

شبیه‌سازی هیدرولوژیک مناطق کوهستانی با استفاده از مدل SWAT

یاسر سبزواری و سعید اسلامیان^{*۱}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۶/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۵)

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی قابلیت شبیه‌سازی هیدرولوژیک محدوده ازنا - الیگودرز است که در بالادست حوضه کارون بزرگ و شرق استان لرستان واقع است. برای انجام این پژوهش از اطلاعات روزانه هواشناسی مربوط به ایستگاه سینوپتیک الیگودرز و بارش ایستگاه‌های باران‌سنج کمندان و دره تخت در بازه ۲۰۲۳-۱۹۹۱، دبی مشاهداتی مربوط به ایستگاه هیدرومتری ماربره در بازه ۱۹۹۱-۲۰۲۱ و نقشه خاک، کاربری اراضی و ارتفاعی حوضه ازنا - الیگودرز استفاده شد. دوره ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ به منظور وارم‌آپ مدل، واسنجی از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۶ و دوره صحت‌سنجی از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ در نظر گرفته شد. بر اساس شبیه‌سازی انجام‌شده در این منطقه، مدل دارای ضعف در شبیه‌سازی بود. بعد از شبیه‌سازی اولیه اقدام به واسنجی مدل شد. پس از تحلیل حساسیت پارامترهای مختلف، ۲۲ پارامتر مؤثر انتخاب و مدل واسنجی شد. نتایج ارزیابی نشان داد برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، مقدار NSE به ترتیب برابر ۰/۶۰ و ۰/۵۶ و مقدار ضریب R^2 به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۷۸ به دست آمد. بر اساس ضرایب به دست آمده در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مشخص شد که مدل به طور کلی دارای دقت رضایت‌بخش در شبیه‌سازی هیدرولوژیک محدوده ازنا - الیگودرز بود.

واژه‌های کلیدی: رواناب، سردسیر، ازنا - الیگودرز، SWAT

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

*. مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saeid@iut.ac.ir

مقدمه

در مناطق با اقلیم سرد، فرایندهای هیدرولوژیک تحت تأثیر اقلیم منطقه قرار می‌گیرند. در این گونه مناطق فرایندهای ویژه‌ای مانند برف به وقوع می‌پیوندد (۱۶). به دلیل تابش زیاد خورشید در تمام طول سال، برف در عرض چند روز ذوب می‌شود. ذوب زود هنگام برف‌های زمستانی متأثر از شرایط اقلیمی، می‌تواند باعث تغییر در اوج جریان رودخانه‌ها در فصل زمستان و اوایل فصل بهار شود (۸، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۳۰ و ۳۱). همه این تغییرات که در اقلیم سرد رخ می‌دهد، دارای تأثیرات اقتصادی و اجتماعی است که بایستی به آن توجه کرد (۳۰ و ۳۲). این در حالیست که در مطالعات، این فرایندها در نظر گرفته نمی‌شود؛ بنابراین برای مطالعه هیدرولوژیک دقیق‌تر در مناطق سرد، لازم است از طریق چارچوب یا مدل‌هایی که با ساده‌سازی واقعیت و پارامترسازی در آن ایجاد می‌شوند، این فرایندها در نظر گرفته شود. ساده‌سازی و پارامترسازی برای فرایندهای پیچیده حوضه، ایجاد توافق بین واقعیت و مدل است که هدف اصلی، انعکاس هرچه بهتر واقعیت فیزیکی است (۳۲).

مدل‌های هیدرولوژی به‌منظور مطالعه و ارزیابی فرایندهای هیدرولوژی و تغییرات آن‌ها توسعه داده شده‌اند (۱۴ و ۱۷). به‌طور کلی مدل‌های هیدرولوژی به دو دسته تصادفی (Stochastic) و قطعی (Deterministic) تقسیم می‌شوند (۱۱، ۲۴ و ۲۸). مدل‌های قطعی خود به سه دسته از لحاظ پیچیدگی تقسیم می‌شوند که شامل مدل‌های داده‌محور (Data driven) (معروف به جعبه سیاه)، مفهومی (Conceptual model) (معروف به جعبه خاکستری) و فیزیکی (Physical based model) (معروف به جعبه سفید) هستند (۲۴، ۲۳، ۴). از جمله مدل‌های مفهومی می‌توان مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool) را نام برد (۵).

مدل SWAT یک مدل در مقیاس حوضه، فیزیکی و نیمه توزیعی است که گام زمانی آن روزانه است و بر اساس توانایی آن در شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک مختلف، در سراسر جهان و اقلیم‌های مختلف استفاده می‌شود (۵)؛ به‌طوری که در

حدود ۴۳۰۰ مطالعه استفاده شده است (۹). این مدل از روابط ساده‌شونده‌ای برای ارائه فرایندهای هیدرولوژی استفاده کرده و به داده‌های ورودی نقشه رقومی (DEM)، نقشه خاک‌شناسی، نقشه کاربری اراضی، بارش، درجه‌حرارت کمینه، درجه‌حرارت بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی نیاز دارد. مطالعات متعددی از مدل SWAT برای ارزیابی تغییرات هیدرولوژیک در مناطق سردسیر استفاده کرده‌اند. سانترا و داس (۲۶) با استفاده از مدل هیدرولوژیک SWAT، اقدام به شبیه‌سازی رواناب در حوضه چیلیکا در هند کردند و نشان دادند که مدل دارای دقت رضایت‌بخشی در شبیه‌سازی بوده است. ژیانگ و همکاران (۱۸) اثرهای تغییرات آب‌وهوایی بر جریان فصلی و سالانه در حوضه رودخانه نیکولت، جنوب قبرس را با استفاده از مدل ArcSWAT مطالعه کرد. نتایج حاکی از افزایش ۱۳ درصدی در اوج جریان در سال بود. این تغییر در اوج جریان به دلیل روند افزایشی ذوب زودتر برف در اواخر زمستان و اوایل بهار بود. شاهویی و همکاران (۲۷) با استفاده از مدل هیدرولوژیک SWAT، اقدام به شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در حوضه روانسر سنجایی استان کرمانشاه در ایران کردند و نشان دادند که مدل دارای دقت عالی در شبیه‌سازی بوده است. تاداس و همکاران (۲۹) سازگاری مدل SWAT را در یک منطقه جنگلی کوهستانی کوچک در کشور رومانی بررسی کردند. این پژوهش نشان داد که مدل SWAT می‌تواند در حوضه‌های کوچک با داده اندازه‌گیری نشده پس از پارامترسازی مناسب به‌کار برده شود. نادری و همکاران (۲۲) با استفاده از مدل SWAT، تأثیر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبخیز گرین در استان لرستان در غرب ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد در اثر تغییر اقلیم (بارش و دما) در سال‌های ۲۰۵۰-۲۰۴۲، میزان رواناب نسبت به دوره ۲۰۱۰-۲۰۰۰ کاهش می‌یابد. آرتیمانی و همکاران (۶) مدل SWAT را برای تعیین مؤلفه‌های بیلان آب حوضه آبخیز گاماسیاب در استان لرستان در ایران ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، ۲۸ درصد کل بارش حوضه به‌صورت رواناب از حوضه خارج شده که با داده

مربوط به بخش‌های خروجی حوضه و بیشترین ارتفاع محدوده ۳۷۴۶ متر از سطح دریا، مربوط به قسمت‌های شمالی و جنوب غربی حوضه است. متوسط دمای سالانه این حوضه در دشت ۱۱/۹۲ و متوسط دمای سالانه ارتفاعات ۱۰/۱۱ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارش سالانه در دشت‌های این محدوده ۹۲۰/۶ میلی‌متر، میانگین بارندگی ارتفاعات آن ۹۲۷/۲ میلی‌متر در سال (۲۰) و متوسط دبی سالانه ایستگاه هیدرومتری دره تخت ۱/۵۳۲ و در ایستگاه هیدرومتری کمندان ۱/۴۷۴ مترمکعب بر ثانیه است (۱۲). شکل ۱ نشان‌دهنده موقعیت جغرافیایی الیگودرز در لرستان و کشور است.

آمار و اطلاعات و داده‌های مورد استفاده

داده‌های ورودی مورد استفاده شامل داده‌های هواشناسی بارش، درجه‌حرارت کمینه، درجه‌حرارت بیشینه، متوسط رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی به‌صورت روزانه مربوط به ایستگاه سینوپتیک الیگودرز و بارش ایستگاه‌های باران‌سنج کمندان و دره تخت در بازه ۲۰۲۳-۱۹۹۱، دبی مشاهداتی مربوط به ایستگاه هیدرومتری ماربره در بازه ۱۹۹۱-۲۰۲۱ و نقشه خاک، کاربری اراضی و ارتفاعی حوضه ازنا - الیگودرز است. این اطلاعات از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو گرفته شد.

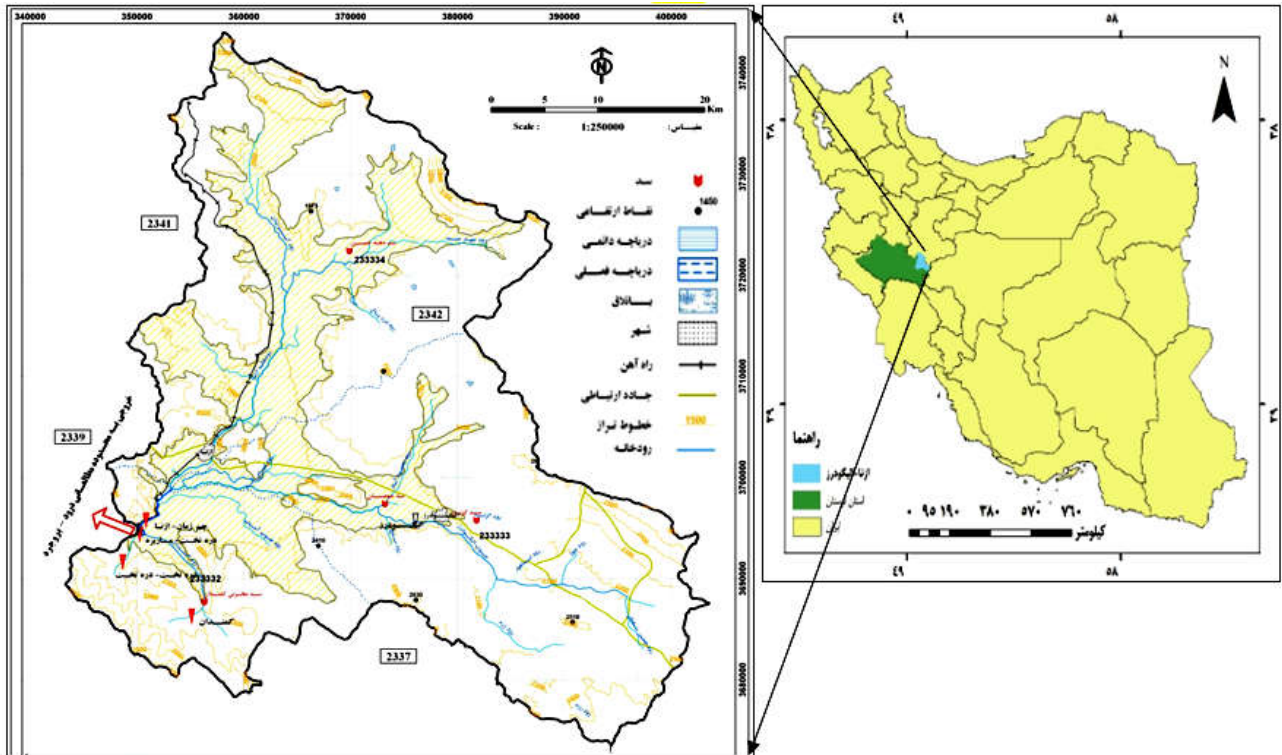
ایستگاه سینوپتیک الیگودرز به‌عنوان ایستگاه معرف حوضه شناخته شده که طبق اطلاعات در این ایستگاه، ۹۹ روز یخبندان اتفاق می‌افتد و به‌طور متوسط دارای تعداد ساعات آفتابی کمی به میزان ۲۷۴۹/۷ ساعت است. جدول ۱ خلاصه‌ای از اطلاعات اقلیمی ایستگاه سینوپتیک الیگودرز را در بردارد. از ایستگاه آب‌سنجی دره تخت - ماربره که در خروجی این محدوده قرار دارد، برای محاسبه خروجی استفاده شده که مبنای واسنجی مدل نیز این ایستگاه قرار گرفته است. میزان حجم جریان سطحی خروجی که از طریق آمار بلندمدت ایستگاه یادشده به‌دست می‌آید، ۲۰۴/۷ میلیون مترمکعب برآورد می‌شود. زهکش اصلی این محدوده، ماربره بوده و رودخانه‌های ازنا، الیگودرز، دره تخت و کمندان از رودخانه‌های مهم این محدوده هستند.

مشاهداتی در ایستگاه آب‌سنجی خروجی حوضه مطابقت دارد. بیرانوند و همکاران (۷) با تلفیق مدل SWAT و مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG5.5، اثرهای هیدرولوژیک تغییر اقلیم را در حوضه آبخیز رودخانه خرم‌آباد در لرستان ارزیابی کردند. رضایی و همکاران (۲۵) با تلفیق مدل SWAT با مدل اقلیمی SDSM و مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، اثرهای تغییر اقلیم را بر منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز خرم‌آباد در لرستان، غرب ایران بررسی کردند. نتایج نشان داد که در آینده، رواناب و تغذیه آب زیرزمینی، ذخیره آبخوان کم‌عمق و عمیق کاهش و تبخیر و تعرق افزایش خواهد یافت. حسن‌پور و همکاران (۱۵) از مدل SWAT برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هیدرولوژیک در حوضه رودخانه خرم‌آباد در لرستان استفاده کردند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب این مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی است. بررسی مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که در مناطق مختلف، پارامترهای هیدرولوژیک متأثر از اقلیم منطقه و ویژگی‌های آن است. این تغییرات در روندهای هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب مهم است. این امر لزوم مدل‌سازی فرایندهای هیدرولوژیک و ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیک در اقلیم‌های مختلف به‌ویژه اقلیم سرد که پدیده‌هایی مانند ذوب برف اتفاق می‌افتد، را ضروری می‌سازد؛ بنابراین هدف پژوهش حاضر، به‌کارگیری و ارزیابی مدل SWAT در اقلیم سرد الیگودرز در غرب ایران است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در حوضه ازنا - الیگودرز واقع در شرق استان لرستان انجام می‌شود. محدوده مطالعاتی ازنا - الیگودرز یکی از محدوده‌های مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ بوده و با وسعت به نسبت زیاد به میزان ۲۱۸۹/۱ کیلومترمربع در شمال حوضه واقع شده است. ۶۰۳/۲۷ کیلومترمربع از وسعت محدوده را دشت و ۱۵۸۵/۸۳ کیلومترمربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می‌دهند. کمترین ارتفاع محدوده ۱۸۱۸ متر،



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی الیگودرز در کشور

جدول ۱. اطلاعات اقلیمی ایستگاه سینوپتیک الیگودرز به عنوان معرف محدوده ازنا - الیگودرز (۲۰)

ایستگاه	متوسط دما (°C)	متوسط رطوبت (%)	بارش (mm)	بیشینه بارش ۲۴ ساعته	تبخیر (mm/day)	ساعات آفتابی واقعی (hour)	یخبندان (day)	تقسیم‌بندی اقلیمی
الیگودرز	۱۲/۴	۴۰	۳۸۷/۳	۷۰/۴	۲۰۴۸/۲	۲۷۴۹/۷	۹۹	نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد

در جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌ها شامل طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، سال تأسیس و نوع ایستگاه ارائه شده است.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های واقع در محدوده مطالعاتی ازنا - الیگودرز

نام ایستگاه	تحت پوشش	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (m)	سال تأسیس	نوع ایستگاه
الیگودرز	سازمان هواشناسی	۴۹° ۴۲'	۳۳° ۲۴'	۱۹۸۰	۱۳۶۴	سینوپتیک
کمندان	وزارت نیرو	۴۹° ۲۵' ۳۶"	۳۳° ۱۸' ۱۴"	۲۰۵۰	۱۳۴۶	باران‌سنجی
دره تخت	وزارت نیرو	۴۹° ۲۲' ۲۳"	۳۳° ۲۱' ۱۴"	۱۹۴۰	۱۳۳۴	باران‌سنجی
ماربره	وزارت نیرو	۴۹° ۲۴' ۶"	۳۳° ۲۲' ۵۲"	۱۸۲۰	۱۳۳۷	آب‌سنجی

آمارای ثابت هستند، سودمند است؛ زیرا دارای پایه فیزیکی است و می‌تواند از داده‌های ورودی به‌راحتی برای محاسبات کارآمد استفاده کند. این مزیت برای حوضه‌های آبخیز بزرگ با هزینه کم و کمترین زمان سرمایه‌گذاری قابل استفاده است.

در این پژوهش از SWAT نسخه ۲۰۱۲ استفاده شده است که تغییراتی را در قالب ورودی داده‌های آب‌وهوایی در مقایسه با نسخه‌های قبلی (۲۰۰۵ و ۲۰۰۹) معرفی کرد. گفتنی است که مراحل واسنجی و صحت‌سنجی از نسخه ۲۰۱۲ حذف شده است و اکنون با استفاده از نرم‌افزار SWAT-CUP قابل انجام است. علاوه بر این، این نسخه از SWAT را می‌توان در محیط ArcGIS پیاده‌سازی کرد. گفتنی است که نرم‌افزار SWAT به‌طور مستمر بروزرسانی و تجدید نظر می‌شود تا قابلیت‌های آن افزایش یابد و آن را به ابزاری در حال تکامل در این زمینه تبدیل کند.

اطلاعات مورد نیاز برای اجرای مدل SWAT عبارت‌اند از: داده‌های اقلیمی و هواشناسی بارش، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و نقشه مدل ارتفاعی رقوم، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و همچنین نقشه شیب حوضه که از نقشه مدل ارتفاعی رقوم در هنگام اجرای مدل ساخته می‌شود. به‌علاوه نقشه شبکه آبراه‌ها برای اجرای مدل نیاز است که توسط خود مدل SWAT تولید شده یا توسط نرم‌افزارهای دیگر به مدل اضافه می‌شود. داده‌های اقلیمی یادشده در این پژوهش به‌صورت روزانه طی دوره اول ژانویه ۱۹۹۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۳ و به فرمت txt برای ایستگاه سینوپتیک لیگودرز تهیه شده و وارد نرم‌افزار شد. مدل SWAT برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی و همچنین تخمین داده مفقودشده برای مدل‌سازی از مولد WGEN (Weather Generator) استفاده می‌کند که در پایگاه داده‌های مدل در فایل به نام Wgen.user اضافه می‌شود.

SWAT چرخه هیدرولوژی را در دو مرحله شبیه‌سازی می‌کند: ۱- فاز زمین چرخه هیدرولوژی که شامل: هیدرولوژی، رسوب عناصر غذایی، کنترل‌کننده مقدار آب و بار آفت‌کش‌ها در کانال اصلی بوده و ۲- روندیابی چرخه هیدرولوژی یا فاز آب که شامل: حرکت آب، رسوب و سایر موارد در کانال خروجی است.

میزان تولید آب در محدوده مطالعاتی ازنا - لیگودرز تنها ناشی از بارندگی و جریان‌های سطحی خارج‌شده از ارتفاعات است که وارد پهنه دشت‌ها می‌شود. این محدوده در شمال شرق حوضه آبریز دز واقع شده و وسعت آن ۲۱۸۸ کیلومترمربع است که ۱۵۸۶ کیلومترمربع از مساحت آن را ارتفاعات تشکیل می‌دهند.

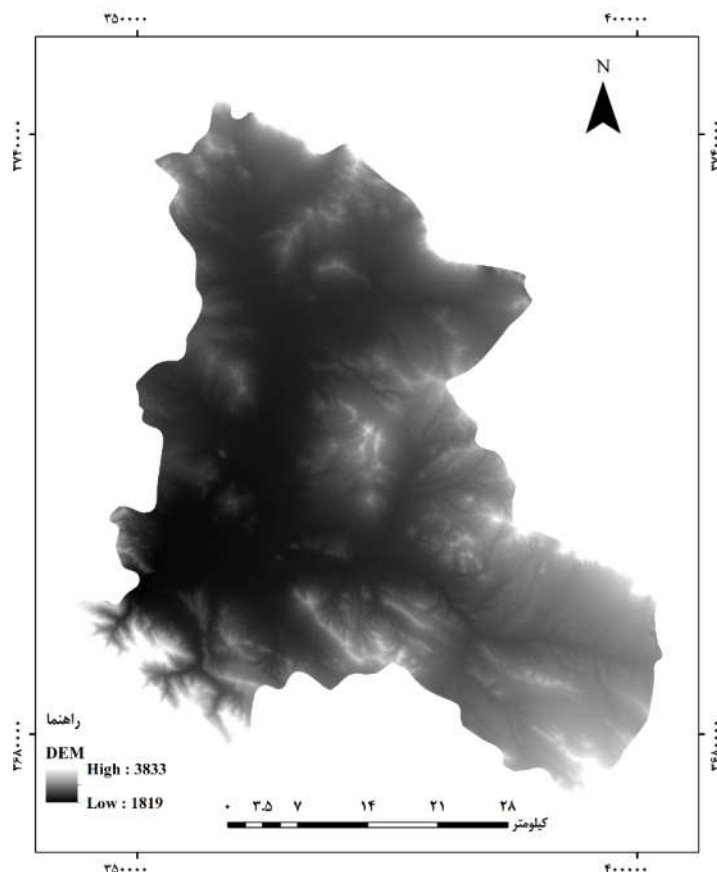
در مطالعه به‌منظور بررسی عملکرد مدل SWAT در منطقه کوهستانی پس از اقدام به گردآوری اطلاعات و آمار مورد نیاز، مدل‌سازی با مدل SWAT انجام می‌شود. در مدل SWAT ابتدا از روی نقشه مدل رقوم ارتفاع، حوضه اصلی به تعدادی زیر حوضه تقسیم می‌شود. سپس با ترکیب سه نقشه کاربری اراضی، نوع خاک و نقشه رقوم ارتفاعی (DEM) و طبقه‌بندی شیب، زیر حوضه‌ها نیز به واحدهای کوچک‌تری تقسیم می‌شوند که به هرکدام از این واحدها یک واحد پاسخ هیدرولوژیک (HRU) گفته می‌شود. در ابتدا نیاز است تا نقشه ارتفاعی منطقه مطالعاتی برای تعیین وضعیت هیدرولوژیک و آبراهه‌های منطقه به مدل داده شود. شکل ۲ نشان‌دهنده نقشه ارتفاعی منطقه است.

روش اجرای کار

در این پژوهش دوره زمانی مورد مطالعه ۲۰۲۱-۱۹۹۱ در نظر گرفته شد که دوره ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ به‌منظور دست‌گرمی مدل (شامل اجرای تعداد کم مدل برای مقداردهی اولیه همه اجزا)، دوره واسنجی از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۱۶ و دوره صحت‌سنجی از ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۱ در نظر گرفته شد.

مدل هیدرولوژیک SWAT

مدل SWAT که توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده توسعه یافته است، یک مدل جامع در مقیاس حوضه است که برای پیش‌بینی اثرهای شیوه‌های مدیریت مختلف بر رسوب، جریان آب، مواد مغذی و تعادل شیمیایی در دوره‌های طولانی طراحی شده است. این مدل یک چارچوب قوی برای ارزیابی اثرهای کاربری‌های مختلف زمین و شرایط خاک ارائه می‌دهد. مدل نیمه توزیعی SWAT برای حوضه‌هایی که فاقد داده‌های



شکل ۲. نقشه ارتفاعی (DEM) محدوده مطالعاتی

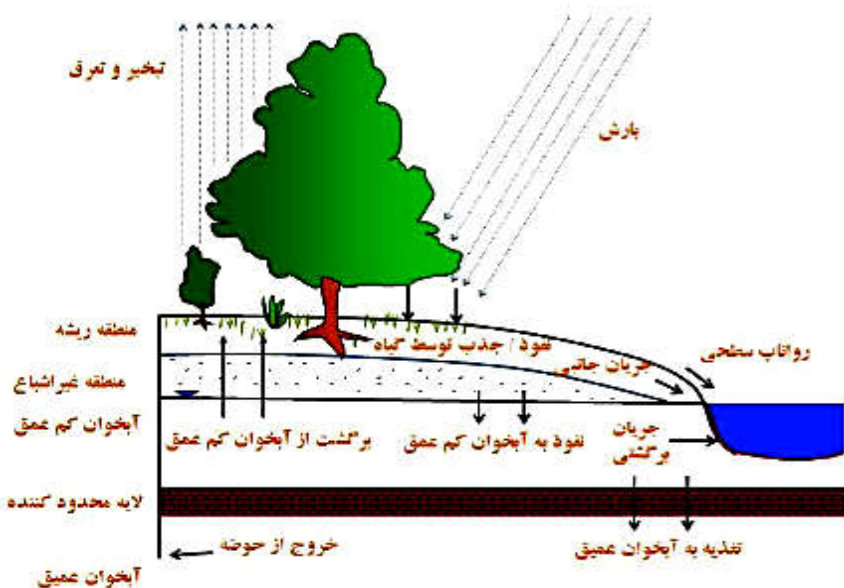
آم (برحسب میلی‌متر)، W_{seep} مقدار نشست در روز آم که از نیم‌رخ خاک وارد منطقه غیراشباع می‌شود، t زمان بر حسب روز و Q_{gw} مقدار آب برگشتی در روز آم (برحسب میلی‌متر) است. در این مدل هر حوضه به زیرحوضه و هر زیرحوضه به واحدهای کوچک‌تری که واحدهای واکنش هیدرولوژیک ((Hydrologic Response Unit) HRU نام دارد، طبقه‌بندی می‌شوند. هر یک از این واحدها تا حد ممکن از نظر خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی مشابه هستند. در مدل باتوجه‌به مشخصات حوضه و شرایط موجود، مسیرهای مختلف برای حرکت آب در حوضه پیش‌بینی می‌شود که می‌توان باتوجه‌به داده‌های ورودی مناسب که شامل دمای هوا، بارش، رطوبت و سایر موارد است، خروجی مد نظر از این مدل را دریافت کرد. برآورد رواناب سطحی یک جنبه حیاتی است که در این مطالعه با استفاده از مدل SWAT به آن پرداخته شده است. این مدل از

فاز زمین چرخه هیدرولوژی

مدل هیدرولوژیک SWAT از معادله بیلان آب (معادله ۱) برای شبیه‌سازی فرایندهای مختلف چرخه هیدرولوژیک استفاده می‌کند. این فرایندها شامل رواناب سطحی، نفوذ سطحی، تبخیر و تعرق، ذوب برف، جریان آب زیرزمینی، نفوذ عمیق و جریان‌های زیرسطحی است. چرخه هیدرولوژیک در مدل SWAT در شکل ۳ نشان داده شده است. معادله (۱) معادله بیلان آب را در مدل SWAT نشان می‌دهد (۲):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{sur} - E_a - W_{seep} - Q_{qw}) \quad (1)$$

در این معادله، SW_t مقدار نهایی رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر)، SW_0 مقدار اولیه رطوبت خاک (برحسب میلی‌متر)، R_{day} مقدار بارش در روز آم (برحسب میلی‌متر)، Q_{surf} مقدار رواناب سطحی در روز آم، E_a مقدار تبخیر و تعرق در روز



شکل ۳. چرخه هیدرولوژیک در مدل نیمه توزیعی SWAT (۱)

ب- روش گرین - آمپت

روش گرین - آمپت رطوبت خاک را به‌طور یکنواخت و پروفیل خاک را به‌صورت همگن فرض می‌کند. سرعت نفوذ در این روش بر اساس معادله (۴) قابل محاسبه است (۱):

$$f_{inf it} = K_e \left(1 + \frac{\Psi_{wf} \Delta \theta_v}{F_{inf it}} \right) \quad (4)$$

در این معادله، $f_{inf it}$ سرعت نفوذ در زمان t (برحسب میلی‌متر بر ساعت)، Ψ_{wf} پتانسیل ماتریک جبهه رطوبتی (برحسب میلی‌متر)، $\Delta \theta_v$ تغییرات حجمی رطوبت خاک در جبهه رطوبتی (میلی‌متر بر میلی‌متر)، $F_{inf it}$ نفوذ تجمعی در زمان t (برحسب میلی‌متر بر ساعت) و K_e هدایت هیدرولیکی مؤثر (برحسب میلی‌متر بر ساعت) است که بر اساس معادله (۵) به‌دست می‌آید (۱):

$$K_e = \frac{56.82 K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 e^{(0.062 CN)}} - 2 \quad (5)$$

در این معادله، k_{sat} هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (برحسب میلی‌متر بر ساعت) و CN شماره منحنی است.

پ- بیشینه شدت رواناب

بیشترین مقدار روانابی که در هر بارندگی رخ می‌دهد را بیشینه

دو روش شامل شماره منحنی و گرین - آمپت، برای تخمین رواناب سطحی و نفوذ استفاده می‌کند. بخش پایانی مطالعه محاسبه بیشینه شدت رواناب را پوشش خواهد داد (۱).

الف- روش شماره منحنی

روش شماره منحنی در سال ۱۹۵۰ برای محاسبه رواناب توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) به وجود آمد. در معادله (۲) رواناب سطحی بر اساس روش شماره منحنی محاسبه می‌شود (۱):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a) + S} \quad (2)$$

در این معادله، Q_{surf} عمق رواناب سطحی (برحسب میلی‌متر)، R_{day} عمق بارش روزانه (برحسب میلی‌متر)، I_a نگهداشت اولیه که شامل: برگاب، میزان نفوذ پیش از شروع رواناب و ذخیره سطحی است (برحسب میلی‌متر) و S نگهداشت است که طبق معادله (۳) به‌دست می‌آید (۱):

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

در این معادله، CN شماره منحنی حوضه آبریز است که به ویژگی‌های فیزیکی آن بستگی داشته و عددی بین ۰ تا ۱۰۰ دارد.

حساسیت و عدم قطعیت مدل SAWT طراحی شده است. این نرم‌افزار دارای قابلیت‌ها و الگوریتم‌های متفاوت برای این منظور است. از بین پنج الگوریتم ParaSol، MCMC، GLUE، SUFI2 و PSO که برای واسنجی در نرم‌افزار SWAT-CUP قرار دارد، در این پژوهش از الگوریتم SUFI2 برای تحلیل عدم قطعیت و حساسیت و همچنین واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT استفاده می‌شود. برای اجرای نرم‌افزار SWAT-CUP نیاز به داده‌های مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری که به صورت داده‌های دبی روزانه (برحسب مترمکعب بر ثانیه) ثبت شوند، است.

معیارهای ارزیابی

ارزیابی عملکرد مدل SWAT به‌طور خودکار با استفاده از نرم‌افزار SWATCUP انجام شد. الگوریتم SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting نسخه ۲) را از چهار رویه مجزا ارائه شده توسط SWAT-CUP، به دلیل توانایی آن در بهینه سازی پارامترها با حداقل تکرار انتخاب کردیم. مزیت دیگر این است که این روش هم عدم قطعیت مدل و هم عدم قطعیت بین پارامترهای SWAT و پارامترهای اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرد. پارامترهای زیر به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژیک برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد: ضریب تعیین (R^2) و کارایی مدل نش - ساتکلیف (NSE) با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شود (۱، ۲ و ۲۱). انتخاب یک شاخص آماری چندگانه باید "احتمال تفسیر ترکیبی عملکرد مدل را افزایش دهد". R^2 درجه هم خطی را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده منعکس می‌کند. این شاخص بین ۰ و ۱ قرار دارد. اگر این شاخص صفر باشد، هیچ همبستگی را توصیف نمی‌کند و اگر یک باشد، همبستگی کامل را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب نش - ساتکلیف بین منفی ∞ تا ۱ قرار دارد که هرچه مقدار به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر دقت زیاد شبیه‌سازی است. علاوه بر این، عملکرد مدل با استفاده از ضریب p و ضریب r ارزیابی شد. ضریب p کسری از داده‌های دو باند شده توسط باند PPU۹۵ را نشان می‌دهد؛ درحالی که

شدت رواناب گویند که با استفاده از معادله (۶) قابل محاسبه است (۱):

$$q_{\text{peak}} = \frac{a_{\text{tc}} Q_{\text{surf}} A}{3.6 t_{\text{conc}}} \quad (6)$$

در این معادله، q_{peak} بیشینه شدت رواناب (برحسب مترمکعب بر ثانیه)، a_{tc} بخشی از بارش روزانه که در طول زمان تمرکز می‌یابد (بدون بعد)، Q_{surf} عمق رواناب سطحی (برحسب میلی‌متر)، A مساحت زیرحوضه (برحسب کیلومتر مربع) و t_{conc} زمان تمرکز زیرحوضه (برحسب ساعت) است که طبق معادله (۷) به دست می‌آید (۱):

$$t_{\text{conc}} = t_{\text{ov}} + t_{\text{ch}} \quad (7)$$

در این معادله، t_{ch} زمان تمرکز برای جریان در آبراهه‌ها (برحسب ساعت) و t_{ov} زمان تمرکز برای جریان سطحی (برحسب ساعت) است که طبق معادله (۸) به دست می‌آید (۳):

$$t_{\text{ov}} = \frac{L_{\text{slp}}}{3600 v_{\text{ov}}} \quad (8)$$

در این معادله، L_{slp} طول شیب حوضه (برحسب متر) و v_{ov} سرعت جریان روی سطح زمین (برحسب متر بر ثانیه) است که طبق معادله (۹) به دست می‌آید (۱):

$$v_{\text{ov}} = \frac{0.005 L_{\text{slp}}^{0.4} \text{slp}^{0.3}}{n^{0.6}} \quad (9)$$

در این معادله، slp متوسط شیب زیرحوضه (برحسب متر) و n ضریب زبری مانینگ است.

به‌علاوه برای محاسبه زمان تمرکز جریان در آبراهه‌ها از معادله (۱۰) استفاده می‌شود (۱):

$$t_{\text{ch}} = \frac{0.62 \text{Ln}^{0.75}}{A^{0.125} \text{slp}_{\text{ch}}^{0.375}} \quad (10)$$

در این معادله، slp_{ch} شیب کانال (برحسب متر بر متر)، A مساحت زیرحوضه (برحسب کیلومتر) و L طول کانال از دورترین نقطه تا خروجی زیر حوضه (برحسب کیلومتر) است.

ابزارهای واسنجی، صحت‌سنجی، حساسیت‌سنجی و تحلیل

عدم قطعیت در نرم‌افزار SWAT-CUP

نرم‌افزار SWAT-CUP به‌منظور واسنجی، صحت سنجی، تحلیل

در این قسمت و با تکمیل موارد مورد نیاز مدل‌سازی انجام شد و رواناب مشاهداتی در ایستگاه خروجی با رواناب حاصل از مدل‌سازی در زیرحوضه مربوط به ایستگاه خروجی مقایسه شد. شکل ۷ نشان‌دهنده روند تغییرات رواناب مشاهداتی و رواناب خروجی مدل است. بر اساس این نمودار، مدل در شبیه‌سازی رواناب دارای ایراداتی بوده و رواناب را به‌خوبی شبیه‌سازی نکرده است.

پس از اجرای اولیه مدل و حاصل‌شدن نتایج شبیه‌سازی رواناب در محدوده ازنا - الیگودرز، برای واسنجی مدل از ۲۲ پارامتر مختلف در جدول ۴ استفاده شد. بر اساس آنالیز حساسیت، از بین این پارامترها، TLAPS و SMFMN بیشترین تأثیر را بر رواناب حوضه ازنا الیگودرز داشته‌اند. جعفری و همکاران (۱۷) در حوضه آبریز شیراز نشان دادند که پارامترهای CN2 و K بیشترین تأثیر را بر رواناب دارند.

با توجه به پارامترهای بهینه و معیارهای آماری استفاده‌شده در مدل SWAT، برای این پژوهش، در مرحله واسنجی برای داده‌های رواناب در مقیاس زمانی ماهانه برای سال‌های ۱۹۹۳ الی ۲۰۱۶، مقادیر شاخص‌های آماری R^2 و NSE به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۶۰ محاسبه شد (جدول ۵). همچنین با توجه به جدول ۶، ضرایب R^2 و NSE برای مرحله اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۵۶ تعیین شد (جدول ۶).

نمودار شکل ۸ روند واسنجی در دوره زمانی ۱۹۹۳-۲۰۱۶ و صحت‌سنجی در دوره زمانی ۲۰۱۷-۲۰۲۱ رواناب شبیه‌سازی‌شده توسط مدل را نسبت به مقادیر مشاهداتی خروجی حوضه نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مدل SWAT در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی دارای نتایج رضایت‌بخشی است؛ به طوری که دارای تطابق به نسبت خوبی برای هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی رواناب است. بازوهای بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف‌های شبیه‌سازی در بخش‌هایی از دوره شبیه‌سازی دارای تطابق خوبی با هم هستند؛ اما در بخش دیگری از دوره شبیه‌سازی، میزان شبیه‌سازی در بیشتر ماه‌ها بیشتر از مقدار مشاهداتی است و به عبارتی شیب بازوهای

ضریب r نشان‌دهنده نسبت عرض متوسط باندها PPU۹۵ و انحراف استاندارد متغیر اندازه‌گیری شده است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad 0 \leq R^2 \leq 1 \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (12)$$

در معادلات بالا، X_i و Y_i به ترتیب مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در گام زمانی i ام، N تعداد گام‌های زمانی، \bar{X} و \bar{Y} نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی است. در جدول ۳ محدوده عملکرد ضریب نش - ساتکلیف که توسط کلت و همکاران (۱۹) بیان شده، آورده شده است.

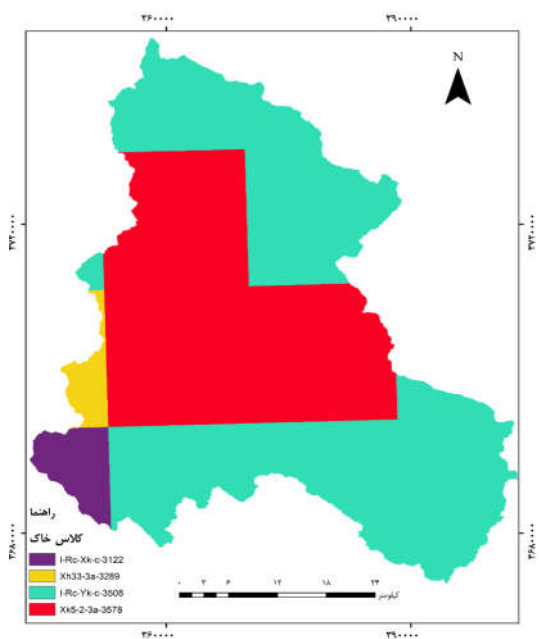
نتایج و بحث

پس از تحلیل نقشه ارتفاعی توسط مدل، مسیر آبراهه‌ها و نقاط خروجی منطقه بر اساس شرایط ارتفاعی ایجاد شده و سپس خصوصیات هیدرولوژیک زیرحوضه‌ها تعیین شد. بر اساس خروجی مدل در این مرحله، محدوده مطالعاتی ازنا - الیگودرز به ۳۳ زیرحوضه تقسیم شد.

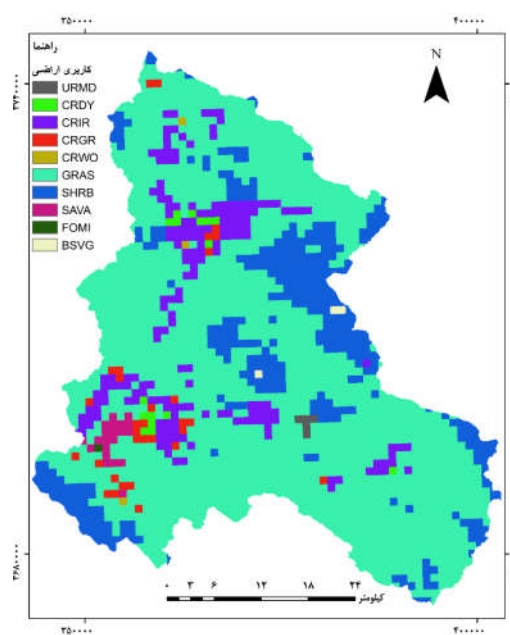
بعد از تعیین زیرحوضه‌ها و پارامترهای آن، نقشه کاربری اراضی منطقه توسط مدل تحلیل شد. بر اساس این نقشه، منطقه مطالعاتی دارای ۱۰ نوع کاربری است (شکل ۴). سپس نقشه کلاس خاک منطقه ایجاد و توسط مدل تحلیل شد. بر اساس نقشه خاک، محدوده مطالعاتی دارای چهار کلاس خاک است (شکل ۵). در مرحله بعد نیاز است تا بر اساس مشخصات توپوگرافی محل، منطقه از نظر شیب تقسیم‌بندی شود. در این مطالعه به دلیل اینکه بخش بیشتر منطقه کوهستانی است، پنج طبقه برای تقسیم‌بندی شیب در نظر گرفته شد که شامل ۰-۵ درصد، ۵-۱۵ درصد، ۱۵-۳۰ درصد، ۳۰-۴۵ درصد و بیشتر از ۴۵ درصد بود. شکل ۶ نشان‌دهنده نقشه توزیع مکانی شیب منطقه مطالعاتی است.

جدول ۳. محدوده ارزیابی شاخص نش - ساتکلیف (NSE)

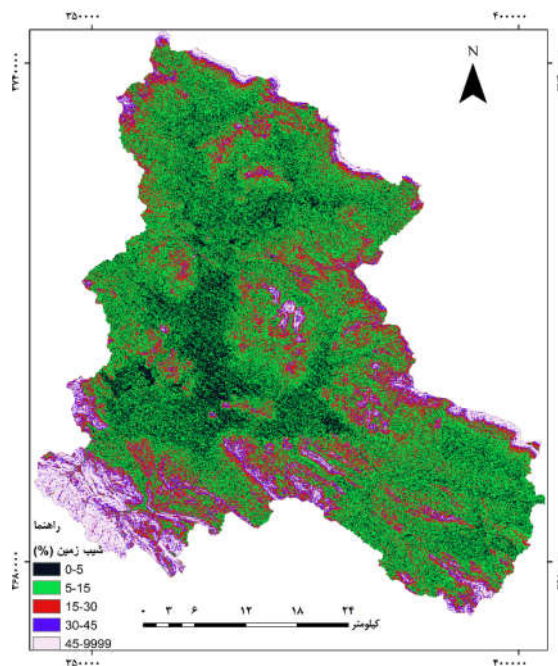
نتیجه ارزیابی	ضریب نش - ساتکلیف (NSE)
عالی	$0.75 < NSE \leq 1$
خوب	$0.65 < NSE \leq 0.75$
رضایت بخش	$0.5 < NSE \leq 0.65$
غیر قابل قبول	$NSE \leq 0.5$



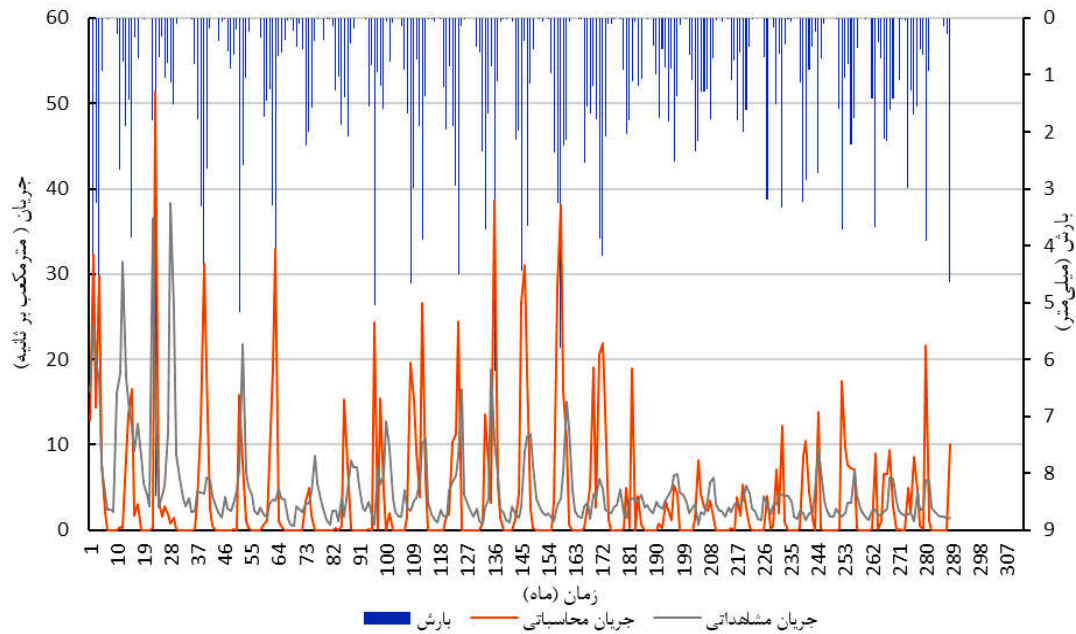
شکل ۵. نقشه کلاس خاک محدوده مطالعاتی



شکل ۴. نقشه کاربری اراضی محدوده مطالعاتی



شکل ۶. نقشه کلاس بندی شیب محدوده مطالعاتی



شروع محور زمان از ماه مارس سال ۱۹۹۱ میلادی است.

شکل ۷. نمودار تغییرات زمانی رواناب شبیه‌سازی و مشاهداتی حوضه ازنا - الیگودرز (ایستگاه سینوپتیک الیگودرز و ایستگاه هیدرومتری ماربره) در دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۱۶)

جدول ۴. پارامترهای مؤثر و مقادیر بهینه آن‌ها در واسنجی مدل در حوضه ازنا - الیگودرز

پارامتر	توصیف	نوع متغیر	مقادیر کمینه و بیشینه	مقدار بهینه
CN2.mgt	SCS runoff curve number (-)	Multiply	-۰/۵۰۵۶۵ - ۰/۴۸۳۷۲	-۰/۴۹۰۸۹
ALPHA_BF.gw	Base flow alpha factor (1/days)	Replace	۰/۰۰۴۵۲۸ ۰/۰۱۰۷۸۶	۰/۰۰۷۰۵۵
GW_DELAY.gw	Groundwater delay time (days)	Replace	۳۰۵/۶۸۰۲ ۳۱۰/۱۴۹۱	۳۰۶/۱۰۹۹
GWQMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for return flow (mm)	Replace	۰/۹۱۶۲۵۳ ۰/۹۵۵۲۷۳	۰/۹۲۹۰۰۹
GW_REVAP.gw	Coefficient for groundwater revap (days)	Replace	۰/۱۵۸۹۶۴ ۰/۱۵۹۵۲۴	۰/۱۵۹۳۸۴
CH_K2.rte	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace	۱۰۳/۴۹۲۴ ۱۰۳/۶۴۱۴	۱۰۳/۵۶۴
SOL_AWC(..).sol	Available water capacity of the soil layer (mmH2O/mm soil)	Multiply	۰/۸۸۵۰۳۳ ۰/۸۹۱۰۵۱	۰/۸۸۵۱۴۹
SOL_K(..).sol	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	Multiply	۰/۲۶۰۸۳۷ ۰/۲۶۶۱۳۵	۰/۲۶۱۹۵۸
REVAPMN.gw	Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap or percolation (mm)	Replace	۱/۰۲۰۱۹ ۱/۰۲۳۶۶۲	۱/۰۲۲۹۲۸
OV_N.hru	Manning's "n" value for overland flow (-)	Multiply	-۰/۰۱۸۳۱ -۰/۰۱۴۸۲	-۰/۰۱۵۹۶
SLSUBBSN.hru	Average slope length (m)	Multiply	۰/۲۱۷۰۰۳ ۰/۲۱۸۲۴۳	۰/۲۱۷۵۰۴
PLAPS.sub	Precipitation laps rate	Replace	-۱۳/۳۴۵۳ -۱۳/۳۴۱۷	-۱۳/۳۴۳
SURLAG.bsn	Surface runoff lag time	Replace	۱۴/۷۵۰۴۵ ۱۴/۷۵۷۲۶	۱۴/۷۵۶۶

جدول ۴. پارامترهای مؤثر و مقادیر بهینه آن‌ها در واسنجی مدل در حوضه ازنا - الیگودرز (ادامه)

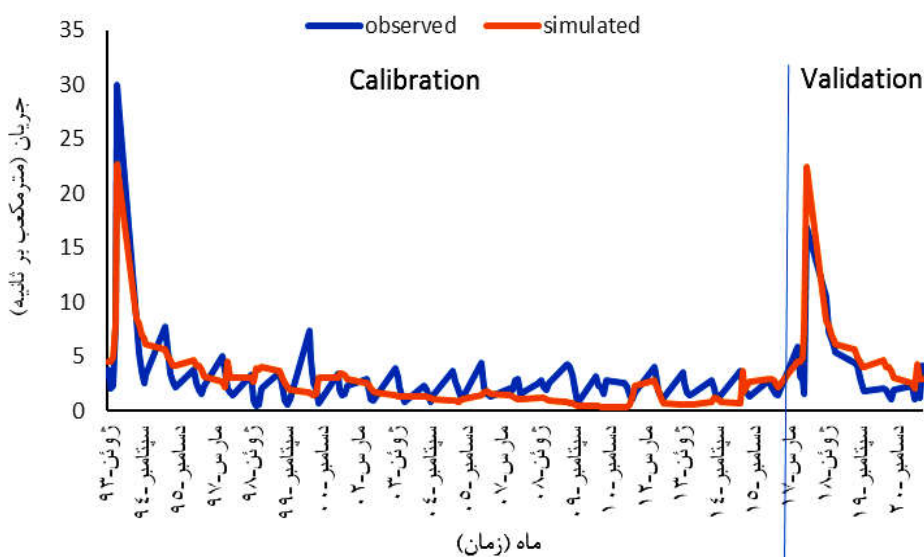
پارامتر	توصیف	نوع متغیر	مقادیر کمینه و بیشینه	مقدار بهینه
TLAPS.sub	Temperature laps rate	Replace	-۹/۷۲۴۸۵	-۹/۷۲۴۹
SFTMP.bsn	Snowfall temperature	Replace	۱۰/۴۶۹۹۵	۱۰/۴۷۰۷۵
SMTMP.bsn	Snow melt base temperature	Replace	-۹/۸۹۲۴۹	-۹/۸۹۲۵۹
SMFMX.bsn	Maximum melt rate for snow during year	Replace	۴/۵۸۶۶۰۱	۴/۵۸۷۷۷۹
SMFMN.bsn	Minimum melt rate for snow during the year	Multiply	۰/۸۷۸۹۵۳	۰/۸۸۷۱۳۷
SNOEB(..).sub	Initial snow water content in elevation bands	Replace	۳۱۰/۶۴۳۳	۳۱۰/۶۵۶۳
SNOCOVMX.bsn	Snow water content that corresponds to 100% snow cover	Replace	-۳۵/۴۵۲۷	-۳۵/۲۳۳۱
ALPHA_BNK.rte	Baseflow alpha factor for bank storage (day)	Replace	۰/۰۳۸۶۳۶	۰/۰۳۸۹۲۳
SOL_BD(..).sol	Moist bulk density	Multiply	-۰/۵۲۵۱۱	-۰/۵۲۱۱۸

جدول ۵. دقت مدل در مرحله واسنجی

آماره	R ²	NS	r-factor	p-factor
	۰/۶۱	۰/۶	۰/۰۷	۰/۱۳

جدول ۶. دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی

آماره	R ²	NS	r-factor	p-factor
	۰/۷۸	۰/۵۶	۰/۰۶	۰/۱۲



شکل ۸. روند مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در نظر گرفتن پارامترهای مختلف حوضه و واسنجی با مقادیر واقعی در منطقه، دارای نتایج قابل اعتماد بوده که در مطالعات مختلفی به این مهم اشاره شده است (۴، ۱۷، ۱۸ و ۲۹).

نتیجه‌گیری

در این مطالعه به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیک محدوده ازنا - الیگودرز با استفاده از مدل SWAT، اقدام به شبیه‌سازی رواناب در مقیاس ماهانه شد. دوره آماری استفاده‌شده در این پژوهش از سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ است. از این اطلاعات، دو سال برای وارم‌آپ و دوره زمانی ۲۰۱۶-۱۹۹۳ برای واسنجی در نظر گرفته شد که با استفاده از ۲۲ پارامتر مختلف، مدل برای منطقه واسنجی شد و سپس دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۱۷ برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. نتایج ارزیابی با شاخص‌های NSE و R^2 به این صورت بود که مقدار NSE برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۰ و ۰/۵۶ بود. مقدار ضریب R^2 برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۷۸ بود. بر اساس ضرایب به دست آمده در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مشخص شد که مدل به‌طور کلی دارای دقت رضایت‌بخش در شبیه‌سازی هیدرولوژیک محدوده ازنا - الیگودرز بود. بر اساس نتایج این مطالعه و باتوجه به اینکه در مناطق با اقلیم سرد پدیده برف هیدرولوژی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن ذوب برف و برآورد دقیق آن در مدل‌سازی، مدل SWAT ارزیابی شود.

بالارونده و پایین‌رونده شبیه‌سازی شده کمتر از مشاهداتی است. ژیانگ و همکاران (۱۸) در مطالعه خود نیز به نتیجه مشابه دست یافتند.

شاهویی و همکاران (۲۷) به شبیه‌سازی رواناب در مقیاس زمانی ماهانه در حوضه روانسر سنجایی کرمانشاه با استفاده از مدل SWAT پرداختند که ضرایب دقت R^2 و NSE را برای دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۸ و برای دوره اعتبارسنجی ۰/۸۱ و ۰/۹ محاسبه کردند. سانترا و داس (۲۶) با استفاده از مدل SWAT، رواناب ماهانه حوضه چیلیکا در کشور هند را شبیه‌سازی کردند که ضرایب R^2 و NSE برای دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۵۴ و برای اعتبارسنجی مدل ۰/۸۸ و ۰/۶۱ به دست آمد. باتوجه به شاخص‌های آماری به دست آمده در این پژوهش مشخص شد که مدل هیدرولوژیک SWAT رواناب محدوده ازنا - الیگودرز در حوضه آبخیز کارون بزرگ را با دقت رضایت‌بخشی شبیه‌سازی کرده؛ اما از ضعف‌هایی نیز برخوردار بوده است که دلیل آن را می‌توان ویژگی کوهستانی و اقلیم سرد منطقه بیان کرد. در این منطقه به دلیل وقوع پدیده برف در طول سال و در ارتفاعات و ایجاد رواناب ناشی از ذوب برف که بخش مهمی از جریان‌های سطحی را شامل می‌شود، مدل دچار ضعف در پیش‌بینی این جریان شده و رواناب ذوب برف را به خوبی در نظر نگرفته است. با توجه به این پژوهش و مطالعات قبلی انجام‌شده در رابطه با توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی رواناب، در حوضه‌های مختلف می‌توان نتیجه گرفت که این مدل عملکرد متفاوتی در شبیه‌سازی حوضه‌های آبخیز مختلف در شرایط اقلیمی متفاوت دارد. با وجود این، این مدل به دلیل ویژگی نیمه‌توزیعی بودن و قابلیت کاربرد در مناطقی که با کمبود اطلاعات و ایستگاه مواجه هستند، علاوه بر

منابع مورد استفاده

1. Abbaspour, K. C., E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang and B. Kløve. 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.
2. Abbaspour, K. C., J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist and R. Srinivasan. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2-4): 413-430.
3. Abbaspour, K. C., J. Yang, P. Reichert, M. Vejdani, S. Haghghat and R. Srinivasan. 2008. SWAT-CUP, SWAT

- Calibration and Uncertainty Programs, A User manual, Eawag Zurich, Switzerland. EAWAG, disponible sur http://www.eawag.ch/organisation/abteilungen/siam/software/swat/index_EN.
4. Akhavan S., J. Abedi-Koupai, S.F. Mousavi, M. Afyuni, S.S. Eslamian and K.C. Abbaspour. 2010. Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139(4): 675-688.
 5. Arnold, J.G., R. Srinivasan, R.S. Muttiah and J.R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34 (1): 73-89.
 6. Artimani, M.M., H. Zainivand, N. Tahmasbipour and A. Haqizadeh. 2017. Evaluation of SWAT model in determining the water balance components of Gamasiab watershed. *Journal of Rain Catchment Surface Systems* 5(2): 51-64 (in Farsi).
 7. Beiranvand, Z., P. Haghightajoo, A. Haqizadeh and H. Memarian. 2013. Assessment of the hydrological effects of climate change using the integration of SWAT semi-distributive model and exponential microscale model (LARS-WG5.5) case study: Khorram Abad River watershed. Master thesis, Zabol University, Zabol, I.R. Iran.
 8. Bunge, J. 2018. A warming climate brings new crops to frigid zones. *Wall Street Journal* 25: 1543168786. <https://www.wsj.com/articles/a-warming-climate-brings-new-crops-to-frigid-zones-1543168786>.
 9. CARD, 2020. SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles. Center for Agricultural and Rural Development: Iowa State University, Ames, IA, USA.
 10. Cho, S.J. and B.A. McCarl. 2017. Climate change influences on crop mix shifts in the United States. *Scientific Reports* 7(1): 1-6.
 11. Chow, V. 1964. Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.
 12. Dinpashoh, Y., P. Heidari and S. Samadianfard. 2023. Trends in Low Flows of the Selected Rivers in Lorestan Province. *Water and Soil Science* 33(2): 91-104. doi: 10.22034/ws.2021.46123.2416 [In Persian].
 13. Dutra, E., G. Balsamo, P. Viterbo, P.M. Miranda, A. Beljaars, C. Schär, and K. Elder. 2010. An improved snow scheme for the ECMWF land surface model: Description and offline validation. *Journal of Hydrometeorology* 11(4): 899-916.
 14. Ghorbani, M., Y. Dinpashoh, and M. Moayeri. 2020. Appraisal of the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation in HyMod and HBV models (Case study: Chehelchai catchment in Golestan province). *Journal of Water and Soil Conservation* 27(3): 23-43 (in Farsi). doi: 10.22069/jwsc.2020.14360.2909.
 15. Hasanpour, P., A. Haqizadeh, H. Zainivand and N. Tahmasbipour. 2016. The effect of climate change on the hydrological components of Khorramabad River basin by using SWAT semi-distributive model and CGCM3T47 climate model. National Conference on Agricultural Science and Technology, Natural Resources and Environment of Iran, Tehran, Iran (in Farsi).
 16. Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Käab, S. Kang, S. Kutuzov. et al. 2019. High Mountain areas. PP. 131-202. In: Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegria, A., Nicolai, M., Okem, A., et al. (Eds.), In IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. IPCC: Geneva, Switzerland.
 17. Jafari, T., A. S. Kiem, S. Javadi, T. Nakamura and K. Nishida. 2021. Fully integrated numerical simulation of surface water-groundwater interactions using SWAT-MODFLOW with an improved calibration tool. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 35: 100822.
 18. Jiang, Q., Z. Qi, F. Tang, L. Xue and M. Bukovsky. 2020. Modeling climate change impact on streamflow as affected by snowmelt in Nicolet River Watershed, Quebec. *Computers and Electronics in Agriculture* 178: 105756.
 19. Kult J., W. Choi and J. Choi. 2014. Sensitivity of the snowmelt runoff model to snow covered area and temperature inputs. *Applied Geography* 55: 30-38.
 20. Ministry of Energy. 2016. Studies on the preparation of the water resources balance of the study areas of the large Karun watershed, volume 5: water resources assessment report, appendix 42: water balance of the Azna-Aligoudarz study area (in Farsi).
 21. Mirabbasi Najafabadi, R., Y. Dinpashoh and A. Fakheri-Fard. 2012. Rainfall Runoff Modelling Using the Principle of Maximum Entropy (Case Study: Kasilian Watershed). *Journal of Water and Soil Science* 15(58): 39-52 (in Farsi). URL: <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-2058-fa.html>.
 22. Naderi, M., A.R. Ildrumi, H. Nouri, S. Aghabigi Amin and H. Zainivand. 2018. Investigating the impact of land use change and climate on watershed runoff using the SWAT model (case study: Green Basin). *Journal of Hydrogeomorphology* 5(16): 61-79 (in Farsi).
 23. Price, R.K. 2002. Hydroinformatics: Advanced study course on river basin modelling for flood risk mitigation. The University of Birmingham, UK.
 24. Refsgaard, J.C. and J. Knudsen. 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32(7): 2189-2202.
 25. Rezaei, M., H. Zare Abianeh, A. Haqizadeh and Sh. Mahdavi. 2014. Assessment of the impact of climate change on

- groundwater resources using SWAT hydrological model, SDSM climate model and artificial neural network (ANN) model in Khorram Abad watershed. Master thesis, Malayer University, I.R. Iran (in Farsi).
26. Santra, P. and B. S. Das. 2013. Modeling Runoff from an Agricultural Watershed of Western Catchment of Chilika Lake through Arc SWAT. *Journal of Hydro-Environment Research* 7(4): 261-269.
 27. Shahoei S. V., J. Porhemmat, H. Sedghi, M. Hosseini and A. Saremi. 2018. Monthly runoff simulation through SWAT hydrological model and evaluation of model in calibration and validation periods, case study: Ravansar Sanjabi Basin in Kermanshah Province, Iran. *Watershed Engineering Management* 10(3): 464-477 (in Farsi).
 28. Singh, V.P. and D.A. Woolhiser. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(4): 270-292.
 29. Tudose, N.C., M. Marin, S. Cheval, C. Ungurean, S.O. Davidescu, O.N. Tudose, A.L. Mihalache and A.A. Davidescu. 2021. SWAT Model Adaptability to a Small Mountainous Forested Watershed in Central Romania. *Forests* 12(7): 860.
 30. Unc, A., D. Altdorff, E. Abakumov, S. Adl, S. Baldursson, M. Bechtold and et al. 2021. Expansion of agriculture in northern cold-climate regions: A cross-sectoral perspective on opportunities and challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 663448.
 31. Vuille, M., M. Carey, C. Huggel, W. Buytaert, A. Rabatel, D. Jacobsen, A. Soruco, M. Villacis, C. Yarleque, O.E. Timm, T. Condom, N. Salzmann and J-E. Sicart. 2018. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes—Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews* 176: 195-213.
 32. Wang, J., N. Kumar Shrestha, M. Aghajani Delavar, T. Worku Meshesha and S. N. Bhanja. 2021. Modelling watershed and river basin processes in cold climate regions: A review. *Water* 13(4): 518.

Hydrological Simulation of Mountainous Areas Using SWAT Model

Y. Sabzevari and S. Eslamian^{1*}

(Received: September 5-2024 ; Accepted: October 26-2024)

Abstract

The objective of this study was to investigate the possibility of hydrological simulation of the Azna-Aligoudarz area located in the upper reaches of the Karoun Bozorg basin in the east of Lorestan province. The daily meteorological data related to the Aligoudarz synoptic station and the rainfall of Kamandan and Dareh Takht rain gauge stations in the period of 1991-2023, the observational discharge related to the Marbareh hydrometric station in the period of 1991-2021, soil map, land use, and digital elevation map of Azna-Aligoudarz basin was used to carry out this research. The period of 1991 to 1992 to warm up the model, 1993 to 2016 was a calibration period, and 2017 to 2021 for the validation period were considered. Based on the simulation in this area, the model had weaknesses in simulation. After the initial simulation, the model was calibrated. After analyzing the sensitivity of different parameters, 22 effective parameters were selected and the model was calibrated. The results showed that the NSE values of 0.60 and 0.56 and the R^2 coefficient values of 0.61 and 0.78, respectively were obtained for the calibration and validation stages. Based on the coefficients obtained in both the calibration and validation stages, it was found that the model had satisfactory accuracy in the hydrological simulation of the Azna-Aligoudarz area.

Keywords: Runoff, Cold-Climate, Azna-Aligoudarz, SWAT

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agricultural Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

*: Corresponding author, Email: saeid@iut.ac.ir