

بررسی اثرهای تغییرات اقلیم آبی در تبخیر و تعرق واقعی و آب موجود در خاک در حوضه آبخیز تالار استان مازندران

عباس غلامی - عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی محیط زیست دانشگاه شمال آمل
محمود حبیب‌نژاد روشن* - استاد گروه مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
کاکا شاهدی - استادیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
مهدی وفاخواه - دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری دانشگاه تربیت مدرس
کریم سلیمانی - استاد گروه مهندسی آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲

چکیده

به منظور بررسی تأثیر تغییرات اقلیم آبی در تبخیر و تعرق واقعی و آب موجود در خاک در محدوده حوضه تالار واقع در بخش مرکزی استان مازندران، سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶-۲۰۰۷ به مدت چهار سال برای واسنجی و سال آبی ۲۰۰۸-۲۰۰۹ تا ۲۰۰۹-۲۰۱۰ به مدت دو سال برای اعتبارسنجی مدل SWAT در نظر گرفته شد. بدین منظور، از مدل LARS-WG ۵، که یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هواست، برای تولید سری-سناریوهای مختلف مربوط به IPCC (کمیسیون بین‌الدول تغییر اقلیم مربوط به سازمان ملل متحد) جهت پیش‌بینی دما و بارش آبی استفاده شد. پس از تغییر دما و بارش روزانه برای ایستگاه‌های یادشده، این مقادیر تغییر یافته به مدل SWAT وارد و مدل یک بار دیگر اجرا شد. بر طبق یافته‌های این پژوهش، میانگین روزانه (به سال) تبخیر و تعرق در همه دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی دارای افزایش کلی در همه این دوره‌هاست و تبخیر و تعرق در بیشتر ماه‌های آبی بیش از وضعیت امروزی خواهد شد. در مورد آب موجود در خاک نیز، بررسی‌ها نشان‌دهنده روند نامنظم در مقدار کاهش و افزایش آب خاک بوده است.

کلیدواژگان: اعتبارسنجی، چرخه هیدرولوژی، حوضه تالار، دما و بارندگی، مدل‌سازی، واسنجی.

مقدمه

بیشتر مجامع علمی بین‌المللی تغییرات اقلیمی را مشکل زیست‌محیطی عمده می‌شناسند (بیلی و ریول، ۲۰۱۵). این پدیده بر اساس فعالیت‌های انسانی (افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای) در همه نقاط جهان در حال افزایش است و تأثیر معنی‌داری در افزایش درجه حرارت، سطح آب دریا، وقایع حدی بارندگی، و سایر مسائل مرتبط دارد (کریستینسن و همکاران، ۲۰۰۴: ۳۳۷؛ دیویدسون و جنسن، ۲۰۰۶: ۱۶۵؛ دیابات و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۳۶؛ سافیک و فارس، ۲۰۱۲: ۲۷۴۵؛ تیان و همکاران، ۲۰۱۳: ۲۸۷۱). بر اساس چهارمین گزارش کمیسیون بین‌الدول تغییرات اقلیمی (IPCC)، در طول صد سال گذشته (۱۹۰۶-۲۰۰۵) متوسط درجه حرارت سطح زمین ۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (IPCC: ۲۰۰۷). بر این اساس، روند افزایشی در وقایع حدی اقلیمی مانند سیل‌ها و خشک‌سالی‌ها ایجاد می‌شود (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ دوبلر و همکاران، ۲۰۱۲: ۲۹؛ ایوم و سیمونویچ، ۲۰۱۲: ۴۸۵؛ IPCC، ۲۰۱۲: ۲۰۱۲؛ ژوو و همکاران، ۲۰۱۲: ۴۰۶۷). با توجه به این مسائل،

نیاز مبرمی به منظور تعیین اثرهای تغییرات اقلیمی در هیدرولوژی و منابع آب وجود دارد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴: ۲۰۵). از طرفی، به دلیل تغییرات درخور توجه مؤلفه‌های سیکل هیدرولوژی در مقیاس زمان و مکان، آگاهی از مؤلفه‌های کلیدی کنترل‌کننده تغییرات زمانی و مکانی بیلان آب سطحی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از اهمیت شایانی برخوردار است (ولکاک و مک‌کیب، ۱۹۹۹: ۱۳۴۱؛ میلی، ۱۹۹۴: ۲۱۴۳). تبخیر- تعرق با بیلان آب و خاک مرتبط است و نقشی کلیدی در تعاملات آب و هوا، خاک، و پوشش گیاهی دارد (یانگ و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۶۷). اجرای تحقیقات و مطالعات گسترده در زمینه مدیریت منابع آب، کشاورزی، و محیط زیست مستلزم آگاهی از تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس زمانی و مکانی است (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۴۳). ارزیابی پدیده تغییر اقلیم و پیامدهای احتمالی آن بر فرایندهای هیدرولوژی حوضه کمک فراوانی به چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب در دوره‌های آتی خواهد کرد. از طرفی دیگر، اثر تغییر اقلیم به وسیله شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی با مدل فیزیکی بارش- رواناب بررسی می‌شود و مدل‌های هیدرولوژی چارچوبی برای بررسی رابطه میان هواشناسی و منابع آب فراهم می‌کند (ذهبیون و همکاران، ۱۳۸۹). در این راستا، مدل‌سازی رایانه‌ای در چهار دهه گذشته به صورت فزاینده‌ای توسعه یافته و از آن استفاده شده است؛ دلایل اصلی آن را می‌توان ظاهر شدن مدل‌ها و روش‌های جدید توسعه مؤسسات تحقیقاتی و افزایش تقاضا برای ابزار توسعه‌یافته در کنار افزایش فشار بر منابع آب دانست. مدل‌های هیدرولوژی ابزارهای مهمی برای برنامه‌ریزی پایدار استفاده از منابع آبی در برخورد با تغییرات تقاضای آن‌ها می‌باشند. مدل SWAT (The Soil and Water Assessment Tool) نشان داد که ابزار مناسبی برای مدیریت منابع آبی در اقصی نقاط جهان است. استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک بزرگ- مقیاس برای برآورد مؤلفه‌های بیلان آب و تبخیر- تعرق واقعی مستلزم واسنجی مناسب آن‌هاست (کیت و دروگر، ۲۰۰۰: ۳؛ باستیانسن و همکاران، ۱۹۹۸: ۲۱۳). در مدل SWAT (آرنولد و همکاران، ۱۹۹۸: ۷۳) به دلیل اینکه اجزای اساسی فرایندهای هیدرولوژیک مانند بارندگی و رواناب به صورت اندازه‌گیری شده وارد مدل می‌شوند، مقدار تبخیر- تعرق واقعی برآوردشده از قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است. فوکونگا و همکاران (۲۰۱۵: ۲۰۶) کارایی مدل SWAT را در حوضه آبخیز ایتاپمیریم^۱ در منطقه استوایی برزیل به کار بردند. در این تحقیق داده‌های سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۰ به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی این محققان نشان داد که مدل در واسنجی اولیه به جریان پایه بسیار حساس است. نتایج آنالیز اعتبارسنجی با ضریب ناش- ساتکلیف با عدد ۰/۶۷ نیز نشان داد که کاربرد مدل در این منطقه رضایت‌بخش است. در مطالعات دیگر نیز محققان (آندراده و همکاران، ۲۰۱۳: ۶۹؛ آراگاو و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۰۹۱؛ دوراس و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۸)، و سایرین در برزیل به‌ویژه در حوضه‌های آبخیزی با داده‌های زیست‌محیطی اندک و همچنین در نقاط دیگر جهان (تامپی و همکاران، ۲۰۱۰: ۴۵۶۷؛ بیکر و میلر، ۲۰۱۳: ۱۰۰؛ برزوفسکی و همکاران، ۲۰۱۱: ۱۵۷) به نتایج رضایت‌بخشی در استفاده از مدل SWAT رسیده‌اند. در تحقیق دیگری، ولن و همکاران (۲۰۱۴: ۳۳۵۳) مدل SWAT را برای ارزیابی عدم قطعیت منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در حوضه آبخیز ریدهیل کریک^۲ و گریندستون کریک^۳ کانادا به کار بردند. این محققان به طور کلی روشی را پیشنهاد کردند تا در استفاده‌های آتی از این مدل عدم قطعیت عوامل مختلف کاهش یابد. در مطالعه‌ای دیگر، کیائو و همکاران (۲۰۱۵: ۲۳۱) مدل SWAT را برای واسنجی یک منطقه جنگلی، که به مرتع تغییر کاربری داده شده بود، در حوضه آبخیز سیمارون^۴ در شمال اکلاهما ایالات متحده آمریکا به کار بردند. متوسط ضریب ناش- ساتکلیف (NSC) در دوره واسنجی مدل برای رواناب روزانه و ماهانه در حوضه آبخیز آزمایشی به ۰/۹۶ و ۰/۹۷ برای مراتع و ۰/۹۰ و ۰/۸۴ برای مناطق جنگلی و همین طور مقدار متوسط ضریب ناش- ساتکلیف برای رواناب ماهانه در یک دوره

1. Itapemirim
2. Red hill Creek
3. Grindstone Creek
4. Cimarron

۲۲ساله به ۰/۷۹ رسید. آن‌ها جزئیات پارامترهای بیوفیزیکی و هیدرولوژیک را برای مراتع علف بلند تحت چرای متوسط و مناطق جنگلی به کار بردند که می‌تواند برای واسنجی مدل‌های دیگر همراه با صحت‌سنجی‌های آن‌ها در مجموعه مدل‌های هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گیرد. ماسائو و همکاران (۲۰۱۵) پاسخ‌های هیدرولوژیک به تغییرات اقلیمی را در حوضه‌های آبخیز امتی الگون^۱ (Mt. Elgon) کنیا تحقیق کردند. در این پژوهش آن‌ها پتانسیل پاسخ‌های هیدرولوژیک جریان رودخانه‌ای را نسبت به تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز رودخانه نزویا^۲ کنیا مطالعه کردند. در این تحقیق آن‌ها از ابزار ارزیابی منابع آب و خاک SWAT و تغییر درجه حرارت و بارش ماهانه تحت سناریوهای مختلف برای دوره‌های آبی ۲۰۴۰-۲۰۷۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۱ استفاده کردند. نتایج این محققان نشان داد تفاوتی در چهار منطقه حوضه‌های مطالعاتی آن‌ها در پاسخ به تغییرات اقلیمی وجود دارد که به خاطر حساسیت‌های گوناگون این مناطق و عدم قطعیت‌های به‌وجودآمده در اثرهای هیدرولوژیک بالقوه منطقه‌ای بوده است. در داخل کشور نیز محققان مختلفی موضوع تغییرات اقلیمی، اثرهای بالقوه آن بر محیط زیست، و منابع آبی را مطالعه کردند که در ذیل به نمونه‌هایی از این مطالعات اشاره می‌شود: سلمانی و همکاران (۱۳۹۱: ۸۵) در تحقیقی بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر بارش- رواناب را در مدل نیمه‌توزیعی SWAT در حوضه آبخیز قزاقی استان گلستان ارزیابی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که بعد از شبیه‌سازی، مقدار P-factor بین ۰/۳۴-۰/۸ و R-factor بین ۰/۵۱-۱/۱۴ به دست آمد که نشان‌دهنده کم‌بودن عدم قطعیت و دقت بالای مدل در شبیه‌سازی است؛ به‌طوری‌که بیشتر داده‌های مشاهداتی در محدوده تخمین عدم قطعیت ۰/۹۵ قرار گرفتند؛ آن‌ها در کل نتیجه گرفتند که از این مدل، به‌عنوان ابزاری مفید برای مدیریت منابع آب، توصیف و مدیریت بهینه حوضه، و ارزیابی سیستم‌های منابع آبی می‌توان استفاده کرد. ذهبیون و همکاران (۱۳۸۹: ۴۳) کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب خروجی از حوضه قره‌سو از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ را بررسی کردند. نتایج ایجاد سناریوی اقلیمی دما و بارش توسط مدل HadCM3 و سری زمانی رواناب شبیه‌ساز شده توسط مدل بارش- رواناب نشان داد که متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژی حوضه قره‌سو در دوره آبی تغییرات قابل توجهی خواهد داشت. مقایسه پارامترهای اقلیمی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ آشکار کرد که دمای منطقه در ماه‌های مختلف بین ۱ تا ۴ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه گرم‌تر می‌شود. بارش نیز، به‌جز در ماه‌های بدون بارش، تغییری در حدود ۳۰ درصد خواهد داشت که می‌تواند بر مقدار کلی آب قابل دسترس، زمان پیک، و وقایع حدی اثرگذار باشد. شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان از تغییر رواناب منطقه در این دوره بین ۹۰ تا ۱۲۰ درصد در ماه‌های مختلف دارد. سادات آشفته و مساح بوانی (۱۳۸۹: ۲۵) در پژوهشی تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر را در حوزه آبدوغموش آذربایجان شرقی در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ بررسی کردند. در این تحقیق مقادیر دما و بارش ماهانه مدل HadCM3 تحت سناریوی A2 پس از ریزمقیاس‌نمایی به مدل IHACRESS جهت شبیه‌سازی رواناب حوضه معرفی شد. برآزش توزیع احتمالاتی به سری دبی‌های حداکثر سالانه و مقایسه رژیم آن (شدت و فراوانی) در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ با دوره مشاهداتی نشان از تأثیر تغییر اقلیم بر رژیم دبی‌های حداکثر این حوضه در دوره‌های آبی دارد؛ به‌طوری‌که شدت دبی‌ها برای دوره بازگشت‌های تا پنجاه سال تفاوت چندانی نکرده است و با افزایش دوره بازگشت، شدت آن در دوره آبی افزایش خواهد یافت. همچنین، احتمال وقوع دبی‌های حداکثر با مقدار معین در دوره آبی نسبت به دوره پایه کمتر خواهد بود. علاوه بر مطالعات ذکر شده در بالا، از تحقیقات دیگر در زمینه کاربرد مدل SWAT در داخل کشور می‌توان به موارد ذیل نیز اشاره کرد که فقط به ذکر عناوین آن‌ها اشاره‌ای می‌شود: تحقیقات عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲: ۱۹۳) با عنوان شبیه‌سازی رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT در حوضه آبخیز چهل‌چای استان گلستان؛ ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده‌رود در

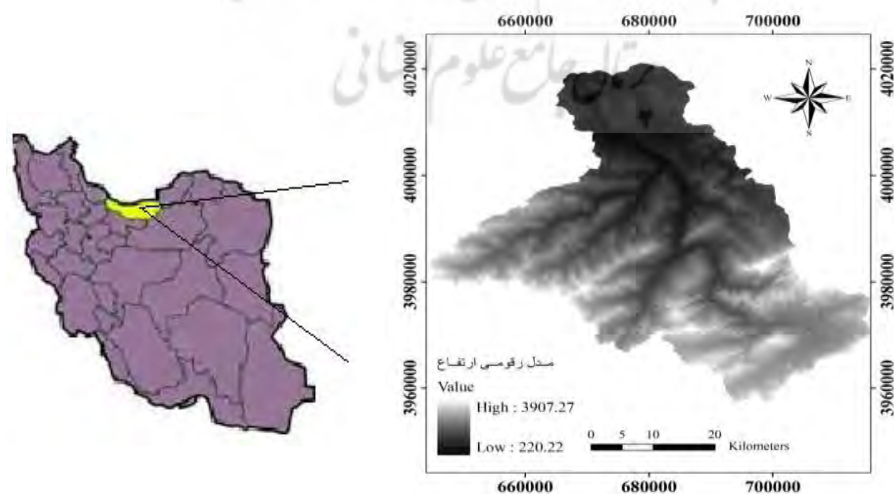
1. Mt. Elgon
2. Nzoia

پژوهش‌های آبابایی و سهرابی (۱۳۸۸)؛ شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه چهل‌چای استان گلستان با مدل SWAT در تحقیقات اکبری مجدر و همکاران (۱۳۹۲)؛ تعیین مناطق بحرانی تولید رسوب در آبخیز چهل‌چای استان گلستان با استفاده از مدل SWAT در تحقیقات عارفی اصل و همکاران (۱۳۹۲: ۱۹۳)؛ برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس سال - حوضه با استفاده از مدل SWAT در تحقیقات علیزاده و همکاران (۱۳۹۲: ۲۴۳). با توجه به این مسائل، اهمیت پدیده تغییرات اقلیم بر کلیه عوامل محیط زیست و منابع آبی و تأثیر آن در ساختار اکوسیستم‌ها، پوشش گیاهی، برهم‌کنش روابط انسان و محیط زیست، تنوع زیستی، مسائل سیلاب‌ها و مدیریت آن‌ها، و سایر تبعات همراه آن آشکار می‌شود.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوضه آبخیز تالار در البرز مرکزی و در دو طرف جاده آسفالت تهران - قائمشهر واقع شده است. سطوح حوضه مورد مطالعه ۲۱۰۰۸۸/۷ هکتار است که در مختصات ۲۲/۲ ۳۵ ۵۲ تا ۳۴/۱۹ ۲۳ ۵۳ طول جغرافیایی شرقی و ۲۳/۰۶ ۳۵ ۴۴ تا ۱۶ ۱۹ ۳۶ عرض جغرافیایی شمالی واقع شده است و به وسیله یک رودخانه اصلی به نام تالار، که امتداد جنوب به شمال زهکش می‌شود و از سرشاخه‌های مهم آن می‌توان به رودخانه‌های سرخ‌آباد، شورآب، کبیر، بزلا، چرات، و شش رودبار اشاره کرد. رودخانه اصلی این حوضه دارای طول کل حدود ۱۰۰ کیلومتر است و در نزدیکی خروجی حوضه با رودخانه کسلیان تلاقی می‌کند. حوضه آبخیز تالار، که بین حداقل و حداکثر ارتفاع در حدود ۳۶۹۵ متر اختلاف ارتفاع وجود دارد، دارای ارتفاعات مهمی همچون برف پاچون، ورزاک، چیلکا شمعدان، چهار، سامان سی، چهار تب، سفید لت، تروا، کند دره، سیاه‌کوه، بشم، سیاه‌دره، آسمان‌لو، شاه‌محمد قله، و علم‌دار است. بلندترین ارتفاع در منطقه شمال غربی حوضه، قله شلجمار زردین، با ارتفاع ۳۹۱۰ متر و پست‌ترین نقطه در خروجی حوضه با ارتفاع ۲۱۵ متر از سطح دریای آزاد قرار گرفته است. اراضی پست حدود ۲۲ درصد و اراضی متوسط حدود ۷۰/۲ درصد و اراضی مرتفع حدود ۷/۸ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده‌اند. رودخانه تالار پس از خروجی حوضه حدود ۵۰ کیلومتر را در دشت قائمشهر - بابل طی می‌کند و به دریای خزر می‌ریزد. شکل ۱ موقعیت حوضه تالار را در استان مازندران و کشور ایران نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت حوضه تالار در استان مازندران و کشور ایران

معرفی مدل SWAT Soil and Water Assessment Tools

SWAT مخفف کلمه ابزار ارزیابی آب و خاک برای یک حوضه رودخانه‌ای یا یک حوضه آبخیز است؛ این مدل توسط دکتر جف آرنولد از سرویس تحقیقات کشاورزی به منظور استفاده در سازمان کشاورزی امریکا توسعه پیدا کرده است. SWAT به منظور پیش‌بینی اثرهای عملیات مدیریت زمین بر آب، رسوب، و مواد شیمیایی کشاورزی در حوضه‌های بزرگ و پیچیده با تغییرات خاک، کاربری زمین، و شرایط مدیریت در طول دوره‌های طولانی‌مدت توسعه یافته است.

ساختار مدل SWAT

در مدل SWAT برای نیل به اهداف مدل‌سازی، یک حوضه آبخیز به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود. استفاده از زیرحوضه‌های آبخیز در شبیه‌سازی مخصوصاً هنگامی که نواحی مختلف حوضه آبخیز به وسیله کاربری اراضی یا خاک‌های متفاوت به منظور بررسی اثرهای ویژگی‌های هیدرولوژیک تقسیم‌بندی می‌شود سودمند است. با تقسیم‌بندی حوضه آبخیز به زیرحوضه‌ها، کاربر قادر است که نواحی گوناگون حوضه را با دیگر مکان‌ها ارتباط دهد. اطلاعات ورودی برای هر زیرحوضه آبخیز به گروه‌ها یا دسته‌های ذیل تقسیم می‌شود: آب و هوا، واحد پاسخ هیدرولوژیک یا HRU، دریاچه‌ها، مرداب‌ها، آب‌های زیرزمینی و زهکش اصلی یا بازه، شبکه زهکشی حوضه آبخیز. واحدهای پاسخ هیدرولوژیک نواحی یکپارچه در ارتباط با زیرحوضه‌های آبخیزی است که شامل پوشش گیاهی یکنواخت، خاک، و مسائل مدیریتی است. بسته نرم‌افزاری SWAT محاسبات واضحی از اجزای تشکیل‌دهنده موازنه آبی و منابع آبی متعاقب آن (آب سبز و آب آبی) را در سطح حوضه آبخیز انجام می‌دهد. چرخه هیدرولوژی مدل SWAT به وسیله رابطه بیلان آبی ذیل شبیه‌سازی می‌شود:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{sep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

که در این رابطه، SW_t مقدار نهایی آب خاک، SW_0 مقدار اولیه آب خاک در روز t ام، t زمان (روزها)، R_{day} مقدار بارندگی روزانه i مقدار رواناب سطحی روزانه i ، E_a مقدار تبخیر و تعرق روزانه i ، W_{sep} مقدار آب واردشده به لایه غیراشباع از پروفیل خاک، و Q_{gw} مقدار آب برگشتی در روز t ام همگی به میلی‌متر است. تقسیم‌بندی حوضه آبخیز به زیرحوضه‌ها کاربر را قادر می‌کند تا اختلاف تبخیر و تعرق را برای محصولات متنوع محاسبه کند. هرزآب نیز جداگانه برای هر HRU پیش‌بینی می‌شود و روندیابی آن برای محاسبه کل رواناب حوضه آبخیز انجام می‌شود. این مراحل صحت کار را افزایش می‌دهد و توصیف فیزیکی بهتری از بیلان آبی ارائه می‌دهد. رواناب سطحی با استفاده از معادله تغییر یافته شماره منحنی SCS محاسبه می‌شود (سرویس حفاظت خاک؛ وزارت کشاورزی امریکا، ۱۹۷۲) یا از روش معادله نفوذپذیری گرین-آپت استفاده می‌شود (نیتج و همکاران، ۲۰۰۰). مقدار رواناب سطحی در SWAT با استفاده از روش شماره منحنی بر اساس رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.4S)} \quad R > 0.2S \quad (2)$$

که Q_{surf} رواناب تجمعی یا بارش مازاد به میلی‌متر، R_{day} عمق بارش روزانه به میلی‌متر، و S پارامتر نگهداشت به میلی‌متر است. هرزآب وقتی رخ می‌دهد که $R_{day} > 0.2S$ باشد. پارامتر نگهداشت به صورت مکانی بر اساس ویژگی‌های خاک، نوع کاربری زمین، شیوه مدیریت زمین، شیب منطقه، و تغییرات موقتی ظرفیت آب در خاک تعیین و بر اساس رابطه ۳ تشریح می‌شود:

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

که CN شماره منحنی در مقیاس روزانه است. سینگ و همکاران (۲۰۱۳) آب و هوای حوضه آبخیز، ورودی‌های انرژی، و رطوبت را تأمین می‌کند که بیلان آبی حوضه را در کنترل خود دارد و تعیین‌کننده اثرهای نسبی اجزای مختلف سیکل هیدرولوژی است. متغیرهای آب و هوایی SWAT شامل بارش روزانه، درجه حرارت حداکثر و حداقل، تابش خورشیدی، سرعت باد، و رطوبت نسبی است. مدل SWAT این مقادیر ثبت‌شده یا ایجادشده در طول دوره شبیه‌سازی را دریافت می‌کند. مقادیر روزانه داده‌های آب و هوایی از مقادیر متوسط ماهانه ایجاد می‌شود. مدل یک سری از اطلاعات اقلیمی را برای هر زیرحوضه آبخیز ایجاد می‌کند. مقادیر برای هر یک از زیرحوضه‌ها به صورت مستقل ایجاد می‌شود و لزومی به اصلاح مکانی مقادیر ایجادشده در حوضه‌های مختلف نیست. SWAT مدلی برای رشد تک‌گونه گیاهی به منظور شبیه‌سازی همه انواع پوشش‌های زمین است. اختلاف بین گیاهان یک‌ساله و دائمی قابل مدل‌سازی است. رشد گیاهان یک‌ساله از تاریخ کاشت تا زمان برداشت است. گیاهان دائمی عمدتاً به وسیله سیستم ریشه‌ای در سالیان مختلف و فصل خواب در طی ماه‌های زمستان تقسیم می‌شوند. مدل SWAT ذخیره آب، رسوب، مواد غذایی، و حشره‌کش‌ها در زهکش اصلی و ذخیره آن‌ها در شبکه رودخانه‌ای حوضه آبخیز را با استفاده از روش مشابه مدل HYMO (ویلیام و هان، ۱۹۷۲) به‌انجام می‌رساند. مراحل روندیابی در این مدل در دو بخش روندیابی در زهکش اصلی و روندیابی در مخزن است. بخش روندیابی زهکش اصلی شامل چهار بخش- روندیابی سیلاب، روندیابی رسوب، روندیابی مواد غذایی- که براساس مدل QUAL2E (براون و برانویل، ۱۹۸۷) است و روندیابی آفت‌کش‌های موجود در زهکش اصلی است. بخش روندیابی مخزن نیز شامل چهار بخش است: روندیابی خروجی مخزن، روندیابی رسوب خروجی مخزن، روندیابی عناصر غذایی مخزن، و روندیابی آفت‌کش‌های خروجی از مخزن. چندین روش و تکنیک برای اندازه‌گیری پارامترها و پیش‌بینی خطاها در مدل‌های هیدرولوژیک وجود دارد. در این میان یک الگوریتم به وسیله عباسپور و همکاران (۱۹۹۶: ۱۵۱) توسعه پیدا کرده است که به نام الگوریتم توسعه‌یافته عدم قطعیت بیزین است و می‌تواند به وسیله چندین تکنیک به منظور به‌دست‌آوردن کاهش خیلی زیاد در عدم قطعیت پروژه‌های زیست‌محیطی مناسب باشد. یک مشکل مشترک بیشتر این روش‌های به‌اصطلاح تابع معکوس پایداری و نزدیکی خطوط است (یئه، ۱۹۸۶: ۱۹۵). SWAT-CUP یک نرم‌افزار عمومی و الحاقی به نرم‌افزار SWAT است. این نرم‌افزار برای آنالیز حساسیت، واسنجی، اعتبارسنجی، و عدم قطعیت پارامترهای نرم‌افزار SWAT به‌کار می‌رود. این نرم‌افزار بدین منظور از برنامه‌های Parasol، GLUE، SUFI2، و MCMC استفاده می‌کند؛ با توجه به اینکه در این پژوهش به منظور واسنجی و اعتبارسنجی داده‌های نرم‌افزار SWAT، از برنامه SUFI2 استفاده شده است.

انواع روش‌های ریزمقیاس‌سازی نمایی

با استفاده از روش‌های مختلف ریزمقیاس‌کردن می‌توان تغییرات اقلیمی را در آینده بررسی کرد (دوبروفسکی، ۱۹۹۶: ۱۳۸۰). روش‌های ریزمقیاس‌سازی به دو بخش عمده تقسیم می‌شود: ۱. آماری؛ ۲. دینامیکی. مدل‌های دینامیکی منطقی‌ای دارای دقت فضایی مناسبی برای ارزیابی‌های اقلیمی است و همچنین فرایندهای ریزمقیاس جوی و اقلیمی تا حد ممکن لحاظ می‌شوند؛ اما استفاده از این مدل‌ها برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو با محدودیت زمانی اجرای مدل مواجه است. در مدل‌های آماری، علاوه بر داده‌های یک مدل گردش عمومی جو، داده‌های دیدبانی‌شده نیز برای کشف ارتباط آماری بین داده‌های مدل گردش عمومی جو در گذشته و داده‌های دیدبانی مورد نیاز

است. با روش آماری در زمانی در حد ثانیه می‌توان ریزمقیاس‌نمایی آماری را برای یک ایستگاه مشخص انجام داد. روش آماری ریزمقیاس‌کردن، در مقایسه با روش‌های دینامیکی، به‌ویژه در مواقعی که هزینه کمتر و ارزیابی سریع‌تر عوامل مؤثر در تغییرات آب‌وهوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است. از مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی استفاده می‌شود می‌توان به 3,5 RegCM, MM و PRECIS اشاره کرد. انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری عبارت‌اند از: GEM, ET&ROLL, SDSM, WG CLIMGEN, USCLIMATE, و LARS-WG CLIMGEN (سمنوف و همکاران، ۱۹۹۹: ۱۳۷). ذکر این نکته لازم است که در این پژوهش از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG5 استفاده شده است.

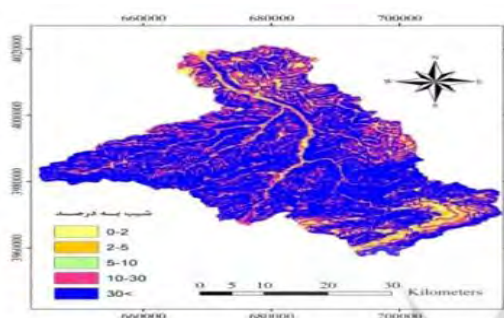
معرفی مدل LARS-WG

یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا مدل LARS-WG است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به‌کار می‌رود. اولین نسخه LARS-WG در بوداپست طی سال ۱۹۹۰ به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس‌نمایی آماری در کشور مجارستان ابداع شد. در مدل LARS-WG برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای به‌کار می‌رود. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه‌تجربی است. خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش، و تابش است. آخرین مدل این نرم‌افزار عبارت است از LARS-WG5 که در تولید داده‌های تصادفی هواشناسی در دوره زمانی طولانی توسعه زیادی یافته و کاملاً پیشرفته است. در مدل LARS-WG5 برای مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای به‌کار می‌رود. مبنای این مدل برای مدل‌سازی طول دوره‌های خشک و تر بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه‌تجربی است. شبیه‌سازی بارندگی بر اساس روزهای تر و خشک مدل‌سازی می‌شود؛ این در حالی است که روزهای تر به روزی اطلاق می‌شود که بارندگی بیشتر از صفر میلی‌متر باشد. طول هر سری به طور اتفاقی در هر ماه انتخاب می‌شود. برای تعیین توزیع‌ها، داده‌های مشاهده‌شده در دوره گذشته نیز در همان ماه جای می‌گیرد. برای محاسبه روزهای خشک، میزان بارندگی از توزیع نیمه‌تجربی بارندگی برای ماه خاصی که به سری‌های تر یا به میزان بارندگی در روز قبل بستگی ندارد ایجاد می‌شود. ورودی‌های این مدل آمار روزانه اقلیمی شامل میزان بارندگی، دما، و تابش است و خروجی‌های این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین دمای ماهانه و سالانه، و مقادیر بارش و تابش است. تولید داده توسط مدل در سه مرحله انجام می‌شود که عبارت‌اند از: کالیبره‌کردن، ارزیابی، و ایجاد داده‌های هواشناسی. با توجه به این موارد، در این پژوهش، نظر به کارایی بسیار زیاد، از مدل LARS-WG که یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هواست و برای تولید مقادیر بارش، تابش، درجه حرارت‌های بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به‌کار می‌رود استفاده شده است.

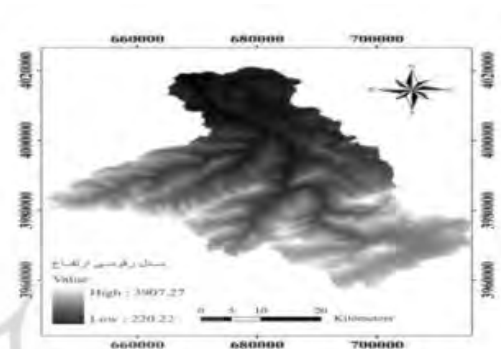
یافته‌های پژوهش

برای دستیابی به اهداف این پژوهش با استفاده از مدل SWAT یک بار کالیبراسیون و اعتبارسنجی داده‌های ورودی انجام شد. روش عمل بدین صورت بوده است که در ابتدا نقشه DEM (Digital Elevation Model) حوضه تالار با قدرت تفکیک ۵۰ متر از سازمان‌های ذی‌ربط تهیه شد. این یک نقشه اولیه و پایه برای تهیه سایر نقشه‌های مرتبط است.

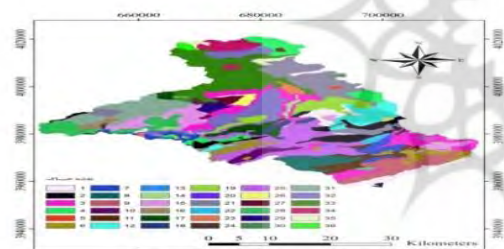
شکل ۲ نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه آبخیز تالار را نشان می‌دهد. سایر نقشه‌های مورد نیاز شامل نقشه شیب حوضه، نقشه کاربری اراضی حوضه، نقشه خاک‌شناسی حوضه از روی اطلاعات موجود در روی نقشه DEM به شرح ذیل تهیه شد: نخست نقشه کلاس‌های شیب حوضه در چهار طبقه مختلف تهیه شد (شکل ۳). نقشه کاربری اراضی حوضه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و استفاده از اطلاعات میدانی در شش طبقه مختلف تهیه شد (شکل ۴). نقشه خاک‌شناسی حوضه نیز با استفاده از گزارش‌های خاک‌شناسی و قابلیت اراضی مطالعات توجیهی حوضه آبخیز تالار مربوط به اداره کل منابع طبیعی استان مازندران (گزارش طرح تلفیق آبخیزداری حوضه تالار، ۱۳۸۰) در ۳۶ کلاس مختلف تهیه شد (شکل ۵).



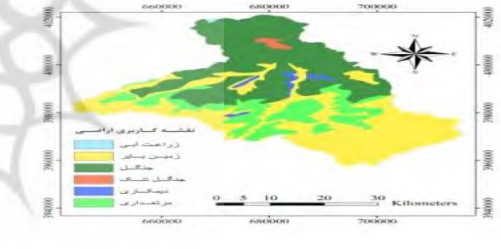
شکل ۳. نقشه شیب حوضه آبخیز تالار



شکل ۲. نقشه مدل رقومی ارتفاع حوضه آبخیز تالار



شکل ۵. نقشه خاک‌شناسی حوضه آبخیز تالار



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی حوضه آبخیز تالار

داده‌های اقلیمی مورد نیاز نیز از اداره کل هواشناسی و سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران تهیه شد. نخست برای انتخاب ایستگاه‌های مناسب به منظور اهداف این تحقیق نمودارهای میله‌ای مربوط به دمای روزانه، دبی روزانه، بارش روزانه ایستگاه‌های منطقه رسم شد و در نهایت از میان ۱۴ ایستگاه دارای آمار بارش روزانه ۸ ایستگاه و برای دمای روزانه از میان ۶ ایستگاه ۵ ایستگاه و برای دبی روزانه نیز ایستگاه شیرگاه تالار، که در نزدیکی خروجی حوضه است، انتخاب شد. جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های انتخاب‌شده برای اجرای این تحقیق را نشان می‌دهد. در این پژوهش سعی شده است ایستگاه‌هایی انتخاب شوند که دارای آمار کامل و نزدیک به زمان حال باشند. بنابراین، سال آماری ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا ۲۰۰۹-۲۰۱۰ به عنوان سال مشترک آماری انتخاب شد. پس از آماده‌سازی نقشه‌ها و اطلاعات اقلیمی پایه مورد نیاز، مدل SWAT برای این حوضه آبخیز به اجرا درآمد. در این مدل، ابتدا با مبنا قراردادن نقشه DEM و ترسیم شبکه‌های رودخانه‌ای و مشخص کردن ایستگاه خروجی، اجرای مدل آغاز می‌شود. سپس، با تلفیق نقشه‌های خاک‌شناسی، شیب، و کاربری اراضی نقشه پایه اولیه ترسیم می‌شود. سپس (Hydrological Response Unite) HRU یا واحد پاسخ هیدرولوژیک، که یکی از واحدهای مهم در مدل SWAT است، بر اساس سهم هر یک از عوامل

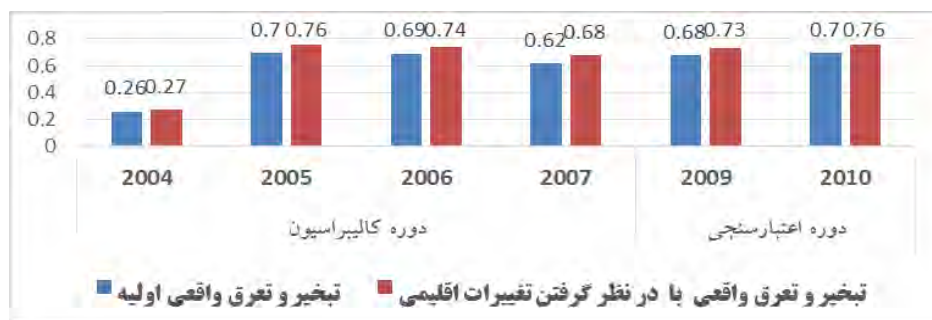
شیب، کاربری اراضی، و خاک‌شناسی آماده می‌شود. پس از انجام دادن این مراحل برای حوضه مورد مطالعه، خروجی مدل SWAT به دست می‌آید. در این پژوهش سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶-۲۰۰۷ به مدت چهار سال برای واسنجی و سال آبی ۲۰۰۸-۲۰۰۹ تا ۲۰۰۹-۲۰۱۰ به مدت دو سال برای اعتبارسنجی مدل در بسته نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شد. با توجه به این موارد، کل حوضه تالار به ۲۱۹ واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) در ۲۳ زیرحوضه تفکیک شد. در مرحله بعدی به منظور ارزیابی مدل SWAT از پدیده تغییر اقلیم، مدل یک بار دیگر برای این منطقه با شرایط جدید اجرا شد. نحوه عمل بدین حالت بوده است که با تعریف شرایط HRU برای مدل، فقط داده‌های اقلیمی تغییر یافته دما و بارندگی وارد این مدل شد تا تأثیر آن در خروجی مدل بر روی شبیه‌سازی بارش- رواناب ارزیابی شود. بدین منظور، دما و بارش تغییر یافته و پیش‌بینی شده به وسیله مدل LARS-WG برای ۸ ایستگاه منتخب بارش روزانه و ۵ ایستگاه منتخب دمای روزانه طی دوره مشترک آماری سال آبی ۲۰۰۳-۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶-۲۰۰۷ (دوره کالیبراسیون مدل) و سال آبی ۲۰۰۸-۲۰۰۹ تا ۲۰۰۹-۲۰۱۰ (دوره اعتبارسنجی مدل) استفاده شد. پس از تغییر دما و بارش روزانه برای ایستگاه‌های یادشده، این مقادیر تغییر یافته به مدل SWAT وارد شد و مدل یک بار دیگر اجرا شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های انتخاب شده برای اجرای پژوهش

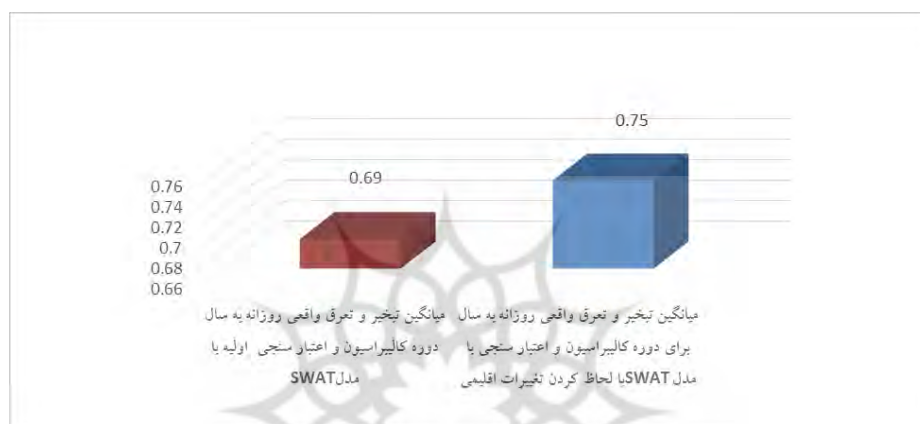
ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نام حوضه آبریز اصلی	نام رودخانه	نام ایستگاه
۲۲۰	۳۶-۱۷-۵۷	۵۲-۵۳-۱۰	تالار	تالار	شیرگاه
۱۱۰۶	۳۶-۰۵-۴۶	۵۳-۱۰-۲۴	تالار	کسیلیان	ولیک بن
۲۲۰	۳۶-۱۸-۰۵	۵۲-۵۳-۱۴	تالار	کسیلیان	شیرگاه
۵۸۰	۳۶-۰۶-۴۴	۵۳-۰۳-۳۱	تالار	تالار	پل سفید
۱۲۱۸	۳۶-۰۱-۱۳	۵۲-۵۴-۰۸	تالار	شش رودبار	پالندردوبار
۲۲۰	۳۶-۱۷-۵۷	۵۲-۵۳-۱۰	تالار	تالار	شیرگاه
۱۵۰۰	۳۶-۰۵-۵۵	۵۳-۱۳-۰۰	تالار	کسیلیان	ولیک چال
۵۸۰	۳۶-۰۶-۲۴	۵۳-۰۳-۵۵	تالار	تالار	پل سفید
۱۵۵۷	۳۶-۰۴-۱۱	۵۳-۰۹-۴۵	تالار	کسیلیان	کله
۱۲۵۰	۳۶-۰۵-۴۵	۵۳-۱۱-۲۶	تالار	کسیلیان	سودکلا
۱۳۰۰	۳۶-۰۴-۰۸	۵۳-۱۲-۱۴	تالار	کسیلیان	درزیکلا
۱۶۸۰	۳۶-۰۴-۱۰	۵۲-۵۰-۲۱	تالار	تالار	آلاشت
۱۲۲۵	۳۶-۰۱-۱۳	۵۲-۵۴-۱۱	تالار	شش رودبار	پالندردوبار
۲۵۹	۳۶-۱۸-۲۰	۵۲-۵۳-۳۰	تالار	تالار	شیرگاه
۱۳۳۷	۳۶-۰۶-۳۶	۵۳-۱۳-۴۲	تالار	کسیلیان	سنگده

اثر تغییر اقلیم در تبخیر و تعرق واقعی حوضه مورد مطالعه

با توجه به اینکه تبخیر و تعرق یکی از عوامل مهم در چرخه هیدرولوژی است و می‌تواند در سایر مؤلفه‌های محیط زیست تأثیر گذارد، در این پژوهش بررسی و مطالعه شده است. شکل ۶ میانگین تبخیر و تعرق روزانه به سال در دو دوره مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار SWAT را نشان می‌دهد و شکل ۷ مقایسه میانگین روزانه به سال مقدار تبخیر و تعرق برای دوره مطالعاتی فوق‌الذکر را نشان می‌دهد.

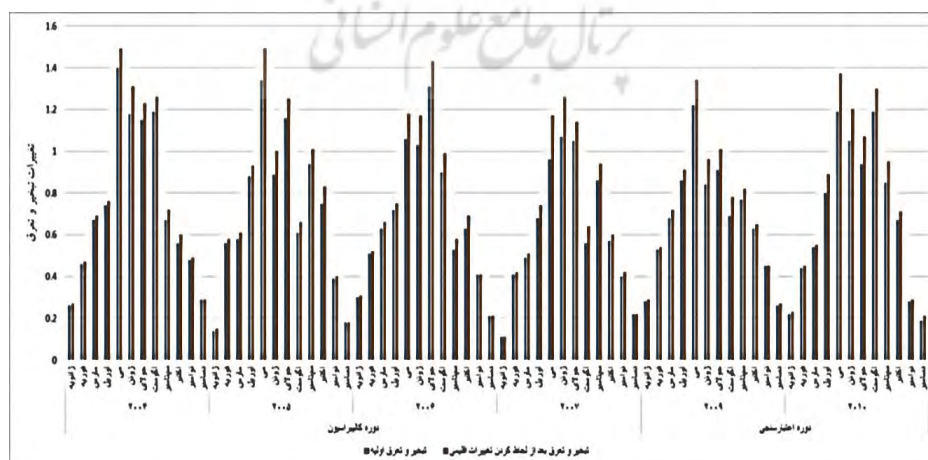


شکل ۶. مقایسه میانگین روزانه (به سال) مقدار تبخیر و تعرق واقعی به دست آمده از اجرای اول مدل SWAT با تبخیر و تعرق واقعی بعد از در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

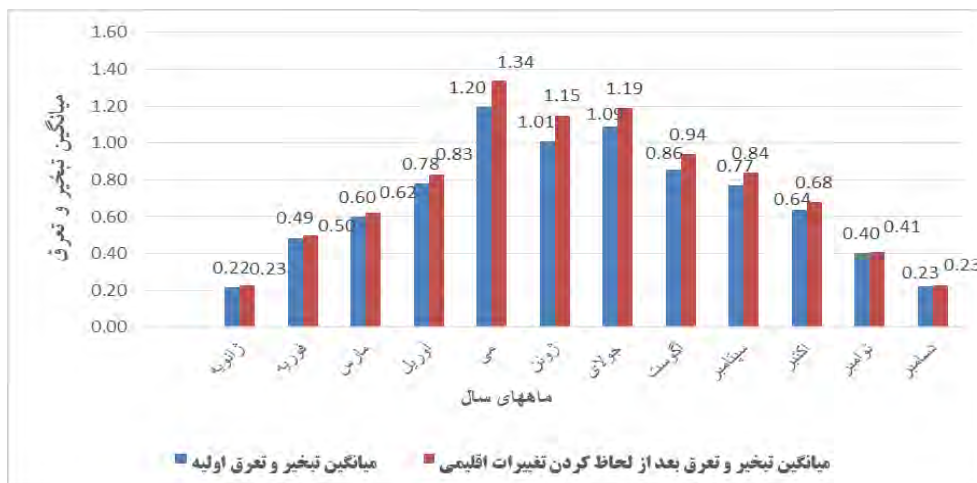


شکل ۷. نمودار مقایسه میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه (به سال) در زمان اجرای اولیه مدل با اجرای ثانویه آن

همچنین، برای بررسی بهتر مقدار تبخیر و تعرق واقعی در حوضه مطالعاتی به تعیین تغییرات ماهانه این عامل در طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT در حوضه مطالعاتی اقدام شد. شکل ۸ تغییرات تبخیر و تعرق ماه‌های مختلف سال در زمان اجرای اول مدل SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل را نشان می‌دهد.



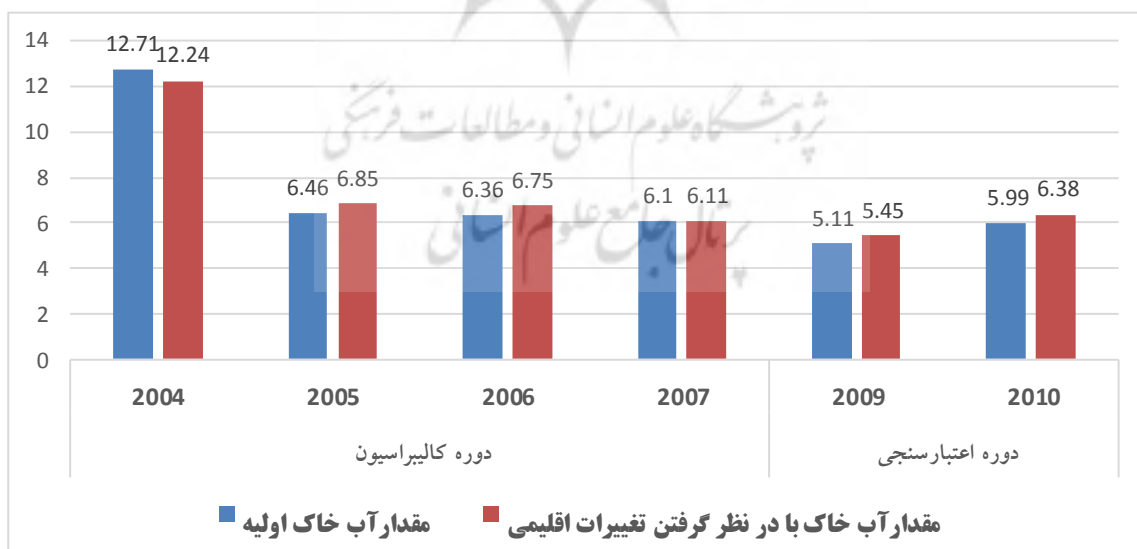
شکل ۸. مقایسه تغییرات تبخیر و تعرق ماه‌های مختلف سال در زمان اجرای اول مدل SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی (دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل)



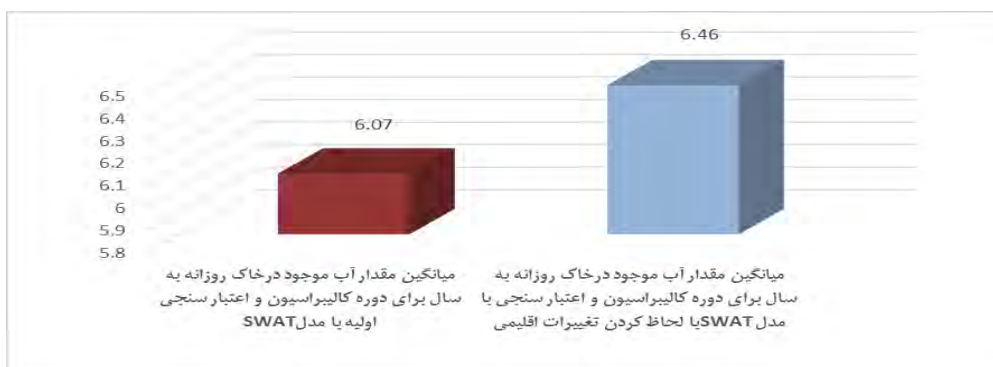
شکل ۹. مقایسه میانگین تبخیر و تعرق ماه‌های مختلف سال در دو دوره اجرای مدل SWAT

اثر تغییر اقلیم در مقدار آب موجود در خاک حوضه مورد مطالعه

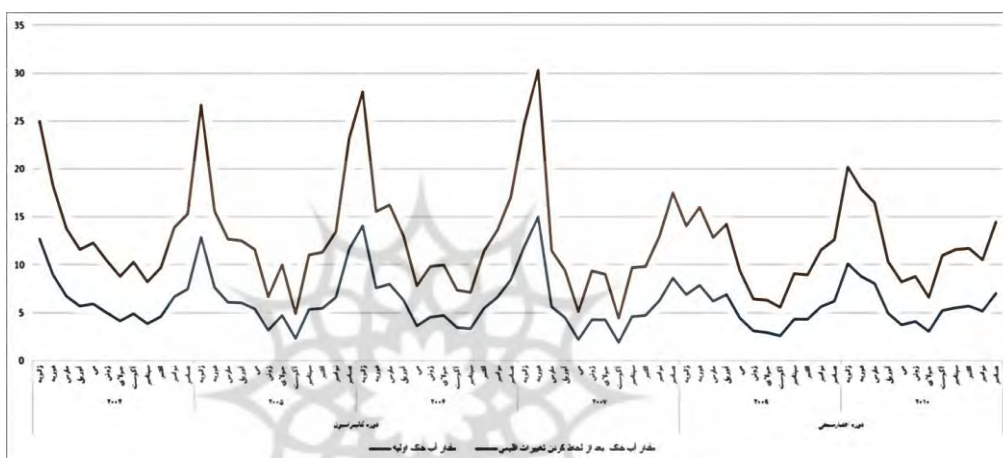
با توجه به اینکه مقدار آب خاک نقش پُراهمیتی در تأمین نیاز آبی گیاهان دارد و این عامل می‌تواند در پراکنش، توزیع، و استقرار پوشش گیاهی تأثیر بسزایی داشته باشد، در این پژوهش ارزیابی شده است. شکل ۱۰ نتایج مقایسه میانگین آب موجود در خاک در دو فاز اجرایی مدل SWAT را نشان می‌دهد. در مورد مقدار آب موجود در خاک مطالعه تغییرات ماهانه این عامل نیز انجام شده که به نتایج ذیل منتهی شده است: شکل ۱۱ مقایسه تغییرات مقدار آب موجود در خاک در زمان اجرای اول مدل SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهد. شکل ۱۲ مقایسه میانگین روزانه (به سال) مقدار آب موجود در خاک در دو دوره مطالعاتی با استفاده از نرم‌افزار SWAT را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. مقایسه میانگین روزانه (به سال) مقدار آب موجود در خاک به دست آمده از اجرای اول مدل SWAT با آب موجود در خاک بعد از در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

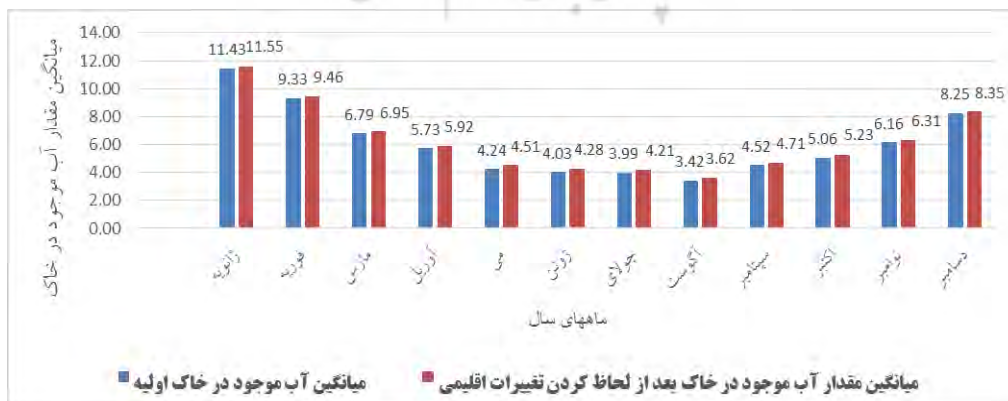


شکل ۱۱. نمودار مقایسه میانگین آب موجود در خاک روزانه (به سال) در زمان اجرای اولیه مدل با اجرای ثانویه آن

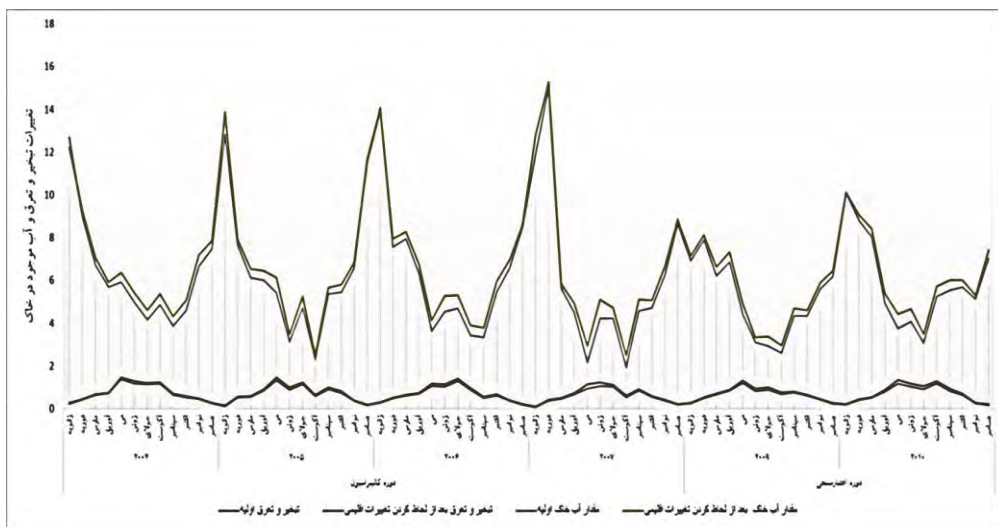


شکل ۱۲. مقایسه تغییرات مقدار آب موجود در خاک در زمان اجرای اول مدل SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی (دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل)

شکل ۱۳ نیز مقایسه میانگین مقدار آب موجود در خاک در ماه‌های مختلف سال و در دو دوره اجرای مدل SWAT در حوضه مطالعاتی را نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیز مقایسه کلی مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل و آب موجود در خاک در زمان اجرای اول مدل SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی این مدل را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. مقایسه میانگین مقدار آب موجود در خاک در ماه‌های مختلف سال و در دو دوره اجرای مدل SWAT



شکل ۱۴. مقایسه کلی مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل و آب موجود در خاک در زمان اجرای اول SWAT و بعد از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی الگوی تغییرات زیست‌محیطی تبخیر و تعرق و مقدار آب موجود در خاک

با توجه به اینکه تبخیر و تعرق واقعی و مقدار آب موجود در خاک نقش درخور توجهی در چرخه هیدرولوژی، آب در دسترس گیاه، افزایش یا کاهش رواناب سالانه، و سایر مؤلفه‌های زیست‌محیطی دارد، در این پژوهش بررسی و مطالعه شده است. شکل ۶ مقایسه میانگین روزانه (به سال) مقدار تبخیر و تعرق واقعی به‌دست‌آمده از اجرای اول مدل SWAT با تبخیر و تعرق واقعی بعد از در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهد. همان‌گونه‌که از نتایج این نمودارها مشخص است، میانگین روزانه (به سال) تبخیر و تعرق در همه دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی دارای افزایشی کلی در همه این دوره‌هاست. با توجه به اینکه این ارقام میانگینی سالانه است، افزایشی هرچند جزئی نشان‌دهنده افزایش درخور توجه در میزان تبخیر و تعرق حوضه تالار، که بالغ بر ۲۱۰/۰۰۰ هکتار است، خواهد بود؛ که از این لحاظ و تأثیر آن بر سایر مؤلفه‌های زیست‌محیطی و هیدرولوژیک قابل بررسی و مطالعه است. شکل ۷ نیز یک نمودار خلاصه‌شده مقایسه میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه (به سال) در زمان اجرای اولیه مدل با اجرای ثانویه پس از لحاظ کردن تغییرات اقلیمی آینده است و نشان‌دهنده این موضوع است که میانگین تبخیر و تعرق واقعی روزانه به سال از ۰/۶۹ به ۰/۷۵ رسیده است؛ این رقم عدد خلاصه‌شده‌ای از مقدار تبخیر و تعرق در ۲۳ زیرحوضه مطالعاتی تالار در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی است که نشان‌دهنده افزایش درخور توجه تبخیر و تعرق با اثرگذاری پارامترهای دما و بارش تغییر یافته در مدل SWAT در دوره‌های آبی است. همچنین، از مطالعه شکل ۸ نیز مشخص می‌شود که تبخیر و تعرق در بیشتر ماه‌های آبی بیشتر از وضعیت امروزی خواهد شد. در این شکل تبخیر و تعرق ماه‌های می، ژوئن، جولای، و آگوست شاخص‌تر است. مطالعه شکل ۹ نیز تأییدکننده نتایج به‌دست‌آمده بالاست. شکل ۱۰ مقایسه میانگین روزانه (به سال) مقدار آب موجود در خاک به‌دست‌آمده از اجرای اول مدل SWAT با آب موجود در خاک بعد از در نظر گرفتن تغییرات اقلیمی در دوره‌های کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل را نشان می‌دهد. بررسی این نمودار نیز نشان‌دهنده روند نامنظم در مقدار کاهش و افزایش آب خاک است که می‌تواند تأثیر بسزایی در تأمین نیاز آبی گیاهان در ماه‌هایی از سال که به آب بیشتری نیاز دارند ایجاد کند. با توجه به اینکه آب موجود در خاک تحت تأثیر

تغییرات ایجادشده در بارش، رواناب سطحی، و تبخیر و تعرق است، این الگوها نشان‌دهنده تغییر رفتار این مؤلفه هیدرولوژیک در دوره‌های آتی در حوضه مورد مطالعه است. شکل ۱۱ مقایسه میانگین آب موجود در خاک روزانه به سال در زمان اجرای اولیه مدل با اجرای ثانویه پس از لحاظ‌کردن تغییرات اقلیمی است که نشان‌دهنده افزایش کلی میانگین این فاکتور از ۶۱۰۷ به ۶۱۴۶ در ۲۳ زیرحوضه این محدوده بالغ بر ۲۱۰/۰۰۰ هکتاری است. با توجه به اینکه این رقم نیز یک عدد کلی است، افزایش هرچند اندک آن در مقیاس حوضه‌ای رقم بسیار بالایی را نشان خواهد داد که می‌تواند بر نظم هیدرولوژیک حوضه، نیاز آبی گیاهان، و سایر مؤلفه‌های زیست‌محیطی منطقه مورد بررسی تأثیر بسزایی داشته باشد. مطالعه شکل ۱۲ نیز به صورت کلی نشان از افزایش مقدار آب خاک در دوره‌های آتی در حوضه مطالعاتی دارد؛ این افزایش نیز در سال‌های مختلف دارای نوساناتی است. همچنین، از مطالعه شکل ۱۳ نیز مشخص می‌شود که کمترین مقدار آب موجود در خاک مربوط به ماه‌های می، ژوئن، جولای، و آگوست است؛ ولی در کل مقدار آب موجود در خاک در طی دوره‌های آتی بیشتر از زمان فعلی خواهد بود که تأییدکننده نتایج به‌دست‌آمده بالاست. و در نهایت مطالعه شکل ۱۴ نیز تأییدی بر رفتار هیدرولوژیک پیش‌بینی‌شده آتی در حوضه مطالعاتی است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده بالا در خصوص تأثیر تغییرات اقلیمی در مؤلفه‌های هیدرولوژیک تبخیر و تعرق پتانسیل و آب موجود در خاک در حوضه مطالعاتی، نتایج این پژوهش را می‌توان با پژوهش‌های سایر محققان در دیگر نقاط مقایسه کرد: لی و همکاران (2015) در مطالعه‌ای تغییرات هیدرولوژیک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در آینده نزدیک با استفاده از مدل REGCM4 را در افریقای جنوبی با کاربرد مدل‌های هیدرولوژیک بزرگ‌مقیاس بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ما در آینده شاهد افزایش دما در افریقای جنوبی و نیز شاهد تغییرات بارش ماه‌های مختلف در زیرحوضه‌های آن منطقه خواهیم بود. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که ما در آینده نزدیک شاهد افزایشی در رواناب و تبخیر و تعرق واقعی حوضه در بخش شرق افریقای جنوبی، موزامبیک جنوبی، و مالاوی خواهیم بود، و براساس آن، کاهش در عوامل ذکرشده در امتداد خشک‌ترین مناطق در محدوده گسترده‌ای از صحرای کالاهاری مشاهده خواهد شد. همین‌طور علائم نیرومند تغییرات اقلیمی در نواحی حاره‌ای مرطوب این قاره در نواحی آنگولا، مالاوی، و جنوب جمهوری کنگو وجود دارد و نشانه‌های بارزی است حاکی از تغییرات اقلیمی در افریقای جنوبی. در تحقیق دیگری ژوو و همکاران (۲۰۱۳: ۵۱) اثرهای تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی حوضه رودخانه کیانتانگ^۱ در شرق چین را ارزیابی کردند. آن‌ها در این پژوهش از نرم‌افزار SWAT در دوره‌های تغییر اقلیم آتی ۲۰۱۱-۲۱۰۰ با استفاده از سه سناریوی انتشار A1B، A2، و B1 استفاده کردند. بر اساس نتایج این تحقیق، در این منطقه تحت همه سناریوها و دوره‌های آتی رواناب کاهش خواهد یافت و کمبود آب در آینده این منطقه به‌ویژه در ماه‌های کم‌آبی مشهود است؛ اگرچه این نتایج با استفاده از سناریوها و دوره‌های مختلف آتی دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای است که باعث افزایش عدم قطعیت در تجزیه و تحلیل نتایج خواهد شد. هاو‌کینگز و همکاران (۲۰۱۵: ۹) تأثیر تغییرات اقلیمی در شرایط هیدرولوژیک فصل تابستان در منطقه نیمه‌خشک جنوب آریزونا را بررسی کردند. آن‌ها در این پژوهش یک مدل GCM با حد بالای سناریوی انتشار را به‌کار بردند. نتایج تحقیقات آن‌ها برای دوره آتی ۲۰۳۱-۲۰۴۰ با سال پایه ۱۹۹۰-۲۰۰۰ برای این حوضه مطالعاتی نشان‌دهنده افزایش درجه حرارت تا ۱/۲ درجه سانتی‌گراد، افزایش ۲/۴ برابر بارش، و افزایش ۳/۱ برابر مقدار دبی رودخانه‌ای در دوره‌های آتی است. این نتایج و تحقیقات بسیار متنوع دیگر در خصوص تغییرات اقلیمی و در سایر نقاط دنیا با روش‌های مختلف، که در این پژوهش به آن‌ها اشاره شده است، مؤید تأثیر این پدیده در شرایط آتی حوضه‌های آبخیز است؛ کما اینکه نتایج محققان به دلایلی

همچون قرارگرفتن منطقه مطالعاتی در مناطق متفاوت آب و هوایی دنیا، استفاده از روش‌های مختلف بررسی این پدیده، و محدوده مورد تحقیق دارای اختلافاتی است؛ ولی در کل شباهت‌های زیادی نیز در اصل موضوع وجود دارد. بر این اساس، با توجه به اینکه از نتایج این پژوهش می‌توان در پژوهش‌های آبی در محدوده مورد مطالعه و سایر مناطق استفاده کرد، پیشنهادهای ذیل می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد: ۱. استفاده از طیف وسیع‌تری از برنامه‌ها مانند GLUE، Parasol و MCMC مدل SWAT برای مقایسه و تأثیر آن در شبیه‌سازی هیدرولوژیک؛ ۲. بررسی تأثیر کاربری زمین و سایر مؤلفه‌های انسانی برای بررسی بهتر موضوع؛ ۳. اجرای مدل SWAT در مناطقی با شرایط اقلیمی مشابه یا متفاوت و بررسی تأثیر آن شرایط در انتخاب و استفاده از مدل؛ ۴. بررسی طیف وسیع‌تری از عوامل زیست‌محیطی منتج از تغییرات اقلیمی؛ ۵. تدوین استراتژی مقابله با اثرهای منفی تغییرات اقلیمی با توجه به نتایج این پژوهش و سایر تحقیقات مرتبط در مناطق مختلف کشور مانند برنامه‌ریزی استفاده از منابع آبی در مواقع مختلف سیلابی یا خشک‌سالی.



منابع

- آبایی، ب. و سهرابی، ت. (۱۳۸۸). ارزیابی عملکرد مدل SWAT در حوضه آبریز زاینده‌رود، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۱۶(۳): ۵۸-۴۱.
- اکبری مجدر، ح.؛ بهره‌مند، ع.؛ نجفی‌نژاد، ع. و احدبردی، ش. (۱۳۹۲). شبیه‌سازی جریان روزانه رودخانه چهل‌چای استان گلستان با مدل SWAT، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۳): ۲۵۹-۲۵۳.
- ذهبیون، ب.؛ گودرزی، م. و مساح بوانی، ع. (۱۳۸۹). کاربرد مدل SWAT در تخمین رواناب حوضه در دوره‌های آبی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۳: ۵۸-۴۳.
- سادات آشفته، پ. و مساح بوانی، ع. (۱۳۸۹). تأثیر تغییر اقلیم بر دبی‌های حداکثر: مطالعه موردی، حوزه آیدوغموش، آذربایجان شرقی، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۴(۵۳): ۳۹-۲۵.
- سلمانی، ح.؛ رستمی خلج، م.؛ محسنی ساروی، م.؛ روحانی، ح. و سلاجقه، ع. (۱۳۹۱). بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر بارش- رواناب در مدل نیمه‌توزیعی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبخیز قزاقلی استان گلستان)، فصل‌نامه علمی- پژوهشی اکوسیستم‌های طبیعی ایران، ۳(۲): ۸۵-۱۰۰.
- عارفی اصل، ا.؛ نجفی‌نژاد، ع.؛ کیانی، ف. و سلمان ماهینی، ع. (۱۳۹۲). تعیین مناطق بحرانی تولید رسوب در آبخیز چهل‌چای استان گلستان با استفاده از مدل SWAT، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۵): ۱۹۳-۲۰۵.
- علیزاده، ا.؛ ایزدی، ع.؛ داوری، ک.؛ ضیایی، ع.ن.؛ اخوان، س. و حمیدی، ز. (۱۳۹۲). برآورد تبخیر- تعرق واقعی در مقیاس سال- حوضه با استفاده از SWAT، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۷(۲): ۲۵۸-۲۴۳.
- گزارش طرح تلفیق آبخیزداری حوضه تالار (۱۳۸۰). دفتر مطالعات و ارزیابی آبخیزها، معاونت آبخیزداری وزارت جهاد کشاورزی.
- Ababei, B. and Sohrabi, T. (2009). Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud Watershed, *J. of Water and Soil Conservation*, 16(3): 41-58.
- Abbaspour, K.C.; Rouholahnejad, B.; Vaghefi, S.; Srinivasan R.; Yang H.; Kløve B. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model, *Journal of Hydrology*, 524: 733-752.
- Abbaspour, K.; Faramarzi, M.; Ghasemi, S. and Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran, *Water Resour. Res.*, 45(10).
- Abbaspour, K.; Schulin, R.; Schlappi, E. and Fluhler, H. (1996). A Bayesian approach for incorporating uncertainty and data worth in environmental projects, *Environ. Model. Assess*, 1: 151-158.
- Akbari Mejdari, H.; Bahremand, A.R.; Najafinejad, A. and Sheikh, V.B. (2013). Assessing the performance of SWAT model in Zayandeh Rud watershed, *J. of Water and Soil Conservation*, 20(3): 253-259.
- Alizadeh, A.; Izady, A.; Davary, K.; Ziaei, A.N.; Akhavan, S. and Hamidi, Z. (2013). Estimation of Actual Evapotranspiration at Regional – Annual scale using SWAT, *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 7(2): 243-258.
- Andrade, M.A.; Mello, C.R. and Beskow, S. (2013). Hydrological simulation in a watershed with predominance of Oxisol in the Upper Grande river region, MG-Brazil, *Rev. Bras. Eng. Agric. Ambient*, 17: 69-76 (in Portuguese).
- Aragão, R.; Cruz, M.A.S.; Amorim, J.R.A.; Mendonça, L.C.; Figueiredo, E.E. and Srinivasan, V.S. (2013). Sensitivity analysis of the parameters of the SWAT model and simulation of the

- hydrosedimentological processes in a watershed in the northeastern region of Brazil, *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, 37: 1091-1102 (in Portuguese).
- Arefi Asl, A.; Najafinejad, A.; Kiani, F. and Salmanmahiny, A. (2013). Identification of critical sediment production regions yield in Chehelchai watershed using SWAT model, *J. of Water and Soil Conservation*, 20(5): 193-205.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.S. and Williams, J.R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment, Part I: Model development, *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 34(1): 73-89.
- Bailey, Ian; Revell, Piers (2015) . *Climate Change, International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2nd edition, Vol. 3, School of Geography, Earth and Environmental Sciences, Plymouth University, Plymouth, UK
- Baker, T.J. ; Miller, S.N. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed, *J. Hydrol*, 486:100-111.
- Bastiaanssen, W.G.M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J.F.; Roerink, G.J. and Van der Val, T. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 2. Validation, *Journal of Hydrology*, 213-229.
- Brown, L.C; T.O. Barnwell, Jr. (1987). The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual.EPA document EPA/600/3-87/007.USEPA. Athens.GA.
- Brzozowski, J.; Miatkowski, Z.; Śliwiński, D.; Smarzyńska, K. and Śmietanka, M. (2011). Application of SWATmodel to small agricultural catchment in Poland, *J. Water Land Dev*, 15: 157-166.
- Chen, Ji. and Yiping, Wua (2012). Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and WaterAssessment Tool (SWAT) through integration of the Topographic Model (Topmodel) features, *Journal of Hydrology*, 420-421: 319-328.
- Christensen, N.S.; Wood, A.W.; Voisin, N.; Lettenmaier, D.P. and Palmer, R.N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin, *Climatic Change*, 62(1): 337-363.
- Davidson, E.A. and Janssens, I.A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change, *Nature*, 440(7081): 165-173.
- Demirel, C.; Mehmet, A; Anabela Venancio, B and Ercan Kahya, C. (2009). Flow forecast by SWAT model and ANN in Pracana basin, Portugal, *Advances in Engineering Software*, 40: 467-473.
- Diabat, M.; Haggerty, R. and Wondzell, S.M. (2013). Diurnal timing of warmer air under climate change affects magnitude, timing and duration of stream temperature change, *Hydrol. Process*, 27(16): 2367-2378.
- Dobler, C.; Bürger, G. and Stötter, J. (2012). Assessment of climate change impacts on flood hazard potential in the Alpine Lech watershed, *J. Hydrol*, 460-461: 29-39.
- Dubrovsky, M. (1996). Validation of the stochastic Weather Generator Met&ROLL, *Meteorogickeo Zpravy*, 49: 12q-1380.
- Durães, F.; Mello, C.R. and Naghettini, M. (2011). Applicability of theSWATmodel for hydrologic simulation in Paraopeba river basin, *MG. Cerne*, 17: 481-488.
- Eum, H. and Simonovic, S.P. (2012). Assessment on variability of extreme climate events for the Upper Thames River basin in Canada, *Hydrol. Process*, 26(4): 485-499.
- Fukunaga D. C. ; Roberto A. C. ;Sidney S. Z. ;Laís T. O.; Marco A, C, C.(2015) Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil ,*Catena* 125: 206–213.
- Wolock, D. and McCabe, G. (1999), Estimates of Runoff Using Water-Balance and Atmospheric General Circulation Models. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(6):1341-1350.

- Hawkins, A; Enrique R.; Vivoni a.; Agustin R.; Giuseppe M. ; Erick ,R; Francina D. (2015) A climate change projection for summer hydrologic conditions in a Gretchen semiarid watershed of central Arizona, *Journal of Arid Environments* 118 , 9-20
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2012). Summary for policymakers. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 1-19.
- Kite, G.W. and Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites hydrological models and field data, *Journal of Hydrology*, 229: 3-18.
- Li , Lu.; Ismaïla D.;Chong ,X.;Frode S.(2015) Hydrological projections under climate change in the near future by RegCM4in Southern Africa using a large-scale hydrological model, *Journal of Hydrology* S0022,1649(15)00378-9
- Milly, P.C.D. (1994). Climate, soil water storage, and the average annual water balance, *Water Resources Research*, 30: 2143- 2156.
- Musaua, J.; Sanga, J.; Gathenyaa, J. and Luedeling, E. (2015). Hydrological responses to climate change inMt, Elgon watersheds, *Journal of Hydrology: Regional Studies, Contents lists available at ScienceDirect, Journal of Hydrology: Regional Studies* (In Press).
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; King, K.W. and Williams, J.R. (2005). Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Theoretical Documentation, Blackland ResearchCenter, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas (BRC Report02-05).
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Srinivasan, R. and Williams, J.R. (2000). Soil and water assessment tool user's manual – version 2000, Soil and Water Research Laboratory, *Agricultural Research Service*, Grassland, 808 East Blackland Road, Temple, Texas.
- Qiao, L.; Chris B.; Zou, R.; Elaine S.(2015) Calibration of SWAT model for woody plant encroachment using paired experimental watershed data, *Journal of Hydrology* 523 : 231–239
- Sadat Ashofteh, P. and Massah Bovani, A. (2009). Uncertainty of Climate Change Impact on the Flood Regim, Case Study: Aidoghmoush Basin, East Azerbaijan, Iran, *Iran-Water Resources Researc*, 14(53): 25-39.
- Safeeq, M. and Fares, A. (2012). Hydrologic response of a Hawaiian watershed to future climate change scenarios, *Hydrol. Process*, 26(18): 2745-2764.
- Salmani, H.; Rostami Khalaj, M.; Mohseni Saravi, M.; Rohani, H. and Salajeghe, A. (2012). Optimimization of afecte parameter on runoff-precipitatuion in SWAT model(case study in ghazaghely watershed of golestan province), *Quarterly Natural Ecosystems of Iran*, 3(2): 85-100.
- Semenov, M.A. and Brooks, R.J. (1999). Spatial interpolation of the LARSWG stochastic weather generator in great Britain, *Climate Research*, 11: 137-148.
- Singh V.; Niteenkumar B.; Sagar S.; Apurba K.; Sharma,j.(2013) Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP, *CURRENT SCIENCE*, VOL. 104, NO. 9: 1187-1199.
- Talar watershed combining project report (2001). Watershed assessment and study registry, *Watershed assistant of Jihade-Agricultural Ministry of Iran*.
- Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment (TGICA) Intergovernmental Panel on Climate Change.June (2007). *General Guidelines On The Use Of Scenario Enario Data For Climate IMPACT And Adaptation Assessment Version 2*, Prepared by T.R.

- Thampi, S.G.; Raneesh, K.Y. and Surya, T.V. (2010). Influence of scale on SWAT model calibration for streamflow in a river basin in the humid tropics, *Water Resour. Manag.*, 24: 4567-4578.
- Tian, Y.; Xu, Y.P. and Zhang, X. (2013). Assessment of climate change impacts on river high flows through comparative use of GR4J, HBV and Xinanjiang models, *Water Resour. Manage*, 27 (8): 2871-2888. in Spain: *Water resources, agriculture and land, Journal of Hydrology*, 518: 243-249.
- Wang, D.; Hejazi, M.; Cai, X. and Valocchi, A.J. (2011). Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois, *Water Resour. Res.*, 47(9).
- Wellen C.; George B.; Tanya, L.; Duncan, B.; (2014) Quantifying the uncertainty of nonpoint source attribution in distributed water quality models: A Bayesian assessment of SWAT's sediment export Predictions, *Journal of Hydrology* 519 : 3353-3368
- William, J.R. and Hann, R.W. (1972). HYMO, a problem oriented computer language for building computer models, *Water Resour. Res.*, 8(1): 79-85.
- Wolock, D. and McCabe, G. (1999). Estimates of Runoff Using Water-Balance and Atmospheric Xu, Y.P.; Zhang, X. and Tian, Y. (2012). Impact of climate change on 24-h design rainfall depth estimation in Qiantang River Basin, *East China, Hydrol. Process.*, 26(26): 4067-4077.
- Xu, Y.P.; Zhang, X.; Ran, Q. and Tia, Y. (2013). Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China, *Journal of Hydrology*, 483: 51-60.
- Yang, J.; Reichert, P.; Abbaspour, K.C. and Yang, H. (2007). Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference, *Journal of Hydrology*, 340: 167-182.
- Yeh, William. W.-G. (1986). Review of parameter identification procedures in ground water hydrology: The inverse problem, *Water Resour. Res.*, 22: 95-108.
- Yu, Pao-Shan; Tao-Chang, Y. and Chih-Kang, W. (2002). Mpaact of climate change on water resources in southern Taiwan, *J. Hydrol*, 260: 161-175.
- Zahbion, B.; Goodarzi, M. and Massah Bouani, A.R. (2010). Using of SWAT model for assume of runoff in the future duration effecting of climate change, *Journal of climate research*, 3(4): 43-58.
- Zhang, X.; Yue, X.; Guangtao, F. (2014) Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change. *Journal of Hydrology*. 515, 205-222.