۹۲-۹۳)، حوضه مورد مطالعه



شکل ۳- تأثیر تغییرات دما بر مقادیر ماهانه تبخیر و تعرق



شکل ۴- تأثیر تغییرات دما بر روی مقادیر ماهانه مؤلفه‌های تبخیر و تعرق در سناریوهای Base run (الف) و Sc7 (ب)

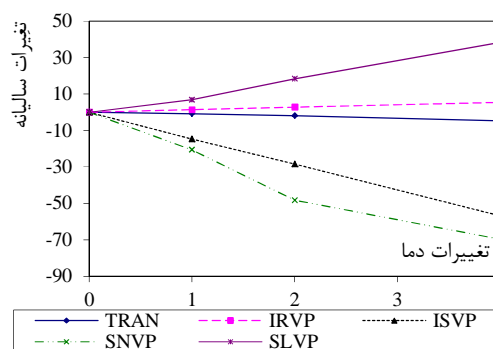
جدول ۴- عکس‌العمل مؤلفه‌های بیلان (درصد) به تغییرات باران و دما

سناریو	Base run	Sc <sub>1</sub>	Sc <sub>2</sub>	Sc <sub>3</sub>	Sc <sub>4</sub>	Sc <sub>5</sub>	Sc <sub>6</sub>	Sc <sub>7</sub>
TRAN	۱۵۵/۴	۹/۳	-۱۲/۴	۱۵/۵	-۲۸/۸	-۰/۹	-۱/۹	-۴/۷
IRVP	۵۷/۴	۵/۹	-۶/۴	۱۱/۴	-۲۸/۸	-۰/۹	-۱/۹	-۴/۷
ISVP	۲	۹/۸	-۱۰/۳	۱۹/۶	-۲۰/۱	-۱۴/۷	-۲۸/۴	-۵۶/۹
SNVP	۴۰/۲	-۳	-۰/۳	-۱۰/۱	-۴/۲	-۲۰/۷	-۴۸/۲	-۶۹/۸

ادامه جدول ۴ -

سناریو	Base run	Sc <sub>1</sub>	Sc <sub>2</sub>	Sc <sub>3</sub>	Sc <sub>4</sub>	Sc <sub>5</sub>	Sc <sub>6</sub>	Sc <sub>7</sub>
SLVP	۳۹۹/۲	-۱/۸	۱/۲	-۳/۵	۲/۵	۶/۸	۱۸/۳	۳۸/۱
EVAP	۶۴۵/۲	۲/۸۸	-۱/۵	۳/۳۹	-۵/۵۳	۴/۱۸	۹/۳۸	۱۳/۱۴
SRFL	۱۳۹/۴	۲۹/۲	-۲۴/۱	۶۲/۱	-۴۳/۷	-۵/۹	-۱۳/۱	-۲۶/۶
BYFL	۶۱/۸	۲۶/۷	-۲۴/۴	۵۵	-۴۵/۱	-۵/۲	-۱۲/۴	-۲۷/۲
GWFL	۱۶۲/۵	۲۲/۴	-۲۳/۲	۴۵	-۴۴/۳	-۶/۲	-۲۰/۱	-۴۳/۹
Total Runoff	۳۶۳/۶	۲۵/۷	-۲۳/۸	۵۳/۳	-۴۴/۲	-۵/۹	-۱۶/۱	-۳۴/۴
SWAT	۲۵۱	-۲۹/۲	-۳۳/۷	-۲۷/۹	-۳۶/۹	-۳۱/۶	-۳۲/۶	-۳۵/۵

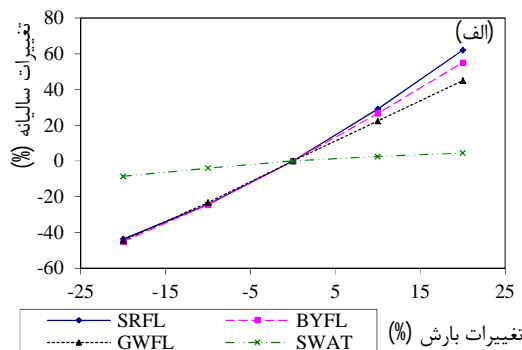
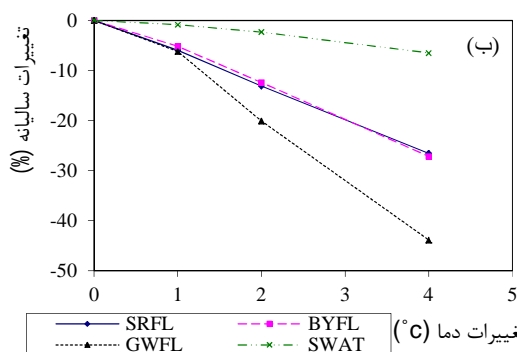
افزایش کلیه مؤلفه‌های آن می‌شود که بیشترین افزایش مربوط به مؤلفه رواناب سطحی است (شکل ۶- الف)؛ علت این مسئله، اشباع شدن خاک از آب و متعاقباً غیرقابل نفوذ شدن آن طی باران‌های شدید است. تأثیر تغییرات دما سبب تغییر در حجم مؤلفه‌های رواناب و نحوه توزیع آن در زمان‌های مختلف است. افزایش دما با میزان کل رواناب حوضه نسبت عکس دارد (شکل ۶- ب)؛ یعنی با افزایش میزان دما، میزان کل رواناب کاهش یافته است. افزایش ۴ درجه سلسیوس سبب کاهش ۳۴/۴ درصد کل رواناب حوضه شده که بیشترین کاهش در مؤلفه GWFL رخ داد (جدول ۴). در حوضه کسلیان رواناب حاصل از ذوب برف، بخش فراوانی از رواناب کل اواخر زمستان و بهار را تشکیل می‌دهد (شکل ۲). قابل پیش‌بینی است که زمان رسیدن به اوج رواناب حاصل از ذوب برف، به تغییرات دما حساس است، افزایش ۴ °C دما سبب کاهش رواناب حاصل از ذوب برف در بهار شده است؛ یعنی زمان ذوب را از ماه‌های فروردین و اردیبهشت به سمت ماه بهمن و اسفند سوق داده است.



شکل ۵- مقایسه درصد تغییرات مؤلفه‌های تبخیر و تعرق (%) به تغییرات دما (°C)

### مؤلفه‌های رواناب

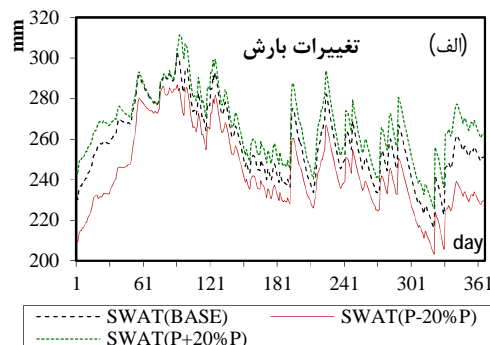
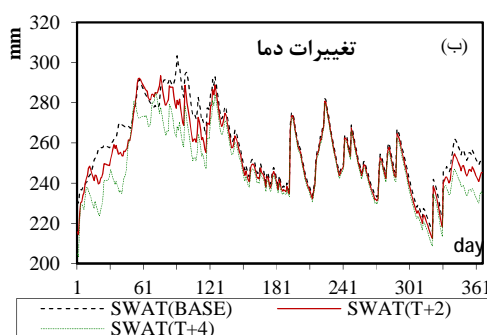
رواناب، به‌عنوان بخشی از معادله بیلان در مدل مورد استفاده، شامل چهار مؤلفه جریان از آب زیرزمینی، جریان در جهت شیب، جریان میانبر و جریان سطحی است (فدرر، ۲۰۱۵). حساسیت مؤلفه‌های رواناب در حوضه مورد مطالعه به تغییرات بارش بیشتر از تغییرات دما است (جدول ۴) و نسبت مستقیم بین تغییرات بارش با میزان تغییرات مؤلفه‌های رواناب وجود دارد (شکل ۴). هر تغییری در رواناب به علت افزایش مقدار بارش، سبب



شکل ۶- تغییرات مؤلفه‌های رواناب و ذخایر رطوبت خاک به تغییرات بارش (الف) و تغییرات دما (ب)



افزایش دما به مقدار  $2^{\circ}\text{C}$  و  $4^{\circ}\text{C}$  سبب کاهش رطوبت خاک در بیشتر ماه‌های سال شد؛ به غیر از بخش‌هایی از ماه‌های بهمن و اسفند که علت آن نیز ذوب بیشتر برف در زمان‌های مذکور است. مقایسه قسمت‌های الف و ب شکل ۷ حاکی از آن است که تغییرات بارش، بیشتر سبب تغییرات در حجم ذخایر رطوبت خاک می‌گردد؛ اما تغییرات دما روی توزیع رطوبت خاک در زمان‌های مختلف مؤثرتر است.



شکل ۷- تأثیر تغییرات بارش (الف) و دما (ب) بر مقادیر روزانه رطوبت

هر تغییری در رواناب به علت افزایش مقدار بارش، سبب افزایش کلیه مؤلفه‌های آن می‌شود که بیشترین افزایش مربوط به مؤلفه رواناب سطحی است، علت این مسئله، اشباع شدن خاک از آب و متعاقباً غیرقابل نفوذ شدن آن طی باران‌های شدید است. همچنین تغییرات بارش، بیشتر سبب تغییرات در حجم ذخایر رطوبت خاک می‌شود؛ اما تغییرات دما روی توزیع رطوبت خاک در زمان‌های مختلف مؤثرتر است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حساسیت مؤلفه‌های رواناب در حوضه مورد مطالعه به تغییرات بارش، بیشتر از تغییرات دما است؛ در صورتی که مؤلفه‌های تبخیر و تعرق به تغییرات دما حساس‌ترند. نتایج شبیه‌سازی مؤید مناسب بودن این مدل برای اهداف پیش‌بینی شده است؛ بنابراین، با توجه به اینکه مدل‌های فیزیکی نیاز به آمارهای طولانی ندارند و در حوضه‌های کوچک کشور عمدتاً آمارهای طولانی ثبت شده‌ای از آن‌ها وجود ندارد، این مدل می‌تواند برای این نوع از حوضه‌ها کاربرد داشته باشد.

## ذخایر رطوبت خاک

بررسی مؤلفه‌های رطوبت خاک نشان می‌دهد که افزایش دما نسبت عکس با میزان رطوبت خاک دارد؛ هر چه دما بیشتر می‌شود، مقدار رطوبت خاک کمتر می‌شود. افزایش دما سبب کاهش  $35/5$  درصد میزان رطوبت خاک شد (جدول ۴). ذخایر رطوبت خاک طی دوره برف تحت تأثیر بیشتر تغییرات دما قرار دارند؛ به طوری که افزایش آن سبب افزایش رطوبت خاک در ماه‌های ذوب برف و سبب کاهش رطوبت خاک در طی ماه‌های دیگر سال می‌شود.

## نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر روی مؤلفه‌های بیلان آب با استفاده از مدل BROOK90 در حوضه معرف کسلیان نشان داد که افزایش دما سبب کاهش مقدار تبخیر و تعرق کل، مؤلفه‌های رواناب، ذخایر رطوبت خاک و تغییر در موقعیت زمانی کمینه و بیشینه تبخیر و تعرق کل شد. تأثیر تغییرات دما سبب تغییر در حجم مؤلفه‌های رواناب و نحوه توزیع آن در زمان‌های مختلف بود. در حوضه معرف کسلیان، رواناب حاصل از ذوب برف بخش فراوانی از رواناب کل اواخر زمستان و اوایل بهار را تشکیل می‌دهد. با توجه به اینکه زمان اوج رواناب حاصل از ذوب برف، به تغییرات دما حساس است، افزایش دما سبب کاهش رواناب حاصل از ذوب برف در بهار شد؛ یعنی زمان ذوب را از بهار به سمت زمستان سوق می‌دهد. با وجود اینکه افزایش دما سبب کاهش مؤلفه‌های بیلان آب می‌شود؛ ولی با تغییر نوع بارش و همچنین تغییر در زمان ذوب برف بر میزان افزایش سیلاب مؤثر است و در واقع، سبب افزایش پتانسیل سیل‌خیزی در حوضه‌ها خواهد شد. همچنین، کاهش آب به‌هنگام برای فصول زراعی از دیگر عواقب گرم شدن هوا در آینده خواهد بود.

## منابع

- پژوهش آب ایران. ۲۱ (۱۰): ۷۵-۸۴.
10. Abbaspour K. C. Faramarzi M. Ghasemi S. S. and Yang H. 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Journal Water resources research*. 45(10): 1-16.
  11. Brooks R. H. and Corey A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media and their relation to drainage design. *Transactions of the ASAE*. 7(1): 26-28.
  12. Chiew F. H. S. Whetton P. H. McMahon T. A. and Pittok A. B. 1995. Simulation of the impacts of climatic change on runoff and soil moisture in stralian catchments. *Journal of hydrology*. 1670:121-147.
  13. Combalicer E. A. Cruz R. V. O. Lee S. and Im S. 2010. Assessing climate change impacts on water balance in the Mount Makiling forest, Philippines. *Journal of earth system science*. 119(3): 265-283.
  14. Federer C. A. 2015. The BROOK90 Hydrologic Model for Evaporation, Soil Water, and Streamflow, USA. Web: <http://www.ecoshift.net/brook/brook90.html>.
  15. Federer C. A. Vörösmarty C. and Fekete B. 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J Hydrometeorology*. 4: 1276-1290.
  16. Hoa X. P. Shamseldin A. Y. and Melville B. W. 2015. Assessment of Climate Change Impact on Water Balance of Forested and Farmed Catchments. *Journal of Hydrologic Engineering*. 20(10): 04015009.
  17. Lamacová A. Hruška J. Krám P. Stuchlik E. Farda A. Chuman T. and Fottová D. 2014. Runoff trends analysis and future projections of hydrologic patterns in small forested catchment. *J. Soil and Water Research*. 9(4): 169-181.
  18. MacCracken M. C. and Luther F. M. eds. 1985. Detecting the climatic effects of increasing carbon dioxide. United States Department of Energy. 198 p.
  19. Nassery H. R. 1997. Simulation of water balance components in hydrogeological distinct areas using SAC-SMA and BROOK 90 models. PHD thesis submitted to Dep Hydrogeology, Faculty of sciences, charls university, prague, czech Repub. 253 p.
  20. Neff W. H. 1993. Performance Evaluation of the BROOK Hydrologic Simulation Models on Small Central Pennsylvania Watersheds. Doctoral dissertation, Pennsylvania State University. 406 p.
  21. Saxton K. E. Rawls W. Romberger J. S. and Papendick R. I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. 50(4): 1031-1036.
۱. احمدی‌نژاد ا. ر. ۱۳۸۴. شبه‌سازی فرآیند بارش - رواناب و مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه آبخیز رودخانه‌ها (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کورکورسر). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ۹۵ ص.
  ۲. تماب. ۱۳۷۶. طرح تجزیه و تحلیل آمار حوضه معرف کسلیان و تعیین شعاع تأثیر آن، جلد سوم، زمین‌شناسی و پوشش گیاهی، تهران. ۱۷۳ ص.
  ۳. خیری ه. ۱۳۷۸. شبه‌سازی فرآیند بارش - رواناب و مؤلفه‌های بیلان آب در حوضه گرمابدشت. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران. ۱۹۳ ص.
  ۴. سازمان زمین‌شناسی کشور ۱۳۶۹. گزارش چهارگوش نقشه زمین‌شناسی ساری با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی کشور، تهران. ۵۵ ص.
  ۵. سعادت‌ی ح. غلامی ش.ع. شریفی ف. و ایوب‌زاده س.ع. ۱۳۸۵. بررسی آثار تغییر کاربری اراضی در رواناب سطحی مدل شبه‌سازی. منابع طبیعی ایران. ۵۲(۲): ۳۰۱-۳۱۳.
  ۶. طائی سمیرمی س. ا. مرادی ح. م. و خداقلی م. ۱۳۹۳. بررسی تغییرات جریان رودخانه بار نیشابور تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، مجله انسان و محیط‌زیست. ۴۰(۱۲): ۱-۱۹.
  ۷. عباسی ف. باباییان ا. حبیبی‌نوخندان م. گلی‌مختاری ل. و ملبوسی ش. ۱۳۸۹. ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده، با کمک مدل MAGICC- SCENGEN. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۷۲(۴۲): ۹۱-۱۱۰.
  ۸. لکزائیانپور غ. محمدرضایپور ا. و مالمیر م. ۱۳۹۵. ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر میزان رواناب رودخانه نازلوچای. مجله جغرافیا و توسعه. ۴۲(۱۴): ۱۸۳-۱۹۵.
  ۹. یازرلو ب. ذاکرینیا م. عبدالحسینی م. و شریفان ح. ۱۳۹۵. تأثیر تغییر اقلیم بر خصوصیات بارندگی دوره آینده (مطالعه موردی: استان گلستان). مجله

22. Shuttleworth W. J. and Wallace J. S. 1985. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 111(469): 839-855.
23. Tahir B. 2012. Comparison of the water balance of two forest stands using the BROOK90 model. Student Thesis Series INES Nr 255. Univ Lund, Sweden. 79 p.
24. Wang Q. J. Pagano T. C. Zhou S. L. Hapuarachchi H. A. P. Zhang L. and Robertson D. E. 2011. Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. Journal of hydrology. 404(3): 166-175.
25. White E. D. Easton Z. M. Fuka D. R. Collick A. S. Adgo E. McCartney M. Awulachew S. B. Selassie Y. G. and Steenhuis T. S. 2011. Development and application of a physically based landscape water balance in the SWAT model. Hydrological Processes. 25(6): 915-925.

