

ارزیابی مدل VIC در شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی و روندیابی جریان (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز غرب دریاچه ارومیه)

قاسم فرهمند^{۱*}، شهریار خالدی^۲، منیژه قهرودی تالی^۲، بهزاد حصاری^۲

۱. دکتری آب و هواشناسی شهری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲. استاد تمام گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۸/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۲۰)

چکیده

پیش‌بینی و برآورد مقدار رواناب به‌خصوص رواناب بیشینه حاصل از بارش نزولات، نیازمند استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک مناسب و دقیق است. یکی از مدل‌های نیمه‌توزیعی که در دهه اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته، مدل هیدرولوژیکی ظرفیت نفوذ متغیر (VIC) است. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی کارایی مدل VIC در شبیه‌سازی شده رواناب و روندیابی جریان رودخانه‌های شهرستان ارومیه مشرف به دریاچه ارومیه شامل نارلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای انجام شده است. برای نیل به هدف یادشده از داده‌های هواشناسی ERA5 استفاده شده است. ضرایب آماری مورد استفاده در پژوهش حاضر برای صحت‌سنجی داده‌های ورودی بارش شامل (ضریب تبیین R^2 ، ریشه میانگین مربعات خطای کاکس - باکس TRMSE، نش - ساتکلیف NSE) هستند. بررسی‌های داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی نتایج قابل قبولی دارند، به طوری که شاخص احتمال آشکارسازی POD در تمامی ایستگاه‌های منطقه بیش از ۰/۸۰ درصد بوده و حتی در ایستگاه سینوپتیک خوی در شمال منطقه مطالعاتی بیشتر از ۰/۹۵ درصد است. همچنین، میزان همبستگی بین داده‌های حداکثر و حداقل دما نیز بیش از ۰/۹۳ درصد است. پس از ساخت مدل هیدرولوژیک و ریاضی منطقه، واسنجی رواناب مشاهداتی خروجی زیرحوضه‌ها با رواناب شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC بررسی شد. نتایج نشان داد در تمامی رودخانه‌های اصلی منطقه مقدار NSE بیش از ۰/۷۲ درصد و ضریب R^2 تمامی حوضه‌ها بیشتر از ۰/۶۴ درصد بوده است. همچنین، برای صحت‌سنجی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از بازه زمانی بیشترین دبی‌های حداکثر (۲۰۱۰-۲۰۰۰) استفاده شد. نتایج نشان داد مدل در شبیه‌سازی رواناب‌های دقت بیشتری داشت، به طوری که ضریب NSE در حوضه نازلوچای به ۰/۸۰ درصد و ضریب R^2 ۰/۷۸ درصد برای داده‌های مشاهداتی روزانه رسید. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که مدل VIC قابلیت زیادی در شبیه‌سازی جریان سطحی دارد.

کلیدواژه‌ها: مدل هیدرولوژیک ظرفیت نفوذ متغیر، مدیریت سیلاب، داده‌های هواشناسی ERA5، دریاچه ارومیه.

مقدمه

بنا به گزارش^۱ IPCC (۲۰۰۷) متوسط دمای سطحی کره زمین تا سال ۲۱۰۰ می‌تواند به ۱/۱ تا ۶/۴ درجه سانتی‌گراد برسد و باعث پدیده تغییر اقلیم شود. همین پدیده باعث ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده، به‌گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخداد‌های همچون خشک‌سالی و سیلاب افزایش یافته است و افزایش این احتمال برای دوره‌های آتی می‌تواند آثار زیانباری را برای جوامع بشری در پی داشته باشد [۱]. از عوامل تأثیرگذار برافزایش رواناب، رشد روزافزون شهرنشینی و تغییر در کاربری اراضی و پوشش گیاهی است. توسعه شهری با ایجاد مناطق وسیعی از سطوح نفوذناپذیر، مانع نفوذ مقدار زیادی از بارندگی به درون خاک و تولید مواد مختلف مضر و آلوده‌کننده محیط زیست می‌شود [۲]. چنین توسعه‌ای علاوه بر افزایش اثرات تخریبی سیلاب‌های شهری، سبب کاهش کیفیت آب بسیاری از آب‌های زیست‌محیطی در سراسر جهان شده‌اند [۳]. امروزه افزایش جمعیت، گسترش تأسیسات صنعتی، کمبود مکان برای ساخت‌وساز به‌خصوص در کلان‌شهرها، باعث شده تا تغییر شدیدی در مورفولوژی حوضه‌های آبریز ایجاد شود [۴]. با گسترش روزافزون مناطق شهری و از بین بردن اراضی جنگلی، مرتعی و کشاورزی، زمین‌های نفوذناپذیر افزایش یافته که این موضوع موجب افزایش حجم رواناب ناشی از بارش در مناطق مسکونی به‌خصوص فضاهای شهری شده است [۵]. سیل می‌تواند به‌عنوان وضعیت هیدرولوژیکی تعریف شود که در آن دبی رودخانه بیش از ظرفیت ذخیره‌سازی کانال می‌شود و آب مازاد سرریز می‌شود و بخشی از کف دره را غرقاب می‌کند [۶]. توسعه شهرنشینی، به‌ویژه در حاشیه رودخانه‌ها، بر خسارت سیل در دهه‌های اخیر افزوده است [۷]. ناپایداری ناشی از سیلاب متغیر و پیچیده است و تولید سیلاب در یک حوضه آبخیز به عوامل متعددی همچون حوضه آبریز، میزان بارش، میزان نفوذ و شرایط زمین بستگی دارد. سیلاب‌ها جزء فراوان‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی هستند که همه‌ساله موجب آسیب جانی و مالی سنگینی می‌شوند. سیلاب‌ها جزء جدانشدنی دینامیک مجرای رودخانه‌ها هستند [۸]. سیل یک پدیده معمول و

قابل انتظار برای یک رودخانه است، اما از آنجا که کناره‌های رودخانه‌ها معمولاً تراکم جمعیتی بالایی دارند، سیلاب‌های بزرگ‌تر دارای یک مؤلفه خطرزا هستند [۹]. آمارها نشان می‌دهند خطر سیل طی زمان افزایش یافته است، به‌خصوص از زمانی که بسیاری از کشورها مجوزهای ساخت‌وساز در دشت‌های سیلابی را صادر کردند و حتی مشوق رشد تجاری و مسکونی در این مناطق شدند [۱۰]. متأسفانه، در ایران به موضوع سیل و مدیریت و کاهش خسارت‌های آن به‌طور جدی توجه نشده است و فقط زمانی که سیلاب مخربی جاری شود و فاجعه‌ای به وجود آید، توجه مسئولان و متخصصان به آن جلب می‌شود. غرب دریاچه ارومیه نیز از مناطق مهمی است که به دلیل شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی پتانسیل وقوع سیلاب‌های شدید دارد. به بیان دقیق‌تر، غرب دریاچه ارومیه نیز همانند سایر مناطق ایران شاهد اثرات تغییر اقلیم بوده است. بررسی ۴۰ ساله داده‌های اقلیمی ایستگاه شهر ارومیه نشان می‌دهد میزان بارندگی در این شهر با شیب ۲/۲۶- روند نزولی داشته و در طرف دیگر دمای بیشینه، کمینه و متوسط روند افزایشی پیدا کرده است. غرب دریاچه ارومیه با وسعتی حدود ۵۲۵۱ کیلومترمربع روی واحدهای زمین‌شناسی مختلفی مانند رسوبات آبرفتی، ماسه‌سنگ، مارن، کنگلومرا و سنگ آهکی با میان لایه‌هایی از مارن شکل گرفته است. رشته‌کوه‌های مرکزی ترکیه تا عراق از شمال غرب تا جنوب غرب این غرب دریاچه ارومیه را احاطه کرده‌اند. یکی از عارضه‌های مهم هیدرولوژیکی در گستره شهرستان، وجود چهار رودخانه نازل‌وچای، شهرچای، باراندوزچای و روضه‌چای است که از ارتفاعات یادشده شهرستان سرچشمه گرفته‌اند و در حال حاضر، دشت ارومیه را که شهر ارومیه نیز در آن قرار گرفته، آبیاری می‌کنند و به دریاچه ارومیه می‌ریزند. بررسی ساختارهای زمین‌شناسی، توپوگرافی و ریخت‌شناسی غرب دریاچه ارومیه نشان می‌دهد علاوه بر موارد یادشده، تغییرات اقلیمی و توسعه ساخت‌وسازهای شهری در این مناطق کوهپایه‌ای و مرتفع سبب از بین رفتن آبراهه‌های طبیعی و در نتیجه، تغییر شرایط هیدرولوژیکی شده است. بنابراین، همین عوامل احتمال وقوع خطر سیلاب‌ها و عواقب و آسیب‌های ناشی از آن را در این شهرستان بالا می‌برد. با توجه به اهمیت پیش‌بینی سیلاب در مطالعه و طراحی‌های هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آبی و اینکه پیش‌بینی

زیرحوضه‌های حساس مشخص شدند و همچنین، اطلاعات تنوع بیلان آب با افزایش تنوع داده‌های بارش افزایش یافت [۱۳]. مارکرت و همکاران^۴ (۲۰۱۸) در منطقه جنوب شرق آسیا برای بررسی تأثیر تغییرات کاربری زمین بر خصوصیات هیدرولوژیکی از مدل VIC استفاده کردند و پس از کالیبره کردن داده‌ها برای سال‌های ۱۹۸۲-۱۹۹۰، در اعتبارسنجی برای سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۰۴، به کیفیت خوب تا خیلی خوب در شبیه‌سازی ماهیانه داده‌ها رسیدند. این مطالعه نشان داد افزایش سطح جنگل باعث کاهش میزان رواناب و افزایش تبخیر و تعرق می‌شود، در حالی که افزایش سطح زراعت باعث افزایش رواناب و کاهش تبخیر و تعرق می‌شود [۱۴]. ملک‌پور و همکاران (۲۰۱۸) در ایالت کالیفرنیا آمریکا به مدل‌سازی بر اساس داده‌های گردش جهانی پرداختند. در این مطالعه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC و داده‌های گردش جهانی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به این نتیجه رسیدند که در آینده بارش‌ها در فصل پر بارش افزایش و در فصل‌های دیگر خشک‌تر خواهد شد که این روی منابع آب در دسترس تأثیر خواهد گذاشت که مهم‌ترین آن جریان سطحی است. این اطلاعات می‌تواند به برنامه‌ریزی بهتر و کامل‌تر برای آینده کمک کند [۱۵]. کوهی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در حوضه رودخانه سفیدرود داده‌های منابع بارشی باز تحلیل شده را ارزیابی کردند. آن‌ها در این مطالعه از داده‌های بارش پایگاه داده ECMWF و همچنین، PERSIANN استفاده کردند. آن‌ها دریافته‌اند که به‌رغم اینکه داده‌های بارش ECMWF از کیفیت بهتری نسبت به داده‌های PERSIANN برخوردار است، در مدل‌سازی هیدرولوژیکی با مدل VIC-3L عملکرد خوبی ندارد و این PERSIANN بود که نتایج بهتری را ارائه داد [۱۶].

به‌رغم توسعه روزافزون استفاده از مدل هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس در مدل‌سازی بیلان انرژی و بیلان آبی در بسیاری از حوضه‌های سراسر جهان و همچنین، استفاده از آن‌ها در مدل‌های گردش عمومی جو، متأسفانه تا کنون مطالعات قابل توجهی در زمینه استفاده از مدل‌ها در سطح کشور انجام نشده است. در حال حاضر، در بسیاری از مطالعات و تحقیقات جاری در سطح کشور از مدل‌هایی

سیلاب مستلزم نصب، راه‌اندازی و نگهداری از تجهیزات و سامانه ثبت سیلاب است و بسیاری از حوضه‌های آبخیز کشور چنین امکاناتی را ندارند، استفاده از روش یا روش‌هایی که بتوان به کمک آن‌ها، میزان رواناب حاصل از بارندگی را در حوضه‌های فاقد آمار یا دارای آمار ناقص تخمین زد، اهمیت قابل توجهی دارد. به علاوه، با توجه به رشد جمعیت و توسعه اجتماعی و اقتصادی و تغییرات آب‌وهوایی به علت تأثیر گرمایش جهانی، که سبب افزایش خسارت‌های ناشی از سیل می‌شود، این امر اهمیت بیشتری می‌یابد. تا کنون مدل‌های زیادی به منظور شبیه‌سازی کردن بارش رواناب برای پیش‌بینی سیل مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. توسعه این مدل‌ها منجر به تولید مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل‌های کامپیوتری شده است. از جمله مدل‌های جدید و موفق در این زمینه، مدل هیدرولوژیکی-تلفیقی ظرفیت نفوذ متغیر^۱ (VIC) است. این مدل اولین بار توسط لیانگ و همکاران (۱۹۹۴) در دانشگاه واشنگتن در آمریکا توسعه یافت. استفاده از این مدل به دلیل قابلیت‌های زیادی که دارد، توسط محققان زیادی جهت شبیه‌سازی بارش - رواناب استفاده شده است [۱۱]. اسکایدیگر^۲ و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی با عنوان ادغام دوبعدی آب‌های زیرزمینی در مدل VIC و سنجش اثرات آن بر خروجی نفوذ آبخوان‌ها، برای دستیابی به هدف سطح ایستایی جریان آب زیرزمینی با ستون خاک ادغام شد و سپس، اثرات ویژگی‌های آبخوان و تبخیر و تعرق بر تغذیه آب‌های زیرزمینی مدل‌سازی شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد تغذیه مجدد آب‌های زیرزمینی به عمق رواناب سطحی بستگی دارد و با افزایش وضوح شبکه از ۱ درجه به ۰/۰۵ درجه باعث تغییر شارهای متوسط مدل تا ۱۲/۳ درصد از میانگین بارندگی شد [۱۲]. ماجودر و همکاران^۳ (۲۰۱۹) در حوضه رودخانه پتوماک در ساحل شرقی ایالات متحده با استفاده از مدل هیدرولوژیکی VIC به ارزیابی حساسیت آب قابل دسترس بر اساس خطای داده‌های بارش پرداختند. آن‌ها در تحقیق یادشده به این نتیجه رسیدند ماه‌های می و آوریل بیشترین حساسیت را به خطاهای بارش دارند.

1. The Variable Infiltration Capacity
2. Johanna M. Scheidegger
3. Majumder, R

4. Markert, K

استفاده می‌شود. داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش از پایگاه داده‌های هواشناسی ECMWF تحت عنوان ERA5^۲ با تفکیک مکانی ۰/۲۵*۰/۲۵ در بازه زمانی (۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵) به صورت روزانه هستند. سایر اطلاعات مورد استفاده از جمله پوشش گیاهی، خاک از مجموعه کتابخانه‌ای پوشش گیاهی ماهواره مودیس و بانک اطلاعات جهانی خاک دریافت شده است. به منظور واسنجی مدل VIC از داده‌های روزانه ثبت شده ایستگاه هیدرومتری در هر زیرحوضه آبریز از بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۵ و همچنین، برای صحت‌سنجی مدل از داده‌ها در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰ استفاده شده است. دلیل انتخاب بازه زمانی صحت‌سنجی داده‌ها، وقوع پیک دبی در ۴ زیرحوضه در بازه زمانی مورد اشاره بوده است. در این پژوهش برای بررسی عملکرد مدل VIC در شبیه‌سازی رواناب خروجی از سه شاخص نش - ساتکلیف^۳، ریشه میانگین خطای تبدیل شده باکس - کاکس^۴ و جذر میانگین مربعات خطا^۵ استفاده شده است.

مدل (VIC)

مدل VIC نوعی مدل نیمه‌توزیعی بزرگ‌مقیاس است که قابلیت شبیه‌سازی کردن تحت شرایط بیلان انرژی و آبی در مقیاس مکانی مختلف و با گام زمانی ساعتی و روزانه را دارد. درخور یادآوری است که در این مدل شبیه‌سازی به صورت سلول به سلول انجام می‌گیرد و هر سلول جدا از دیگر سلول‌های شبیه‌سازی می‌شود که در انتها همه سلول‌ها به هم متصل می‌شوند و می‌توان میزان رواناب را در هر نقطه ارائه داد. مدل VIC در بسیاری از رودخانه‌های مهم بزرگ دنیا مورد استفاده قرار گرفته است. البته، این مدل یک مدل جهانی است و می‌توان در مقیاس‌های بزرگ حتی مدل‌سازی قاره‌ها از آن استفاده کرد [۱۸].

این مدل شامل مدل‌سازی فرایندهای عمودی مانند تبخیر و تعرق، رواناب سطحی، زیرسطحی و مدل‌سازی فرایندهای افقی از جمله روندیابی جریان می‌شود که شماتیک کلی عملکرد مدل در شکل ۲ ارائه شده است.

همچون HEC-HMS, SWAT و... برای شبیه‌سازی کردن رواناب خروجی از حوضه‌ها استفاده می‌کنند. بسیاری از این مدل‌ها از دیدگاه یکپارچه^۱ برای مدل‌سازی استفاده می‌کنند و توانایی ارائه جزئیات مکانی اجزای بیلان آب و یا بیلان انرژی (توزیع مکانی رطوبت خاک، توزیع مکانی تبخیر و تعرق، دمای خاک و...) را دارند. بنابراین، هدف پژوهش حاضر ارزیابی عملکرد مدل VIC در برآورد بیلان حوضه‌ای یا رواناب رودخانه‌های حوضه غرب دریاچه ارومیه است. با توجه به هدف مطرح شده فرضیه اصلی پژوهش عبارت است از:

فرضیه پژوهش: به نظر می‌رسد مدل هیدرولوژیک ظرفیت نفوذ متغیر در شبیه‌سازی رواناب‌های سطحی دقت زیادی دارد.

مواد و روش

محدوده مطالعه شده

شهرستان ارومیه یکی از شهرستان‌های چهارده‌گانه استان آذربایجان غربی است. این شهرستان با مساحتی حدود ۵۲۵۱ کیلومتر مربع حدود ۱۴ درصد از مساحت استان را به خود اختصاص داده است. بر اساس مطالعات ارزیابی و منابع اراضی از سطح شهرستان ۴۱/۵۷ درصد اراضی کوهستانی، ۲۴/۱۶ درصد تپه‌ها و ۳۴/۲۸ درصد بقیه را اراضی دشتی و سیلابی و... تشکیل می‌دهند. فلاتی که در داخل آن قرار دارد و شامل دریاچه ارومیه نیز می‌شود، پهنه‌ای با ارتفاع ۱۳۰۰ تا ۳ هزار متر از سطح دریا است. این پهنه منطقه‌ای کوهستانی است که به موازات حرکت از طرف غرب به طرف شرق، از ارتفاع آن کاسته می‌شود. از نظر وضعیت آب‌های سطحی، چهار رودخانه نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای به ترتیب از غرب به شرق آب مورد نیاز دشت شهرستان ارومیه را تأمین می‌کنند [۱۷].

روش تحقیق

پژوهش حاضر از لحاظ هدف، کاربردی و بر اساس شیوه گردآوری داده‌های از نوع توصیفی و جمع‌آوری داده‌های ثبت شده تاریخی است. در این تحقیق از مدل هیدرولوژیک بزرگ‌مقیاس VIC برای برآورد رواناب خروجی از ۴ زیرحوضه (نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای)

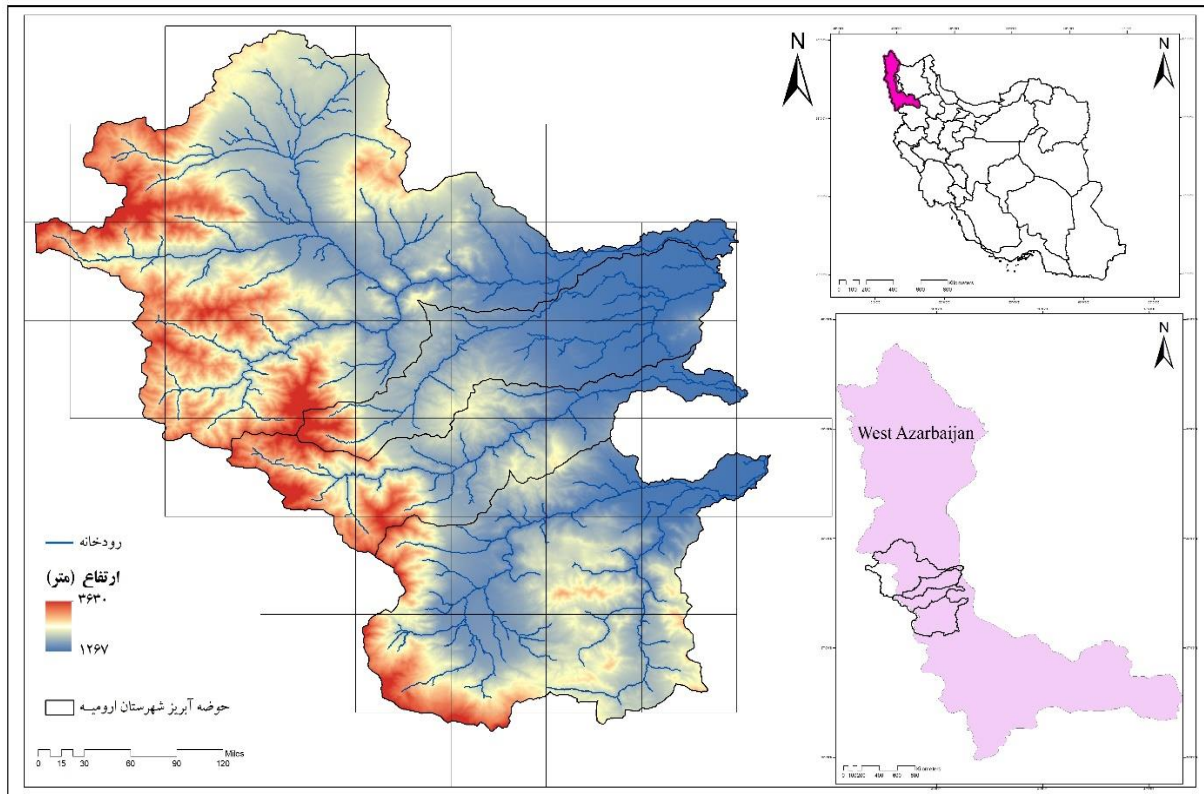
2. ECMWF Reanalysis 5th Generation

3. Nash-Sutcliffe

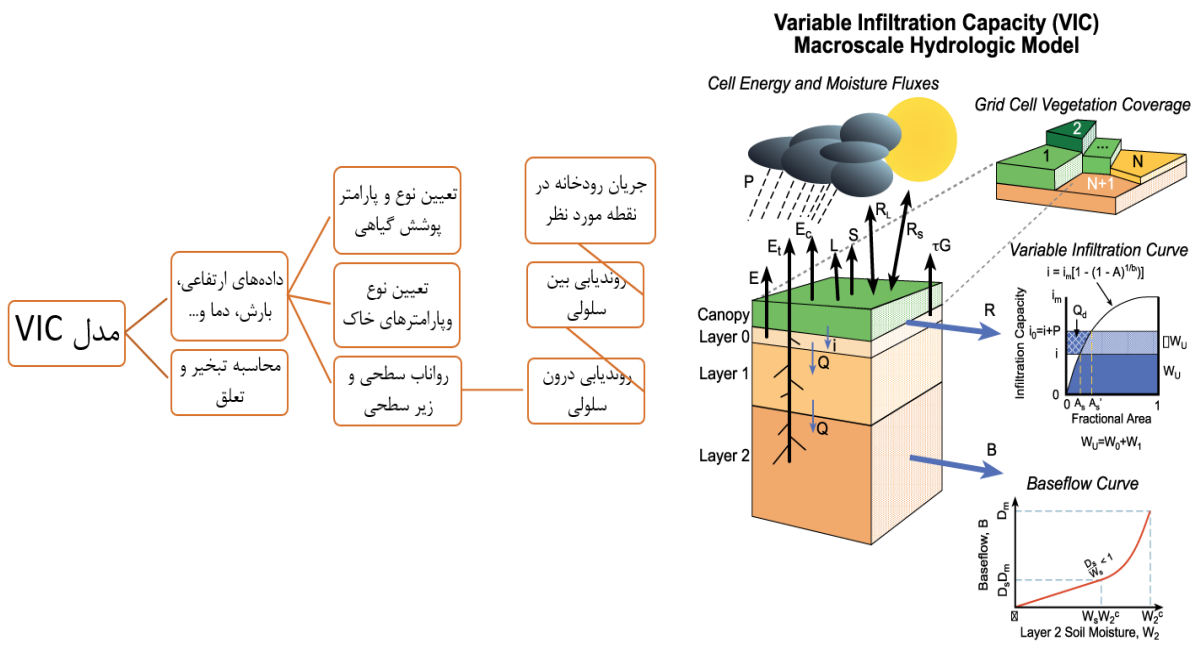
4. TRMSE

5. Root Mean Square Error

1. Integrated



شکل ۱. محدوده جغرافیایی حوضه آبریز شهرستان ارومیه مشرف به دریاچه ارومیه (به ترتیب از بالا: نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای)



شکل ۲. فلوجارت عملکرد مدل VIC

رواناب سطحی

مکانیسم تولید رواناب سطحی در مدل VIC بر اساس تغییرات مکانی ظرفیت نفوذ است که به صورت رابطه ۱ نشان داده شده است:

$$i = i_m \left[1 - (1-a)^{b_i} \right] \quad (1)$$

I : ظرفیت نفوذ، I_m : ماکزیمم ظرفیت نفوذ، a : کسری از مساحت کل که ظرفیت نفوذ کمتر از i دارد b_i : پارامتر شکل ظرفیت نفوذ. پارامتر شکل ظرفیت نفوذ نشان دهنده تغییرات مکانی ظرفیت نفوذ است، به طوری که مقدار صفر آن مبین حوضه‌ای است با عملکرد مشابه مخزن است. با استفاده از رابطه ۱ و فرضیه $xinanjia$ که تولید رواناب در هر گام زمانی وابسته به تجاوز مجموع بارش در همان گام زمانی و رطوبت خاک در انتهای گام زمانی قبلی از ظرفیت ذخیره خاک است. روابط مربوط به تولید رواناب سطحی در مدل VIC به صورت روابط ۲ و ۳ خواهد بود.

$$Q_d \cdot \Delta t = p \cdot \Delta t - w_i + w_{ic}, \quad i_i + p \cdot \Delta t > i_m \quad (2)$$

$$Q_d \cdot \Delta t = p \cdot \Delta t - w_i + w_{ic} \left[1 - \frac{i_i + p \cdot \Delta t}{i_m} \right], \quad (3)$$

$$i_i + p \cdot \Delta t < i_m$$

Q_d : رواناب سطحی (مستقیم)، P : بارش، W_i : رطوبت خاک در لایه اول در آغاز گام زمانی، W_{ic} : ماکزیمم مقدار رطوبت لایه اول، a : درصد مساحت اشباع، i_0 : ظرفیت نفوذ مربوط به $A, \Delta t$ گام زمانی، b_i : پارامتر شکل ظرفیت نفوذ، i_m : ماکزیمم ظرفیت نفوذ.

بارش در قسمت‌های مربوط به خاک لخت برابر میزان واقعی بارش و در قسمت‌های با پوشش گیاهی برابر تفاضل گیرش از بارش است، به طور کلی می‌توان بیلان آبی لایه اول را به صورت رابطه ۴ بیان کرد.

$$W_1^+ = W_1^- + (P - Q_d - Q_{1r} - E_1) \cdot \Delta t \quad (4)$$

W_1^+ : رطوبت خاک لایه اول در پایان گام زمانی، W_1^- : رطوبت خاک لخت لایه اول در آغاز گام زمانی، P : بارش، Q_d : رواناب سطحی، E_1 : تبخیر-تعرق، Δt : گام زمانی، Q_{12} : میزان جریان از لایه اول به دوم که میزان جریان بر اساس رابطه بروکس-کوری^۱ بیان می‌شود (رابطه ۵).

$$Q_{1r} = k_r \left(\frac{W_1 - \phi_r}{W_{1c} - \phi_r} \right)^{\frac{1}{B_p} + r} \quad (5)$$

K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع، W_1 : رطوبت خاک لایه اول، W_{1c} : ماکزیمم مقدار رطوبت لایه اول، θ_r : رطوبت باقی‌مانده، B_p : نمایه توزیع اندازه ذرات خاک.

روندیابی جریان

این مدل توسط لوهمان^۲ توسعه یافت که معادلات خطی سنت - ونان^۳ را حل می‌کند. این مدل متشکل از کدهایی در زبان فرترن^۴ است که باید کامپایل شود. در این مدل جریان سطحی و زیرسطحی شبیه‌سازی شده در هر سلول توسط مدل VIC ابتدا به خروجی سلول (روندیابی درون سلولی، بر اساس هیدروگراف) و سپس، به شبکه رودخانه (روندیابی بین سلولی) روندیابی می‌شود. روندیابی بین سلولی بر اساس معادلات سنت ونانت است که هیدروگراف واحد در روندیابی بین سلولی به صورت رابطه ۶ تعریف می‌شود. تأخیر زمانی روندیابی بین سلولی تعریف شده بر اساس سرعت جریان و فاصله طی شده (مراکز بین سلولی) است [۱۹].

$$h(x,t) = \frac{x}{\sqrt[3]{\pi D}} \exp\left(-\frac{Ct-x}{\sqrt[3]{DT}}\right) \quad (6)$$

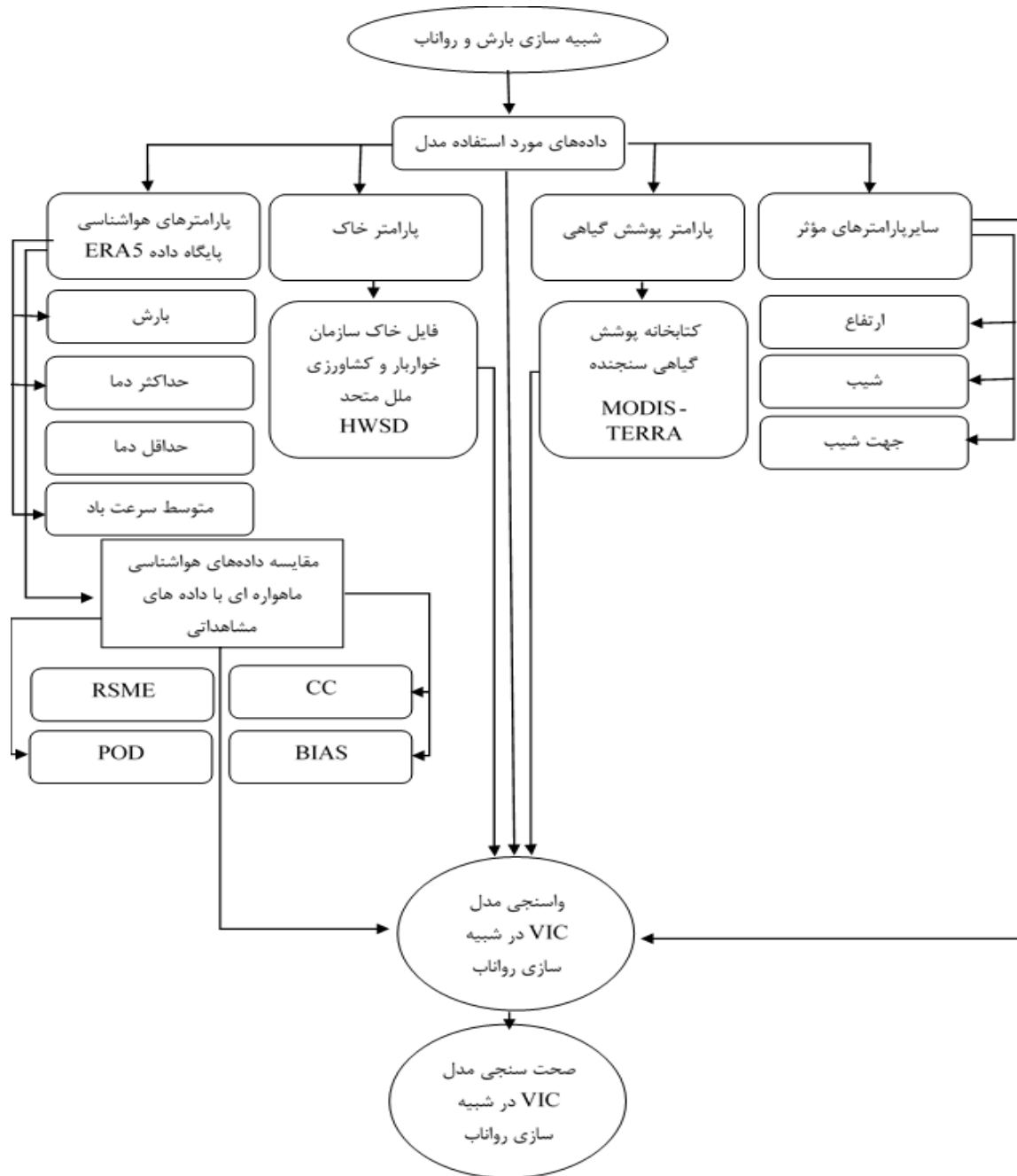
$h(x,t)$: تابع جواب ایمپالس، C : سرعت جریان، T : مدت زمان D : ضریب دیفیوژن، x : مسافت طی شده.

یافته‌های پژوهش

همان‌طور که در بخش روش تحقیق گفته شد، ابتدا داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای ERA5 با ۴ ایستگاه زمینی منتخب (ارومیه، تبریز، مهاباد، خوی) مقایسه شد. معیار انتخاب این ۴ ایستگاه کامل‌تر بودن آن‌ها نسبت به دیگر ایستگاه‌های نزدیک به منطقه مورد مطالعه است. نتایج مقایسه داده هواشناسی با ایستگاه‌های زمینی در جدول‌های ۱ تا ۴ ارائه شده است.

2. Lohmann
3. Saint-Venant
4. Fortran

1. Brooks-Corey



شکل ۳. فلوجارت روش انجام پژوهش

جدول ۱. نتایج مقایسه داده بارش ایستگاه زمینی با داده‌های ERA5

ایستگاه/بازه مقدار بهینه	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RSME)	انحراف نسبی (BIAS)	احتمال آشکارسازی (POD)
ارومیه	۰/۴۸۵۴	۶/۶۵۵۲	۲/۳۸۱۹	۰/۸۸۸۲
تبریز	۰/۴۲۰۸	۳/۲۸۰۷	۱/۱۳۰۲	۰/۸۷۴۳
مهاباد	۰/۵۸۶۶	۵/۹۴۵۹	۱/۱۳۵۵	۰/۸۲۹۲
خوی	۰/۵۷۲۰	۳/۳۰۴۸	۱/۵۰۹۱	۰/۹۶۳۹

جدول ۲. نتایج مقایسه داده دمای حداکثر ایستگاه زمینی با داده‌های ERA5

ایستگاه/بازه مقدار بهینه	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RSME)	انحراف نسبی (BIAS)
ارومیه	۰/۹۵۲۹	۷/۴۵۳۱	-۰/۳۶۹۳
تبریز	۰/۹۶۹۰	۹/۹۹۷۶	-۰/۵۰۳۸
مهاباد	۰/۹۵۶۹	۴/۹۰۲۰	۰/۱۸۷۲
خوی	۰/۹۷۴۶	۵/۷۰۰۶	-۰/۳۱۹۵

جدول ۳. نتایج مقایسه داده حداقل دما ایستگاه زمینی با داده‌های ERA5

ایستگاه/بازه مقدار بهینه	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RSME)	انحراف نسبی (BIAS)
ارومیه	۰/۹۳۸۴	۶/۳۰۹۴	-۱/۰۳۳۱
تبریز	۰/۹۵۵۷	۱۰/۸۳۳۰	-۱/۳۵۴۲
مهاباد	۰/۹۴۵۸	۳/۹۷۸۳	۰/۳۸۵۶
خوی	۰/۹۵۷۳	۷/۹۱۷۱	-۱/۲۸۹۷

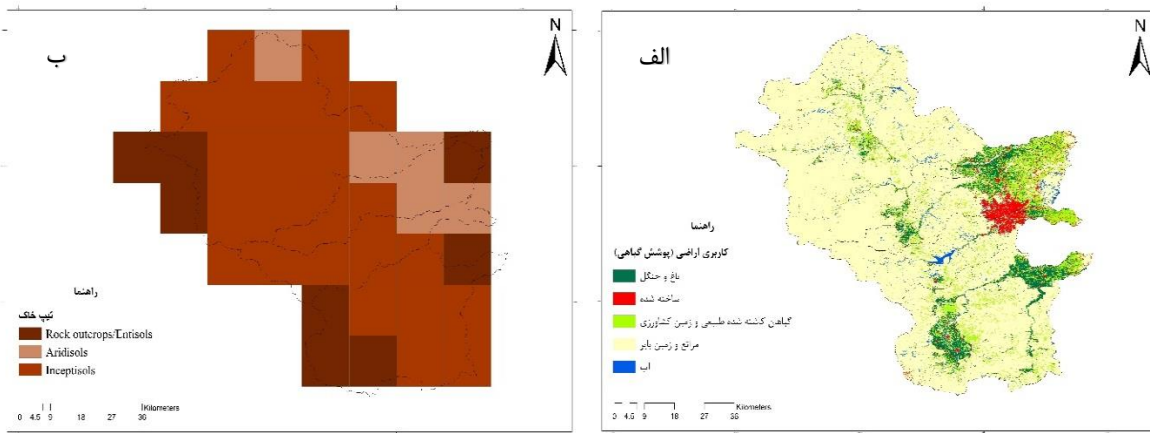
جدول ۴. نتایج مقایسه داده میانگین سرعت باد ایستگاه زمینی با داده‌های ERA5

ایستگاه/بازه مقدار بهینه	ضریب همبستگی (CC)	ریشه میانگین مربعات خطا (RSME)	انحراف نسبی (BIAS)
ارومیه	۰/۲۷۴۵	۱/۵۵۷۴	-۰/۰۱۷۷
تبریز	۰/۲۴۹۱	۲/۲۶۷۲	-۰/۰۳۰۴
مهاباد	-۰/۰۲۲۱	۲/۴۱۶۳	-۰/۰۲۲۲
خوی	۰/۴۹۵۲	۱/۵۵۵۷	-۰/۰۰۳۹

که فقط در ایستگاه خوی بالاترین ضریب همبستگی با ۰/۴۹ درصد وجود داشته است. همچنین، مقایسه سایر آزمون‌های آماری بیانگر کمتر نشان دادن میانگین سرعت در تمامی ایستگاه‌ها نسبت به سرعت باد رخ داده است. با توجه به جدول‌های ارائه شده می‌توان چنین نتیجه گرفت که میزان توانایی ماهواره در تشخیص پارامترهای هواشناسی مانند بارش، حداکثر دما و حداقل دما بسیار خوب بوده که این را می‌توان از احتمال آشکارسازی بالای بارش و بالا بودن میزان همبستگی داده‌های ایستگاه‌های زمینی و داده‌های ماهواره‌ای دریافت کرد.

در ادامه پوشش گیاهی (سال ۲۰۱۵) و داده‌های خاک استفاده شده در پژوهش حاضر بر اساس کتابخانه پوشش گیاهی مودیس و بانک جهانی خاک (سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد) به صورت پیش فرض و مورد نیاز مدل طبقه‌بندی شده و به صورت زیر نمایان شد (شکل ۴):

مقایسه داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های زمینی با داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای ERA5 نشان داد احتمال آشکارسازی بارش در تمامی ایستگاه‌های نامبرده بیش از ۰/۸۰ درصد بوده است و این شاخص در ایستگاه خوی به بالاترین حد یعنی ۰/۹۶ درصد می‌رسد. همچنین، بر اساس نتایج خطای میانگین و درصد انحراف نسبی می‌توان گفت که در تمامی ایستگاه‌ها از نظر میزان بارش، بارش را بیشتر از میزان رخ داده نشان می‌دهد (جدول‌های ۱-۴). از نظر حداکثر و حداقل دما نیز مقایسه نتایج بیانگر همبستگی بیش از ۰/۹۵ در شاخص حداکثر دما و ۰/۹۰ درصد در شاخص حداقل دما است. همچنین، سایر آزمون‌های آماری نشان می‌دهد در تمامی ایستگاه‌ها از نظر حداکثر دما و حداقل دما، حداکثر دما و حداقل دمای کمتری رخ داده، نشان داده است. از لحاظ شاخص باد مقایسه‌ها نشان از عدم همبستگی قوی بین داده‌های ایستگاه‌های زمینی و هواشناسی ماهواره‌ای است، به طوری



شکل ۴: نقشه پوشش گیاهی (ارضی)، (ب) تیپ خاک محدوده مطالعه شده

شبیه‌سازی هیدروگراف جریان خروجی از زیرحوضه‌های

آبخیز

حوضه نازلوچای

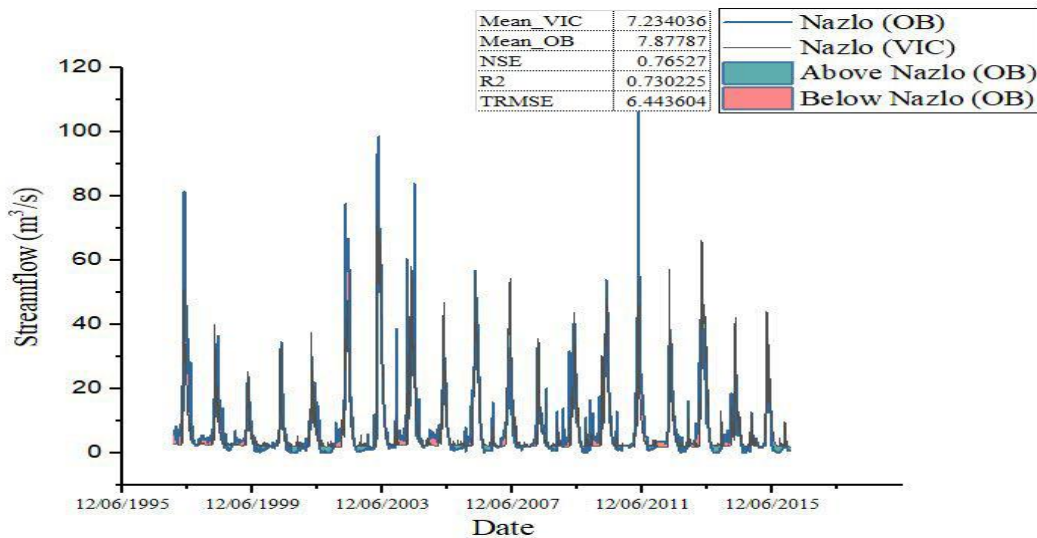
بررسی‌های انجام شده روی دبی‌های روزانه این رودخانه نشان می‌دهد در بازه زمانی ۲۰ ساله میانگین دبی روزانه آن حدود ۷/۸ مترمکعب بر ثانیه است. شبیه‌سازی شده مدل VIC این رقم را کمتر و حدود ۷/۲۳ مترمکعب بر ثانیه نشان می‌دهد جزئیات دقیق این شبیه‌سازی در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است.

بر اساس شکل ۵ خروجی جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل VIC نشان می‌دهد مدل توانایی خوبی در شبیه‌سازی رواناب خروجی زیرحوضه نازلوچای داشته است. به بیان دقیق‌تر، بررسی شاخص ضریب تبیین نشان می‌دهد

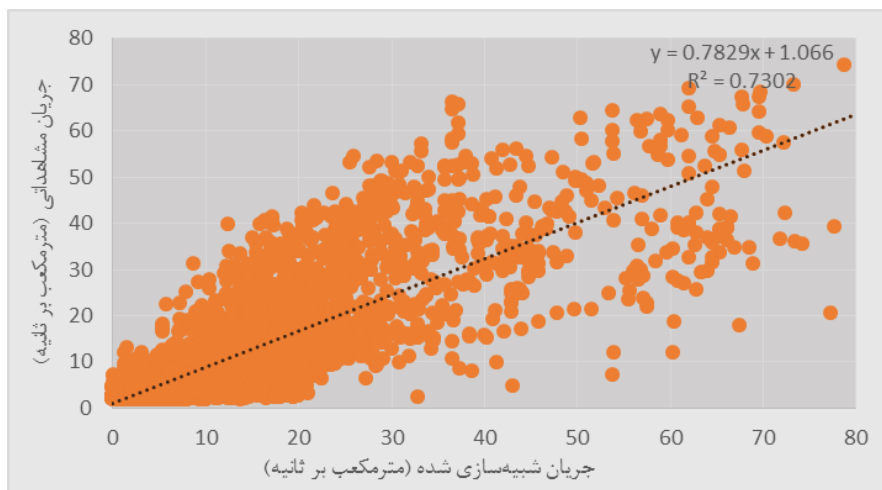
همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده بسیار خوب و برابر با ۰/۷۳ است. ضریب نش که یک دید مناسب و کلی برای هیدروگراف ارائه می‌دهد نیز با ضریب بسیار خوب و بالای ۰/۷۶ بوده و درنهایت، شاخص کاکس - باکس که این پارامتر بیشتر به جریان‌های پایین توجه داشته خروجی آن در زیرحوضه آبریز نازلو عدد ۶/۴۴ است.

زیرحوضه روضه‌چای

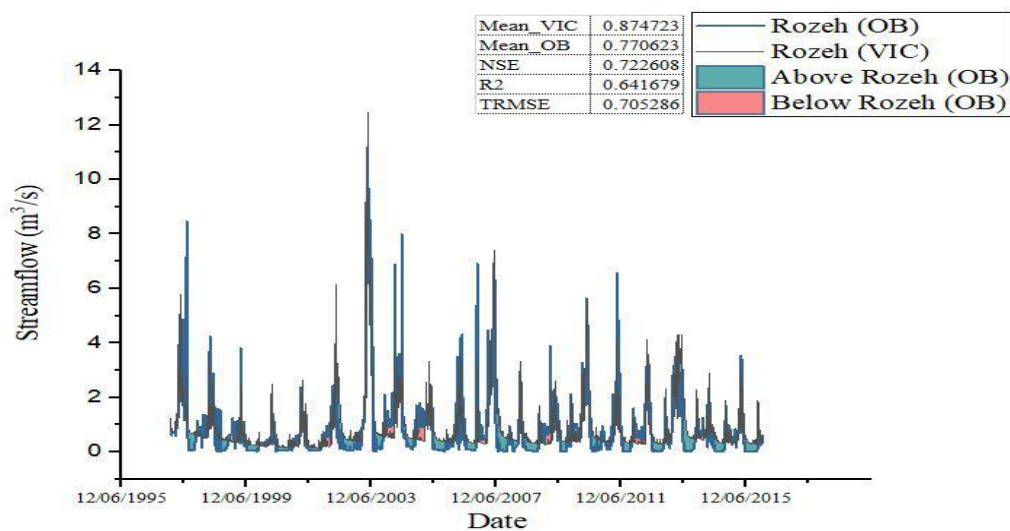
میانگین آبدی سالانه این رودخانه ۵۵ میلیون مترمکعب است. شبیه‌سازی شده جریان خروجی رودخانه روضه‌چای بیانگر زیاد بودن دقت شبیه‌سازی شده در مقایسه با داده‌های دبی روزانه این رودخانه است که جزئیات دقیق آن در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است.



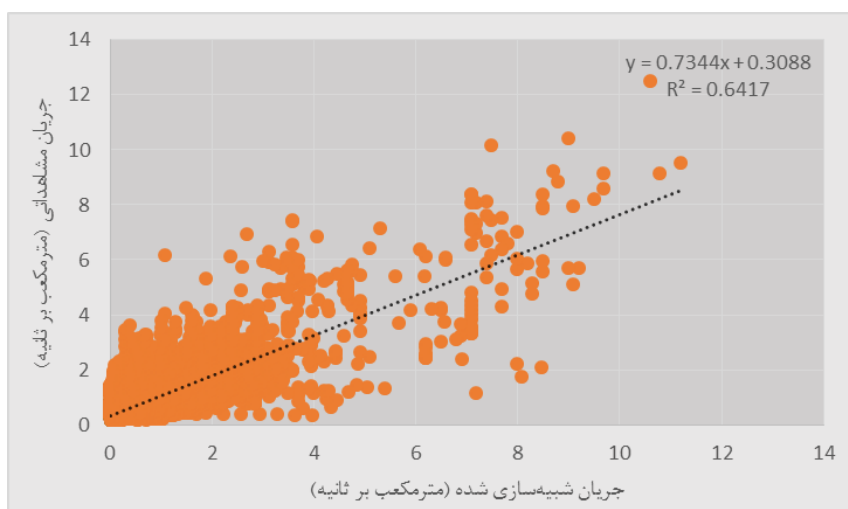
شکل ۵. هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه نازلوچای



شکل ۶. نمودار پراکنش نقاط جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه نالوچای



شکل ۷. هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه روضه‌چای



شکل ۸. نمودار پراکنش نقاط جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه روضه‌چای

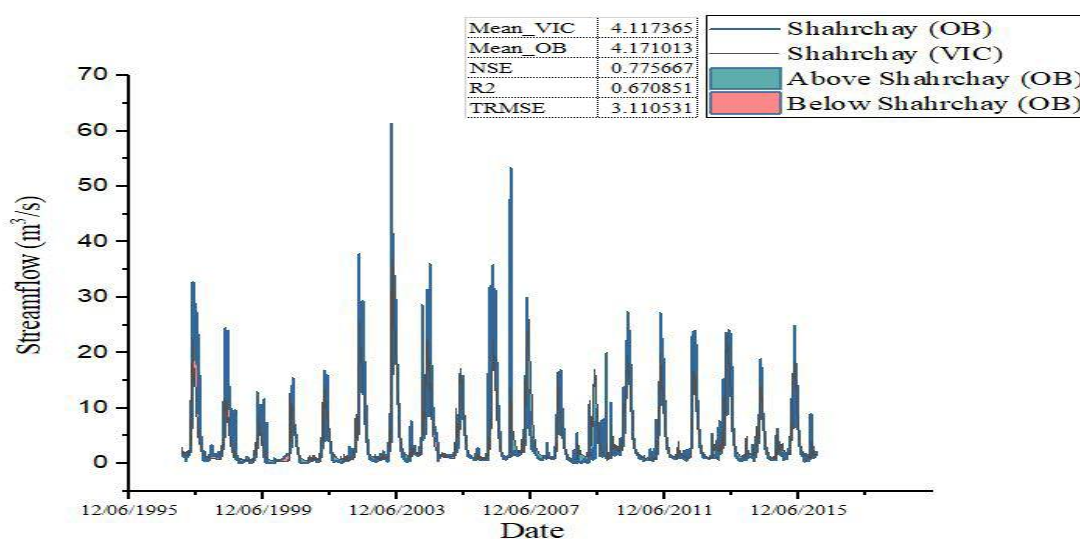
مدل‌سازی با دقت بالایی ضریب یادشده را ۴/۱۱ شبیه‌سازی کرده است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

مدل‌سازی رواناب زیرحوضه آبریز شهرچای نشان می‌دهد مدل VIC در شاخص NSE با ضریب بیش از ۰/۷۷ درصد دقت زیادی در شبیه‌سازی روزانه دبی رودخانه شهرچای دارد. همچنین، ضریب کاکس - باکس در این زیرحوضه بیش از ۳/۱۱ است که دقت کمتر در مدل‌سازی جریان‌های پایین در این رودخانه را نشان می‌دهد و درنهایت، ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده بیش از ۰/۶۷ درصد است.

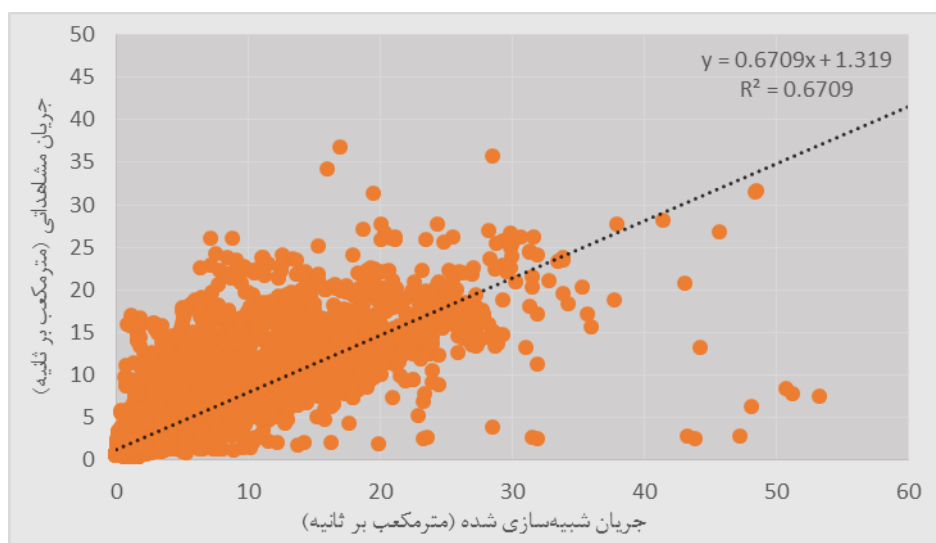
میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی خروجی زیرحوضه آبریز روضه‌چای و رواناب خروجی شبیه‌سازی شده حدود ۰/۶۴ درصد است. همچنین، ضریب نش - ساتکلیف که قدرت شبیه‌سازی شده هیدروگراف را نشان می‌دهد، بیش از ۰/۷۲ است و بیانگر مدل‌سازی مناسب مدل VIC در این زیرحوضه است و درنهایت، ضریب کاکس - باکس که ضریب ۰/۷۰ درصد را نشان می‌دهد.

زیرحوضه شهرچای

ارزیابی داده‌های مشاهداتی ۲۰ سال اخیر نشان می‌دهد میانگین دبی روزانه این رودخانه حدود ۴/۱۷ است که



شکل ۹. هیدروگراف جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه شهرچای



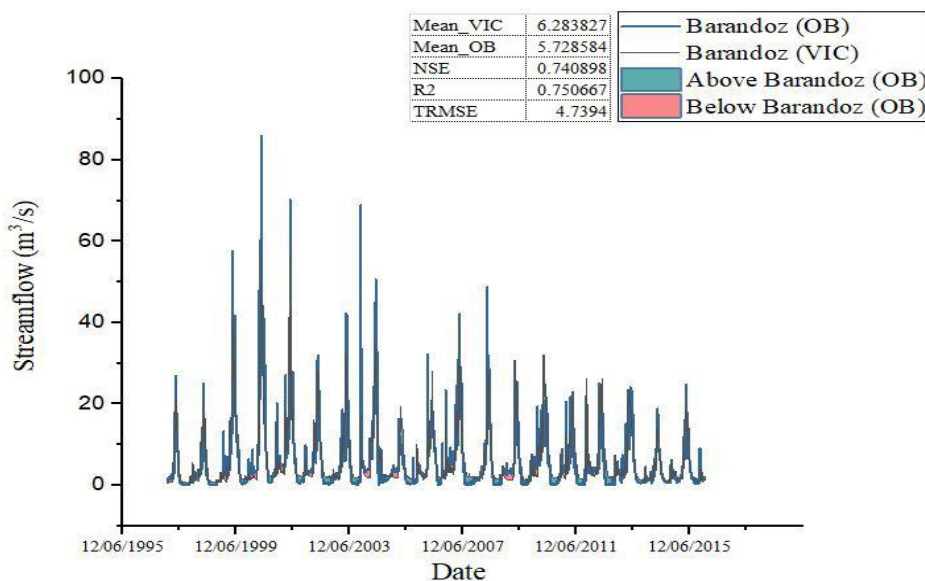
شکل ۱۰. نمودار پراکنش نقاط جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه شهرچای

زیرحوضه باراندوزچای

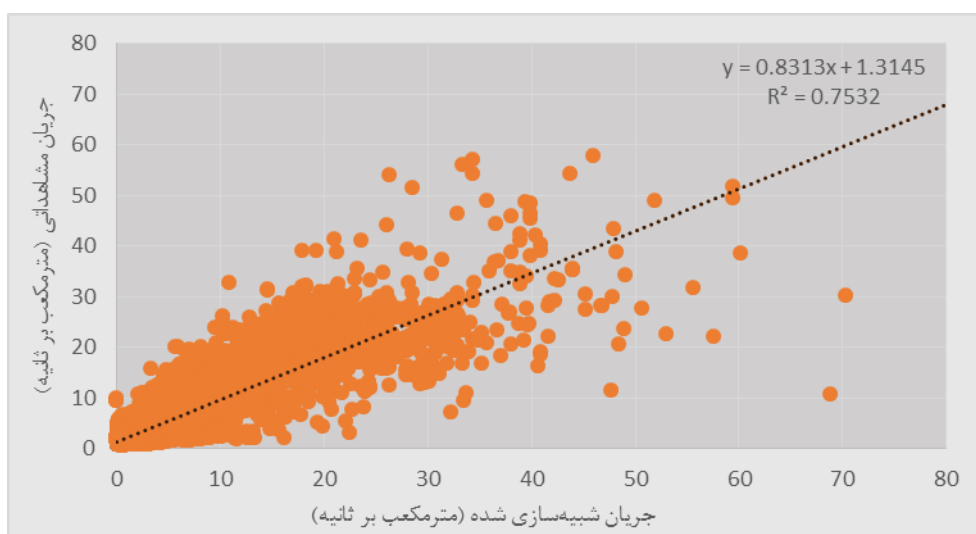
بررسی داده‌های مشاهداتی ایستگاه خروجی باراندوز چای (دیزج) نشان می‌دهد میانگین دبی روزانه این رودخانه ۵/۷۰ مترمکعب بر ثانیه است که واسنجی مدل VIC این رقم را حدود ۶ مترمکعب برآورد کرده است. همچنین، ضریب به‌دست‌آمده از شاخص نش - ساتکلیف در این زیرحوضه بیش از ۰/۷۵ است که دقت خوب مدل‌سازی این مدل را نشان می‌دهد. همچنین، ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و واسنجی‌شده بیش از ۰/۷۵

درصد است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

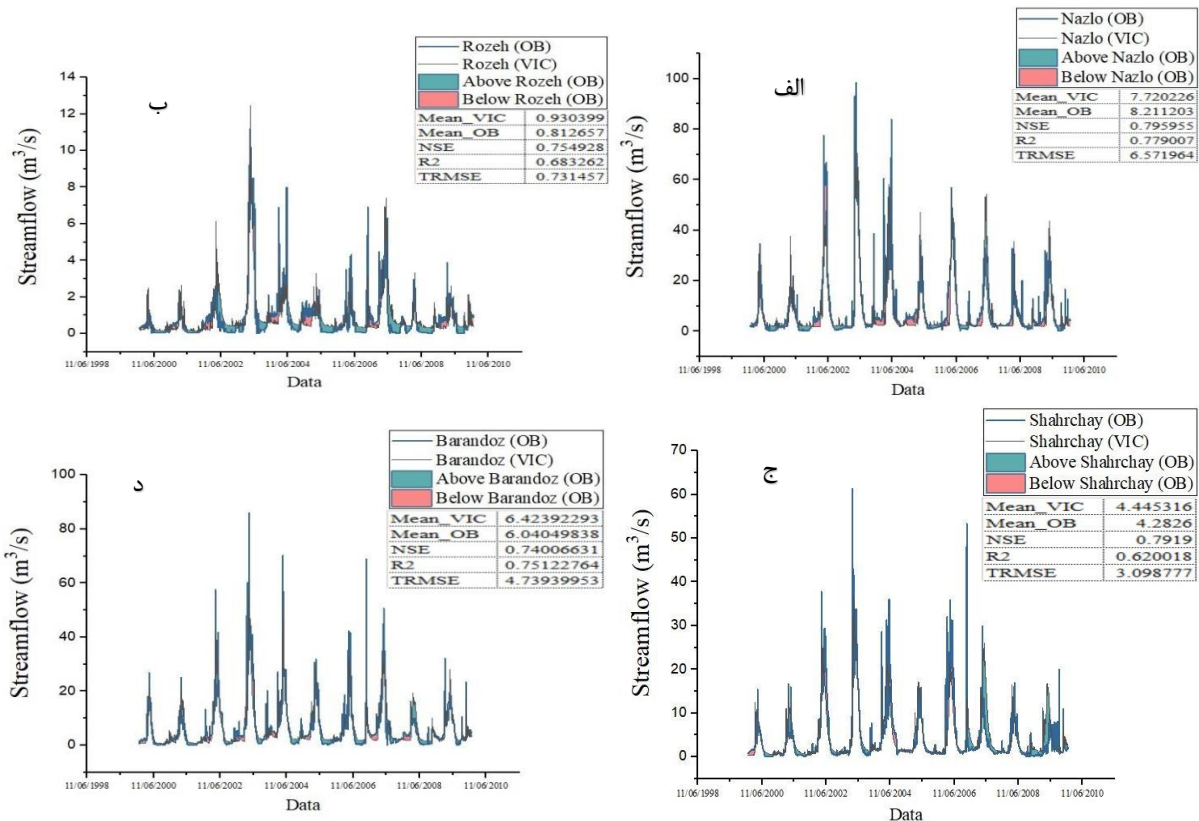
گام بعدی پژوهش، صحت‌سنجی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل VIC در بازه زمانی ۲۰۰۰ - ۲۰۱۰ است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد میانگین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در این دوره در هر ۴ ایستگاه خروجی آبریز بیشتر از میانگین کل دوره بوده و همچنین، ضریب NSE در تمامی زیرحوضه‌ها نیز بالاتر رفته و بیانگر افزایش دقت در زمان پیک دبی است (شکل ۱۳).



شکل ۱۱. هیدروگراف جریان شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی رودخانه باراندوز چای



شکل ۱۲. نمودار پراکنش نقاط جریان شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی رودخانه شهرچای



شکل ۱۳. صحت‌سنجی جریان شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رودخانه الف (نازلوچای، ب) روضه‌چای، ج) شهرچای، د) باراندوزچای

نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای) شبیه‌سازی شده و در نهایت، دبی‌های پیک برای مدیریت سیلاب‌های حوضه آبریز غرب دریاچه ارومیه مشخص شود. مقایسه داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای با داده‌های مشاهداتی نتایج قابل قبولی در برآورد بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل ارائه داد، به طوری که شاخص POD در تمامی ایستگاه‌ها بالای ۰/۸۰ درصد بوده و حتی در ایستگاه خوی بیشتر از ۰/۹۵ درصد است. همچنین، میزان همبستگی بین داده‌های حداکثر و حداقل دما نیز بیش از ۰/۹۳ درصد است که قدرت زیاد داده‌های بارشی ماهواره‌ای ERA5 را نشان می‌دهد. واسنجی رواناب مشاهداتی خروجی زیرحوضه‌ها با رواناب شبیه‌سازی توسط مدل VIC نتایج بسیار خوبی را ارائه داد، به طوری که در تمامی زیرحوضه‌ها مقدار NSE بیش از ۰/۷۲ درصد و ضریب R^2 تمامی زیرحوضه‌ها بیشتر از ۰/۶۴ درصد بوده است که عملکرد خوب شبیه‌سازی رواناب توسط مدل VIC را بیان می‌کند. برای صحت‌سنجی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده از بازه زمانی بیشترین دبی‌های حداکثر (۲۰۰۰-۲۰۱۰) استفاده شد و نتایج نشان داد مدل در شبیه‌سازی رواناب‌های حداکثر دقت

صحت‌سنجی مدل‌سازی مدل VIC در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۰ نشان می‌دهد ضریب NSE در هر ۴ زیرحوضه ارتقا یافته است. به بیان دقیق‌تر، در بازه زمانی اوج پیک، ضریب NSE در زیرحوضه نازلوچای از ۰/۷۶ به ۰/۸۰، زیرحوضه روضه‌چای از ۰/۷۲ به ۰/۷۵، زیرحوضه شهرچای از ۰/۷۷ به ۰/۷۹ افزایش یافته است. فقط در زیرحوضه باراندوزچای (از ۰/۷۵ به ۰/۷۴) کاهش پیدا کرده است. ضریب R^2 نیز در تمامی زیرحوضه‌ها بیش از ۰/۶ بوده و بیشترین مقدار در زیرحوضه نازلوچای ۰/۷۸ درصد بوده است که مدل‌سازی بسیار خوب مدل VIC در شبیه‌سازی رواناب خروجی زیرحوضه‌های غرب دریاچه ارومیه به خصوص رودخانه‌های دائمی را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

یکی از پارامترهای مهم در برنامه‌ریزی و مدیریت سیلاب و مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز، برآورد جریان رودخانه و شبیه‌سازی رواناب آن است [۲۰]. در این پژوهش سعی بر آن بود که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای ورود به مدل VIC، رواناب خروجی ۴ زیرحوضه

- [5]. Asghari Moghadam MR, Natural Geography of the City (Climate, Water and Flood) Islamic Azad University, Central Tehran Branch. 2005. [Persian]
- [6]. Esfandiari F, Rahimi M, Khairizadeh M, Evaluation and spatial prediction of landslide occurrence using statistical models of uncertainty factor and logistic regression (Study area: Khalkhal-Sarcham transportation road), Quantitative Geomorphological Research. 2016; 7(2):19-45. [Persian]
- [7]. Ghahroudi Tali M, Vulnerability of railway lines north of Lut plain against floods. Journal of Geography and Environmental Hazards. 2010; 1(2):1-18. [Persian]
- [8]. Pandey A, Sahu AK, Generation of Curve Number Using Remote Sensing and Geographic Information System. Water Resources, Map India Conference 2002.
- [9]. Hatami Nejad H, Atash Afrooz N, Arvin M, Flood Risk Zoning Using Multi-Criteria Analysis and GIS Case Study: Izeh County, Quarterly Journal of Crisis Prevention and Management. 2015; 7(2):44-57. [Persian]
- [10]. Hosseinzadeh SR, Khaneh Bad M, Khosravi A, Hazard zoning of urban floods using paleosyllabic hydrological data (Case study: Kalat Naderi, Khorasan Razavi), Quarterly Journal of Quantitative Geomorphological Research. 2014; 3(1):20-36. [Persian]
- [11]. Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, Burges SJ, A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research, 1997; 99(7):415-428.
- [12]. Scheidegger JM, Jackson CR, Muddu S, Tomer SK, Filgueira R, Integration of 2D Lateral Groundwater Flow into the Variable Infiltration Capacity (VIC) Model and Effects on Simulated Fluxes for Different Grid Resolutions and Aquifer Diffusivities. Water. 2021; (13):1-24.
- [13]. Majumder R, Walid R, Zheng J, Assessing Water Budget Sensitivity to Precipitation Forcing Errors in Potomac River Basin Using the VIC Hydrologic Model CyberTraining: Big Data High-Performance Computing Atmospheric Sciences. Department of Mathematics and Statistics University of Maryland Baltimore County. 2019.
- [14]. Markert KN, spatial modeling of land cover/land use change and its effects on hydrology within the Lower Mekong Basin, in Land-Atmospheric Research Applications in South and Southeast Asia. 2018; (2):667-698.

بیشتری داشته، به طوری که ضریب NSE در زیرحوضه نازلوچای به ۰/۸۰ درصد برای داده‌های مشاهداتی روزانه رسید. اما نکته‌ای که به آن باید اشاره کرد، قدرت شبیه‌سازی در جریان‌های پایه و رودخانه‌های فصلی است. در این مدل برداشت‌های زیاد آب در بخش کشاورزی مدل را دچار خطای زیادی می‌کند. این برداشت‌ها به‌تنباب و بسته به شرایط هر حوضه فرق دارد، به طور مثال در زیرحوضه روضه‌چای به علت برداشت آب در بازه زمانی خرداد تا اواخر مهرماه رودخانه خشک شده و همین امر یکی از دلایل اصلی بالا بردن خطا در این زیرحوضه است. زیرحوضه‌های نازلوچای و باراندوزچای به علت فصلی نبودن خطای کمتری دارند و شبیه‌سازی جریان پایه در این دو رودخانه به مراتب بهتر از بوده است. با این وجود، مدل در شبیه‌سازی رواناب بیشینه به مراتب بهتر عمل می‌کند و می‌تواند در صورت استفاده از داده‌های بارشی دقیق، رواناب بیشینه و دبی‌های حداکثر را دقیق‌تر شبیه‌سازی کند. در جمع‌بندی کلی می‌توان عنوان کرد که مدل هیدرولوژیکی VIC در شبیه‌سازی رواناب‌های رودخانه‌ها، به‌خصوص رودخانه‌های دائمی بهتر عمل کرده است. همچنین، در صورت استفاده از داده‌های بارشی مشاهداتی درست می‌توان دقت شبیه‌سازی رواناب‌های بیشینه را ارتقا داد.

منابع

- [1]. IPCC: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. 2007: 1-8.
- [2]. Arnold CL, Gibbons JC, Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. J. of the American Planning Association. 1996; 62(2):243-258.
- [3]. Walsh CJ, Roy AH, Feminella JW, Nottingham PD, Groffman PM, Morgan RP. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. Journal of the North American Ethnological Soc. 2005; 24(3):706-723.
- [4]. Sepehr A, Kavian R, Classification of tolerance of urban metropolitan areas of Mashhad to environmental hazards using linear programming of SIMUS periodic interaction. Geography and environmental hazards journal. 2014; (9):125-141.

- [15]. Mallakpour I, Sadegh M, AghaKouchak A, A new normal for streamflow in California in a warming climate: Wetter wet seasons and drier dry seasons. *Journal of Hydrology*. 2018; (567):203-211.
- [16]. Koohi S, Azizian A, Broca L, Investigating the Performance of Reanalyzed Models of Earth2Observe Base and VIC-3L Land Surface Model in Estimating Runoff Outflow from Watersheds, *Journal of Soil and Water Resources Conservation*. 2017; 8(4):117-132. [Persian]
- [17]. Design and Planning Consulting Engineers, Urmia City Master Plan Volume 2. 2008. [Persian]
- [18]. Andreadis KM, Lettenmaier DP, Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. *Advances in water resources*. 2006; 29(6):872-886
- [19]. Lohmann D, NOLTE- HOLUBE R, Raschke E. A large- scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes. *Tellus A*. 1996; 48(5):708-721.
- [20]. Hosseinzadeh MM, Imeni S, Hydrological modeling of Quchak-Rudak watershed using HEC-HMS model, *Earth Knowledge Research*. 2014;7(25):31-43. [Persian]