



## تحلیل حساسیت چندرژیمه مدل هیدرولوژیکی VIC-3L با رویکرد OAT در حوضه کوهستانی قره‌سو گلاله غفاری<sup>۱</sup>

Golaleh Ghaffari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، ایران، [g.ghaffari@areeo.ac.ir](mailto:g.ghaffari@areeo.ac.ir), [golale.ghaffari@gmail.com](mailto:golale.ghaffari@gmail.com)

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources, Kermanshah Province, Iran, [g.ghaffari@areeo.ac.ir](mailto:g.ghaffari@areeo.ac.ir), [golale.ghaffari@gmail.com](mailto:golale.ghaffari@gmail.com)

### چکیده

مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از مدل‌های نیمه‌توزیعی همچون VIC-3L که دارای ساختار سه‌لایه خاک و توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای تبخیر-تعرق، نفوذ و رواناب سطحی هستند، رویکردی کارآمد برای تحلیل رفتار هیدرولوژیکی حوضه‌های آبخیز در مقیاس‌های مختلف فراهم می‌آورد. در این پژوهش، کارایی مدل VIC-3L در بازسازی جریان روزانه و مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه کوهستانی قره‌سو واقع در استان کرمانشاه (به مساحت ۵۵۳۴ کیلومتر مربع) با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک و پیچیدگی توپوگرافی بالا، با بهره‌گیری از داده‌های هیدرواقلمی دوره ۲۰۰۸-۱۹۹۳ و مدل روندیابی Route مورد ارزیابی قرار گرفت.

براساس معیارهای آماری ضریب تبیین و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف که به ترتیب در دوره واسنجی برابر ۰/۷۵ و ۰/۷۳ و در دوره صحت‌سنجی ۰/۷۲ و ۰/۷۴ به دست آمدند، مدل توانایی قابل قبولی در بازتولید هیدروگراف‌های روزانه از خود نشان داد. به منظور تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر دقت شبیه‌سازی، تحلیل حساسیت به روش یک‌پارامتر در هر مرحله (OAT) در دو مرحله پیش و پس از واسنجی اعمال گردید. از مجموع ۳۰ پارامتر مورد آزمون، ۱۱ پارامتر به عنوان متغیرهای حساس شناسایی شدند که عمدتاً شامل ضریب منحنی نفوذ متغیر، ضریب جریان زیرسطحی، حداکثر دبی پایه، کسر رطوبت خاک و عمق لایه‌های مختلف خاک بودند. یافته‌ها نشان داد پارامترهای مرتبط با رفتار زیرسطحی خاک با نسبت حساسیت ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی رواناب و جریان پایه داشته‌اند.

دستاورد اصلی این تحقیق، ارائه رویکردی چندمقیاسی برای تحلیل نقش پارامترهای کلیدی مدل VIC-3L در سه رژیم متفاوت جریان است: جریان کمینه (دبی پایه)، جریان میانگین و جریان بیشینه (دبی اوج). نتایج نشان داد که عمق لایه دوم خاک در هر سه مقیاس جریان به‌عنوان

<sup>۱</sup> استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، ایران،

[g.ghaffari@areeo.ac.ir](mailto:g.ghaffari@areeo.ac.ir), [golale.ghaffari@gmail.com](mailto:golale.ghaffari@gmail.com)

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Soil Conservation and Watershed Management, Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources, Kermanshah Province, Iran, [g.ghaffari@areeo.ac.ir](mailto:g.ghaffari@areeo.ac.ir), [golale.ghaffari@gmail.com](mailto:golale.ghaffari@gmail.com)



حساس‌ترین پارامتر ساختاری عمل می‌کند. در مقابل، برای دستیابی به شبیه‌سازی دقیق دبی پایه، کسر رطوبت خاک و عمق لایه دوم اهمیت بیشتری یافتند، درحالی‌که برای بازسازی دبی‌های اوج، ضریب منحنی نفوذ و ضریب جریان زیرسطحی نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا نمودند. این چارچوب تفکیکی، امکان واسنجی هدفمند مدل را بر اساس اولویت‌های مدیریت منابع آب فراهم می‌سازد و به کاهش عدم‌قطعیت در پیش‌بینی‌های آبی کمک می‌کند.

**واژگان کلیدی:** مدل VIC-3L؛ تحلیل حساسیت؛ پارامترهای هیدرولوژیکی؛ رواناب سطحی؛ دبی پایه؛ حوضه قره‌سو

## مقدمه و کلیات

در دهه‌های اخیر، منابع آبی در بسیاری از نقاط جهان، به‌ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، به‌طور فزاینده‌ای تحت تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی دچار ناپایداری شده‌اند. این تحولات شامل کاهش محسوس بارندگی، افزایش دمای متوسط جهانی، دگرگونی در الگوهای توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها و تشدید فراوانی و شدت پدیده‌های حدی نظیر خشکسالی و سیلاب است که مجموعاً چالش‌های بنیادینی را در مدیریت پایدار منابع آب به وجود آورده است (García-Ruiz et al., 2011). در این راستا، مناطق کوهستانی با اقلیم نیمه‌خشک به دلیل نقش حیاتی ذخایر برفی در تأمین آب و حساسیت بالای آن‌ها به تغییرات دمایی، آسیب‌پذیری ویژه‌ای نسبت به تغییرات اقلیمی از خود نشان می‌دهند (Musselman et al., 2021).

در مواجهه با این شرایط، توسعه و به‌کارگیری ابزارهای مدل‌سازی هیدرولوژیکی جهت شناخت دقیق‌تر رفتار سامانه‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی پاسخ آن‌ها در سناریوهای مختلف، بیش از پیش ضروری است. مدل‌سازی هیدرولوژیکی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌های علمی، قابلیت شبیه‌سازی چرخه آب را در مقیاس‌های زمانی و مکانی گوناگون فراهم می‌آورد و با اتکا بر اصول فیزیکی، ریاضی و آماری، امکان بازسازی و پیش‌بینی فرآیندهای کلیدی نظیر رواناب، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و انتقال جریان را فراهم می‌سازد.

مدل ظرفیت نفوذ متغیر (Variable Infiltration Capacity - VIC) که نخستین بار توسط Liang و همکاران در دهه ۱۹۹۰ توسعه یافت (Liang et al., 1994; 1996)، از جمله پرکاربردترین مدل‌های نیمه‌توزیعی و بزرگ‌مقیاس در مطالعات هیدرولوژیکی است. این مدل فیزیکی و فرآیندمحور، با قابلیت حل معادلات بیلان آب و انرژی در سطح سلول‌های شبکه‌ای، امکان شبیه‌سازی دقیق فرآیندهای سطحی و زیرسطحی را فراهم می‌آورد. تمایز عمده VIC در توانایی آن در نمایش تعاملات پیچیده بین پوشش گیاهی، رطوبت خاک و شارهای انرژی است که آن را به گزینه‌ای مناسب برای مطالعات اقلیمی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی تبدیل کرده است (Rakovec et al., 2019). با این حال، با وجود توانمندی‌های گسترده VIC، استفاده بهینه از آن مستلزم شناخت دقیق از حساسیت پارامترهای ورودی است. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عملکرد مدل VIC به‌شدت به واسنجی دقیق پارامترهای کلیدی وابسته است و انتخاب نادرست این پارامترها می‌تواند منجر به عدم‌قطعیت قابل توجه در نتایج شبیه‌سازی شود (Gou et al., 2020).

تحلیل حساسیت در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، به‌ویژه برای مدل‌های بزرگ‌مقیاس مانند VIC، فرآیندی حیاتی است که به بررسی چگونگی تأثیر تغییرات در پارامترهای ورودی بر خروجی‌های مدل می‌پردازد. این تحلیل نه تنها به شناسایی پارامترهای مؤثر بر دقت شبیه‌سازی کمک می‌کند، بلکه موجب افزایش اطمینان‌پذیری مدل در ارزیابی دینامیک منابع آب و تدوین راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم می‌گردد (Herrera et al., 2022). اهمیت تحلیل حساسیت در توانایی آن برای آشکارسازی تعاملات پیچیده میان پارامترهای مختلف هیدرولوژیکی، از جمله ویژگی‌های رطوبت خاک، عوامل اقلیمی و کاربری اراضی، نهفته است. در سال‌های اخیر، توجه ویژه‌ای به تحلیل عدم‌قطعیت ناشی از پارامترسازی مدل‌های هیدرولوژیکی معطوف شده است. Melsen et al. (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای جامع نشان دادند که تغییرپذیری مکانی حساسیت پارامترها در مدل VIC به‌شدت تحت تأثیر شرایط هیدرواقلمی حوضه قرار دارد و نیاز به رویکردهای منطقه‌ای برای واسنجی پارامترها وجود دارد. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که عدم‌قطعیت ناشی از پارامترسازی می‌تواند به‌اندازه عدم‌قطعیت ناشی از سناریوهای اقلیمی در نتایج نهایی مدل تأثیرگذار باشد (Chegwidden et al., 2024). از این رو، تحلیل حساسیت و کمی‌سازی عدم‌قطعیت، به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی نیمه‌خشک با پیچیدگی‌های توپوگرافی و اقلیمی بالا، امری ضروری است.

در سطح بین‌المللی، مطالعات متعددی به تحلیل حساسیت پارامترهای مدل VIC پرداخته‌اند. Gou et al. (۲۰۲۰) یک چارچوب واسنجی خودکار مبتنی بر تحلیل حساسیت را برای مدل VIC در ۳۰ ایستگاه هیدرومتری در حوضه‌های بزرگ چین توسعه دادند و نشان دادند که انتخاب



پارامترهای حساس بر اساس ویژگی‌های حوزه می‌تواند کارایی و اسنجی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. آن‌ها دریافتند که تعداد پارامترهای حساس بین حوزه‌ها متفاوت است و این تفاوت به شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های خاک بستگی دارد. Melsen et al (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر روی ۱۰۱ حوزه در شیلی با تنوع هیدرواقلمی بالا، به بررسی حساسیت ۴۳ پارامتر خاک، پوشش گیاهی و برف در مدل VIC پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که حساسیت پارامترها به‌شدت وابسته به شرایط اقلیمی حوزه است و در مناطق خشک‌تر، پارامترهای مرتبط با رطوبت خاک اهمیت بیشتری دارند، در حالی که در مناطق مرطوب‌تر، پارامترهای پوشش گیاهی نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کنند.

در زمینه تحلیل عدم قطعیت، Herrera et al (۲۰۲۲) در یک مطالعه مروری جامع، روش‌های مختلف برآورد عدم قطعیت پارامتری در مدل‌های هیدرولوژیکی را بررسی کردند و تأکید کردند که تحلیل حساسیت جهانی (Global Sensitivity Analysis - GSA) نسبت به روش‌های محلی مانند OAT، توانایی بیشتری در شناسایی تعاملات بین پارامترها دارد. Chegwiddden et al (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای اخیر بر روی حوزه‌های شهری، نشان دادند که عدم قطعیت ناشی از پارامترهای هیدرولوژیکی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پیش‌بینی‌های تغییر اقلیم داشته باشد. آن‌ها توصیه کردند که در مطالعات تغییر اقلیم، علاوه بر عدم قطعیت سناریوهای اقلیمی، عدم قطعیت پارامتری نیز باید به‌طور جدی در نظر گرفته شود. مطالعات محدودی به تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولوژیکی در حوزه‌های کوهستانی نیمه‌خشک پرداخته‌اند. Musselman et al (۲۰۲۱) در مطالعه‌ای بر روی حوزه‌های کوهستانی غرب آمریکا نشان دادند که این مناطق به دلیل وابستگی بالا به ذخایر برفی، حساسیت ویژه‌ای نسبت به تغییرات دمایی دارند و مدل‌سازی دقیق فرآیندهای انباشت و ذوب برف در این مناطق حیاتی است.

در ایران، تعداد محدودی مطالعه به تحلیل حساسیت مدل VIC پرداخته‌اند. Azizian et al (۲۰۱۷) تحلیل حساسیت VIC را در حوزه چالوس در سه مقیاس زمانی بررسی کردند و تأثیر پارامترهایی چون ظرفیت رطوبت خاک و عمق لایه دوم را برجسته نمودند. Shafiei et al (۲۰۲۱) نیز در حوزه سفیدرود با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای GLEAM و ASCAT به بهبود دقت کالیبراسیون مدل پرداختند. با وجود مطالعات متعدد در زمینه تحلیل حساسیت مدل VIC، شکاف‌های پژوهشی قابل توجهی وجود دارد؛ اول، اکثر مطالعات به تحلیل حساسیت کلی پارامترها پرداخته‌اند و تفکیک نقش پارامترها در شبیه‌سازی مؤلفه‌های مختلف جریان (دبی پایه، متوسط و اوج) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این در حالی است که درک نقش تفکیکی پارامترها در هر مؤلفه جریان می‌تواند به واسنجی هدفمندتر و کاهش عدم قطعیت کمک کند. دوم، مطالعات محدودی در حوزه‌های کوهستانی نیمه‌خشک ایران به تحلیل حساسیت مدل VIC-3L پرداخته‌اند و نیاز به درک بهتر رفتار این مدل در شرایط خاص اقلیمی و توپوگرافی ایران وجود دارد. سوم، در مطالعات داخلی، کمتر به تحلیل رابطه بین حساسیت پارامترها و مقیاس‌های مختلف جریان (کمینه، میانگین، بیشینه) توجه شده است، در حالی که این موضوع برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی رخدادهای حدی اهمیت بالایی دارد.

اهداف اصلی این پژوهش در چند حوزه کلیدی متمرکز شده است. هدف اول، ارزیابی عملکرد مدل هیدرولوژیکی VIC-3L در شبیه‌سازی دقیق جریان روزانه و بیلان آبی در حوزه آبخیز قره‌سو است که نمونه‌ای از مناطق نیمه‌خشک کوهستانی با توپوگرافی پیچیده محسوب می‌شود. در مرحله بعد، پژوهش به دنبال شناسایی پارامترهای حساس مدل VIC-3L از میان ۳۰ پارامتر مورد بررسی است که با بهره‌گیری از روش تحلیل حساسیت OAT (یک باره یک عامل)، انجام خواهد شد. نوآوری اصلی مطالعه حاضر در ارائه یک چارچوب تحلیل حساسیت چندسطحی است که نقش پارامترهای کلیدی مدل VIC-3L را در سه رژیم جریان (کمینه، میانگین و بیشینه) به‌طور مجزا شناسایی می‌کند. این رویکرد امکان واسنجی هدفمند بر اساس اهداف مدیریتی (مثلاً تأمین آب پایه یا کنترل سیلاب) را فراهم می‌سازد و می‌تواند به‌عنوان الگویی برای سایر مطالعات در حوزه‌های کوهستانی نیمه‌خشک به کار رود.

منطقه مورد مطالعه این پژوهش حوزه آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه، در غرب ایران است. این حوزه به دلایل متعددی انتخاب شده است: اولاً، به عنوان نماینده‌ای از حوزه‌های کوهستانی نیمه‌خشک در زاگرس میانی، امکان تعمیم‌پذیری نتایج به سایر حوزه‌های مشابه را فراهم می‌آورد. ثانیاً، این منطقه از اهمیت استراتژیک بالایی در تأمین آب کشاورزی و شرب منطقه برخوردار است که ضرورت مطالعات دقیق مدیریت منابع آب را دوچندان می‌کند. همچنین، حوزه قره‌سو دارای تنوع اقلیمی و توپوگرافی قابل توجهی است که آن را به یک محیط مدل‌سازی چالش‌برانگیز تبدیل می‌کند. نهایتاً، این حوزه در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات اقلیمی و فشار فزاینده ناشی از بهره‌برداری، آسیب‌پذیری خاصی را نشان داده است.

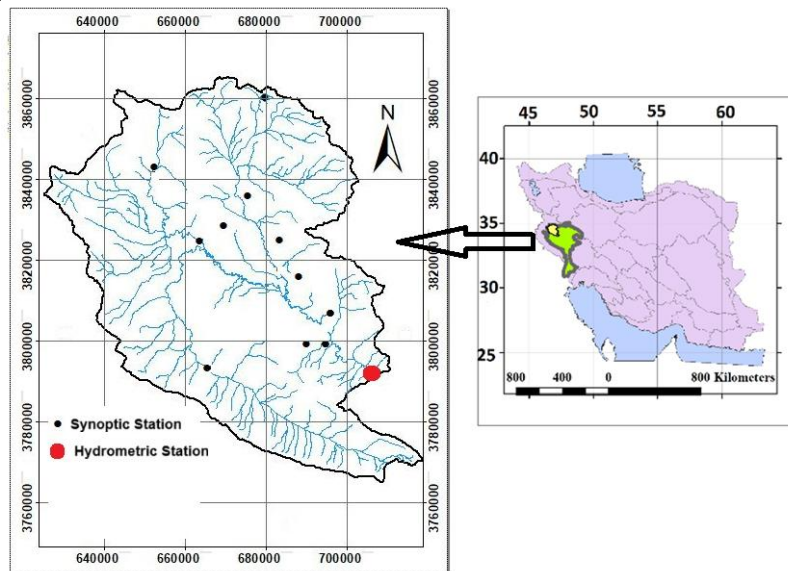
## مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه



حوزه آبخیز قره‌سو در استان کرمانشاه، غرب ایران و در دامنه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه با مساحت تقریبی ۵۵۳۴ کیلومتر مربع، یکی از زیرحوضه‌های مهم کرخه و در رده چهارم حوزه‌های آبخیز کشور است. توپوگرافی آن متنوع بوده و ارتفاع از ۱۱۸۰ تا ۳۳۴۶ متر متغیر است که به الگوهای هیدرولوژیکی پیچیده‌ای منجر می‌شود. رودخانه قره‌سو، اصلی‌ترین منبع آبی منطقه، از سراب‌های شمال‌غربی تغذیه شده و به رودخانه گاماسیاب می‌پیوندد. میانگین بارندگی سالانه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است که عمدتاً در فصول سرد رخ می‌دهد. این حوضه به دلیل تغییرات مکانی و زمانی بارندگی و دما، همچنین توسعه شهری و صنعتی و آلودگی آب، حساسیت بالایی نسبت به پدیده‌های اقلیمی و چالش‌های مدیریت آب نشان می‌دهد. از این‌رو، قره‌سو به‌عنوان نمونه‌ای مناسب برای ارزیابی مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس و تحلیل حساسیت پارامترها در برابر تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی انتخاب شده است. مشخصات تفصیلی فیزیوگرافی و اقلیمی حوضه در جدول ۱ و موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در شکل ۱ ارائه شده است. همچنین مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی حوضه قره‌سو در جدول ۲ ارائه شده است.

شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز قره‌سو در سطح کشور

Fig. 1- Figure 1: Location of the Qareh-Sou Watershed on a National Scale



جدول ۱- مشخصات فیزیوگرافی و اقلیمی حوزه آبخیز قره‌سو

Table. 1. Physiographic and Climatic Characteristics of the Qarasu Watershed

Source	Unit	Value	Characteristic
DEM analysis	km <sup>2</sup>	5.534	Watershed area
DEM (SRTM 30m)	m	1.180–3.346	Elevation range
DEM analysis	m	2.100	Mean elevation
DEM analysis	%	18.5	Mean slope
GIS analysis	km	147	Main channel length
GIS analysis	km/km <sup>2</sup>	2.4	Drainage density
Meteorological data	mm	450	Mean annual precipitation
Meteorological data	mm	300–800	Precipitation range
Meteorological data	°C	13.5	Mean annual temperature
Meteorological data	mm	1.650	Mean annual potential evaporation
Hydrometric data	m <sup>3</sup> /s	8.2	Mean annual discharge
Hydrological analysis	–	0.21	Runoff coefficient



Land use map	–	Rangeland	<b>Dominant land use</b>
Soil map	–	Silty loam	<b>Dominant soil type</b>
Hydrological analysis	–	Snow–rainfall	<b>Hydrological regime</b>

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی واقع در حوزه آبخیز قره‌سو

Table. 2- Characteristics of Hydrometric and Meteorological Stations Located within the Qarasu Watershed

Elevation (m)	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Type	Station
1500	34.3167	47.0667	Hydrometric (basin outlet)	Qorbaghestan
1320	34.3142	47.0650	Synoptic (urban)	Kermanshah
1360	34.7167	46.6667	Synoptic / Rain gauge	Ravansar
1380	~34.48	~47.66	Synoptic / Climate	Sahneh
1380	~34.51	~46.61	Synoptic / Local	Kouzran
1600	~34.28	~46.23	Synoptic / Regional	Kerend-e Gharb
1520	~34.33	~46.41	Synoptic / Local	Gahvareh
1494	~35.50	~46.33	Synoptic	Paveh
1335	~34.113	~46.53	Synoptic / Regional	Eslamabad-e Gharb
1000	~34.14	~45.92	Synoptic / Adjacent	Gilan-e Gharb

### معرفی مدل VIC-3L

مدل VIC (Liang et al., 1996; Liang et al., 1994) یک مدل هیدرولوژیکی نیمه‌توزیعی در مقیاس بزرگ<sup>۱</sup> است که توازن آب و انرژی را درون هر سلول شبکه‌ای به صورت مستقل محاسبه می‌نماید. در این مدل، تغییرات مکانی کلاس‌های پوشش اراضی در سطح زیرشبکه‌ای (sub-grid) به صورت آماری در نظر گرفته می‌شود. همچنین، برای لحاظ کردن ناهمگنی مکانی در ظرفیت نفوذپذیری خاک، از فرمول‌بندی مدل مفهومی Xinanjiang (Zhao et al., 1980) استفاده شده است. این رویکرد امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر تغییرپذیری ظرفیت ذخیره رطوبت خاک را در مقیاس زیرشبکه‌ای فراهم می‌سازد. این مدل در محاسبه تعادل آبی خود سه نوع تبخیر را لحاظ می‌کند: تبخیر از سطح خاک بدون پوشش، تبخیر از لایه سایه‌انداز (کانوپی) برای هر کلاس پوشش گیاهی و تعرق از پوشش‌های گیاهی مختلف. تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از معادله پنمن-مانتیب محاسبه می‌شود. تبخیر و تعرق واقعی در هر سلول شبکه‌ای، به صورت مجموع این سه نوع تبخیر محاسبه می‌شود که وزن آن‌ها براساس سهم مساحت هر کلاس پوشش زمین تعیین می‌گردد (Andreadis & Lettenmaier, 2006).

فرآیند تولید رواناب در مدل VIC بسته به تعداد لایه‌های خاک تعریف‌شده، با الگوریتم‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. رایج‌ترین ساختار کاربردی این مدل، نسخه سه‌لایه‌ای آن (VIC-3L) است که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است. این نسخه، توسعه‌یافته مدل دو لایه‌ای اولیه (VIC-2L) بوده و به منظور نمایش دقیق‌تر فرآیند تولید رواناب طراحی شده است (Liang et al., 1996). رواناب سطحی از طریق مازاد نفوذ<sup>۲</sup> و با به‌کارگیری فرمول‌بندی مدل Xinanjiang (Zhao et al., 1980) برای دو لایه بالایی خاک تولید می‌شود. در هر گام زمانی، رواناب سطحی ( $Q_d$ ) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_d [N + 1] \Delta t = P. \Delta t - W_1^c + W_1^- [N + 1] \quad 1$$

$$i_0 + P. \Delta t \geq i_m$$

$$Q_d [N + 1] \Delta t = P. \Delta t - W_1^c + W_1^- [N + 1] + W_1^+ \left( 1 - \frac{i_0 + P \Delta t}{i_m} \right)^{1+b_i} \quad 2$$

<sup>1</sup> Macroscale

<sup>2</sup> infiltration excess

$$i_0 + P \cdot \Delta t \leq i_m$$

در این روابط  $Q_d[N+1]$  رواناب سطحی (مستقیم) از خاک لخت به میلی‌متر،  $P$  بارش به میلی‌متر،  $W_1^- [N+1]$  رطوبت خاک در لایه اول در آغاز گام زمانی به میلی‌متر،  $W_1^c$  بیشینه مقدار رطوبت لایه اول،  $i_0$  ظرفیت نفوذ مربوط به  $A_s$ ،  $\Delta t$  گام زمانی و  $b_1$  پارامتر شکل نفوذ می‌باشد. جریان پایه<sup>۱</sup> در لایه سوم خاک تولید می‌شود و از فرمول‌بندی آرنو<sup>۲</sup> پیروی می‌کند (Franchini and Pacciani, 1991) که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_b[N+1] = \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2[N+1] \quad ۳$$

$$0 \leq W_2[N+1] \leq W_s W_2^c$$

$$Q_b[N+1] = \frac{D_s D_m}{W_s W_2^c} W_2[N+1] + \left( D_m - \frac{D_s D_m}{W_s} \right) \left( \frac{W_2^- [N+1] - W_s W_2^c}{W_2^- - W_s W_2^c} \right)^2 \quad ۴$$

$$W_2^- [N+1] \geq W_s W_2^c$$

که  $Q_b[N+1]$  رواناب زیر سطحی از خاک لخت،  $D_m$  بیشینه سرعت رواناب زیر سطحی،  $D_s$  کسری از  $W_2^c$ ،  $D_m$  بیشینه مقدار رطوبت لایه دوم،  $W_s$  کسری از  $W_2^c$  به طوری که  $W_s \leq D_s$  و  $W_2^- [N+1] \leq W_s D_s$  رطوبت خاک در لایه دوم در آغاز گام زمانی است.

### آماده‌سازی داده‌ها و ورودی‌های مدل VIC-3L

اجرای مدل VIC-3L نیازمند تهیه و سازماندهی مجموعه‌ای از داده‌های ورودی در قالب فرمت NetCDF است. در این مطالعه، برای شبیه‌سازی شبکه هیدرولوژیکی حوضه قره‌سو، تفکیک مکانی شبکه به صورت  $0.125^\circ$  در  $0.125^\circ$  درجه تعریف و کل منطقه به ۲۹ سلول تقسیم شد. داده‌های هواشناسی شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، فشار، تابش طول موج بلند و رطوبت نسبی از پایگاه ECMWF برای دوره زمانی ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۸ و با تفکیک زمانی ۱۲ ساعته دریافت شد و برای ارزیابی دقت داده‌های اقلیمی ECMWF، مقایسه‌ای با داده‌های ۵ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه و اطراف آن انجام شد.

نتایج نشان داد که داده‌های بارش، دمای حداقل و حداکثر هماهنگی خوبی با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک دارند، به‌ویژه در پیش‌بینی بارش روزانه و ماهانه که شاخص‌های آماری مانند ضریب همبستگی، RMSE و ME نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل هستند. مطابق یافته‌های Ghaffari and et al., (2025) داده‌های ECMWF برای دما و بارش در مقیاس روزانه و ماهانه مناسب بوده و می‌توان از آن‌ها در مناطقی که داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در دسترس نیست، بهره برد. با این حال، خطاهای احتمالی به‌عنوان یکی از منابع عدم قطعیت در بخش بحث در نظر گرفته شده است (جدول ۳).

جدول ۳- خلاصه نتایج ارزیابی داده‌های ECMWF بر اساس ایستگاه‌های سینوپتیک

Table. 3- Summary of ECMWF Data Evaluation Based on Synoptic Stations

NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	Parameter
0.65	2.44 mm	0.78–0.85	Daily precipitation
0.73	13.66 mm	0.78–0.85	Monthly precipitation
>0.80	1.5–2.2 °C	0.92–0.95	Minimum temperature
>0.80	2.1–2.8 °C	0.89–0.93	Maximum temperature

1 Baseflow

2 Arno formulation



برای استخراج ویژگی‌های خاک، از پایگاه جهانی HWSD سازمان FAO با تفکیک مکانی ۱ کیلومتری (۳۰ آرک- ثانیه) استفاده گردید. این اطلاعات شامل پارامترهایی نظیر بافت خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، عمق لایه‌ها، رطوبت اشباع و ظرفیت نگهداری رطوبت در سه لایه خاکی بود. پوشش گیاهی و شاخص‌های وابسته نیز از داده‌های GLDAS و تصاویر MODIS MCD12Q1 با مقیاس مکانی ۵۰۰ متر به‌دست آمد. این داده‌ها شامل اطلاعات مربوط به شاخص سطح برگ، مقاومت روزه‌ای، ارتفاع پوشش گیاهی، آلبدو و سهم هر نوع پوشش در سطح سلول بودند. به‌منظور لحاظ کردن اثر ارتفاع در بارش و برف، فایل‌های نوار برفی با استفاده از محصول MODIS MOD10A2 تهیه گردید.

## مدل Route و روندیابی جریان

مدل VIC-3L به‌صورت مستقل در هر سلول اجرا شده و خروجی آن، شامل رواناب سطحی و جریان پایه، برای انتقال به خروجی حوضه نیازمند مدل روندیابی است (Yapo et al., 1998). در این پژوهش، از مدل Route که یک مدل روندیابی ساده مبتنی بر تابع انتقال خطی است، استفاده گردید. در این مدل، رواناب درون سلولی ابتدا توسط یک هیدروگراف واحد پیچشی در هر سلول مدل‌سازی می‌شود، سپس جریان حاصل به‌سمت شبکه رودخانه هدایت می‌گردد (Lohmann et al., 1998). برای اجرای مدل Route، علاوه بر خروجی‌های روزانه VIC-3L، فایل‌هایی نظیر نقشه مسیر جریان، سرعت جریان، ضریب انتشار، ماسک سلولی (Xmask)، درصد مشارکت هر سلول، مکان ایستگاه هیدرومتری و فایل کنترل مدل تهیه شد. این داده‌ها با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) و در همان تفکیک مکانی VIC-3L آماده‌سازی گردیدند.

## تحلیل حساسیت پارامترهای مدل

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی تأثیر نسبی پارامترهای کلیدی مدل VIC-3L بر نتایج شبیه‌سازی، از روش تحلیل حساسیت یک پارامتر در هر مرتبه (One factor at a Time) OAT بهره گرفته شد. در این رویکرد، هر پارامتر به‌طور مستقل و در بازه‌ای مشخص از مقادیر ممکن تغییر داده شده و پاسخ مدل در خروجی‌هایی مانند دبی جریان مورد بررسی قرار گرفت. توجیه انتخاب رویکرد تحلیل حساسیت در این پژوهش، یک تصمیم کاملاً آگاهانه و سنجیده بود؛ با توجه به اینکه مدل ما با تعداد زیادی پارامتر اولیه (۳۰ پارامتر) سروکار داشت، استفاده از روش‌های جامع‌تر اما محاسباتی‌تر مانند تحلیل حساسیت جهانی (GSA) عملاً پرهزینه و دشوار بود؛ بنابراین، روش تحلیل حساسیت «یک پارامتر در هر مرتبه (OAT) را برگزیدیم تا در گام اول، روی هدف اصلی مطالعه که همانا شناسایی سریع و اولیه پارامترهای مؤثر برای واسنجی بود، متمرکز شویم و از پیچیدگی‌های تحلیل تعاملات پارامتری در مرحله کنونی اجتناب کنیم. از سوی دیگر، انتخاب این روش مزیت مهم دیگری نیز داشت و آن امکان مقایسه مستقیم نتایج ما با غالب مطالعات پیشین انجام‌شده در زمینه مدل VIC بود که از همین رویکرد استفاده کرده‌اند (Gou et al., 2017; Azizian et al., 2020). لازم به ذکر است که هرچند این روش یک روش موضعی ساده و بسیار رایج برای شناسایی پارامترهای مؤثر در گام‌های زمانی مختلف (روزانه، ماهانه و سالانه) است، اما محدودیت اصلی آن در عدم توانایی تشخیص تعاملات پیچیده بین پارامترها را به‌طور کامل در نظر گرفته‌ایم و این نکته به‌صورت مفصل در بخش بحث مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## واسنجی مدل‌های VIC-3L و Route

در این پژوهش، فرایند واسنجی مدل VIC-3L بر پایه پنج پارامتر کلیدی انجام گرفت که شامل: منحنی نفوذ متغیر (b\_infil)، کسری از  $Ds^2$  (Ds)، پارامتر  $Ds_{max}$  (Dm)، کسری از حداکثر رطوبت خاک<sup>۳</sup> (Ws) و ضخامت هر لایه خاک مرطوب<sup>۴</sup> (D1، D2 و D3) بودند. این پارامترها، بیشترین تأثیر را بر رفتار هیدرولوژیکی مدل دارند و به‌صورت تجربی و از طریق آزمون و خطا در دوره واسنجی، مقداردهی شدند. در کنار این پارامترها، مدل Route نیز برای شبیه‌سازی دقیق جریان خروجی حوضه نیازمند واسنجی جداگانه‌ای بود. در این مدل، دو پارامتر مؤثر شامل سرعت موج (wave speed) و ضریب پخشیدگی (diffusivity coefficient) به‌عنوان ورودی‌های حساس در فرآیند روندیابی جریان معرفی شده و با هدف بهینه‌سازی هیدروگراف خروجی، مقادیر آن‌ها تنظیم گردیدند. بازه تغییرات پارامترها بر اساس مطالعات پیشین (Liang et

1 Variable infiltration curve parameter  
2 fraction of the Dsmax parameter  
3 Fraction of maximum soil moisture  
4 thickness of each soil moisture layer



al., 1996; Gou et al., 2020; Melsen et al., 2022)، مستندات رسمی مدل VIC ویژگی‌های فیزیکی خاک منطقه استخراج‌شده از پایگاه HWSO تعیین شد.

به‌منظور ارزیابی کارایی مدل، دوره زمانی ۲۰۰۳/۰۱/۰۱ تا ۲۰۰۸/۰۹/۳۰ به‌عنوان دوره واسنجی و دوره ۱۹۹۳/۰۱/۰۱ تا ۲۰۰۲/۰۹/۳۰ به‌عنوان دوره اعتبارسنجی انتخاب شد. داده‌های دبی روزانه ایستگاه هیدرومتری قورباغستان به‌عنوان مرجع مشاهداتی برای واسنجی استفاده گردید. انتخاب این بازه زمانی به دلیل وقوع شکست در منحنی جرم بارش- رواناب حوضه در سال ۲۰۰۹ و تأثیر عملیات آبخیزداری بر رژیم طبیعی جریان انجام شد. بدین ترتیب، خروجی مدل به‌صورت قبل و بعد از مداخلات انسانی به‌دقت مورد ارزیابی قرار گرفت.

## معیارهای کارایی مدل

برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های شبیه‌سازی در این مطالعه، از پنج شاخص آماری شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، ضریب کارایی ناش-ساتکلیف<sup>۱</sup> (NSE)، ضریب NSE برای لگاریتم دبی‌ها (NSE\_log)، درصد خطای سیستماتیک (PBIAS) و نسبت RMSE به انحراف معیار (RSR) استفاده شد. این شاخص‌ها به‌صورت کامل، توان مدل در بازتولید تغییرات زمانی جریان و نزدیکی مقادیر شبیه‌سازی‌شده به مقادیر مشاهداتی را نشان می‌دهند.

- ضریب تبیین ( $R^2$ ): نشان می‌دهد چه درصدی از واریانس داده‌های مشاهداتی توسط مدل توضیح داده می‌شود؛ مقدار نزدیک به ۱ نشانگر تطابق خوب است.

$$R^2 = 1 - [\Sigma(O_i - S_i)^2] / [\Sigma(O_i - \bar{O})^2] \quad 5$$

- ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSE): معیاری کارایی مدل در بازتولید تغییرات زمانی جریان؛ مقدار نزدیک به ۱ بهترین حالت است و مقادیر منفی هم ممکن است دیده شود.

$$NSE = 1 - [\Sigma(O_i - S_i)^2] / [\Sigma(O_i - \bar{O})^2] \quad 6$$

- ضریب NSE برای لگاریتم دبی‌ها (NSE\_log): با استفاده از لگاریتم داده‌ها، به اهمیت دبی‌های پایین پاسخ بهتر داده می‌شود؛ مناسب برای ارزیابی جریان پایه.

$$NSE\_log = 1 - [\Sigma(\log(O_i + \epsilon) - \log(S_i + \epsilon))^2] / [\Sigma(\log(O_i + \epsilon) - \log(\bar{O} + \epsilon))^2] \quad 7$$

- درصد خطای سیستماتیک (PBIAS): درصد خطای سیستماتیک مدل؛ نشان می‌دهد آیا مدل بطور کلی دبی را بیش از حد یا کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌کند.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad 8$$

- نسبت RMSE به انحراف معیار (RSR): نسبت RMSE به انحراف معیار مشاهدات؛ مقادیر کمتر از ۱ تا ۲ نشان‌دهنده عملکرد نسبتاً خوب است و واحد مقیاسی ندارد.

$$RMSE = \sqrt{[(1/n) \times \Sigma(O_i - S_i)^2]} \quad 9$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad 10$$

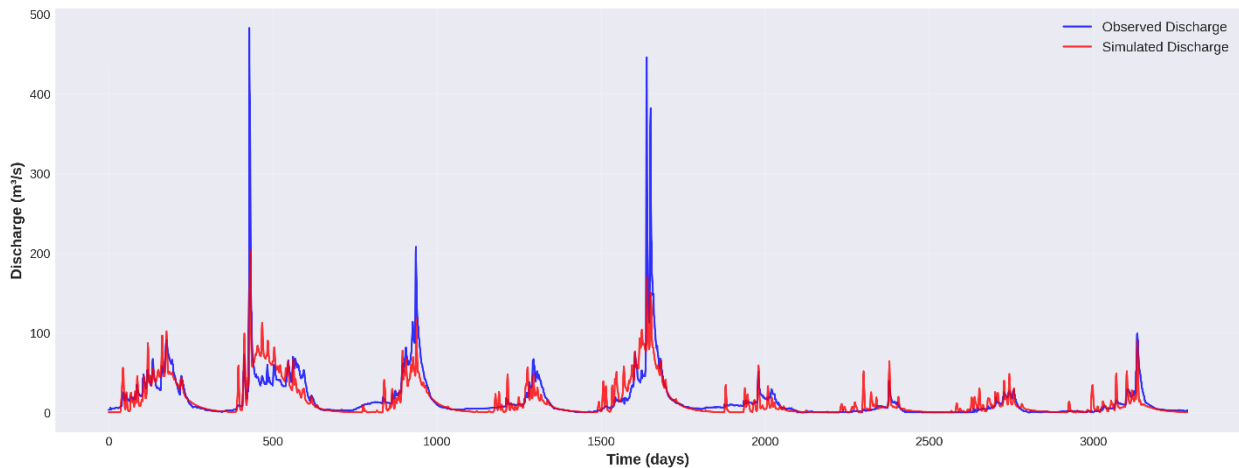
$$\frac{RMSE}{\sigma} = RSR \quad 11$$

که  $O_{obs}$  داده‌های مشاهده‌ای،  $\bar{O}$  میانگین داده مشاهده‌ای،  $S_{sim}$  داده شبیه‌سازی شده،  $\bar{S}$  میانگین داده شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌هاست (Bray & Xie, 1993; Gupral, Harmel, Haggard, & Schmidt, 2008; Krause, Boyle). استفاده از شاخص‌های متنوع امکان ارزیابی جامع‌تر عملکرد مدل را در رژیم‌های مختلف جریان فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، NSE\_log بر دبی‌های پایین تأکید دارد و برای ارزیابی

شبیه‌سازی دبی پایه مناسب است. همچنین می‌توانیم مدل را در جنبه‌های مختلف ارزیابی کنیم، از جمله توانایی بازتولید روند کل ( $R^2/NSE$ )، حساسیت به مقادیر کم ( $NSE\_log$ ) و اندازه‌گیری بی‌انطباق کلی ( $PBIAS$ ) و تغییرات نسبت به پراکندگی مشاهداتی ( $RSR$ ).

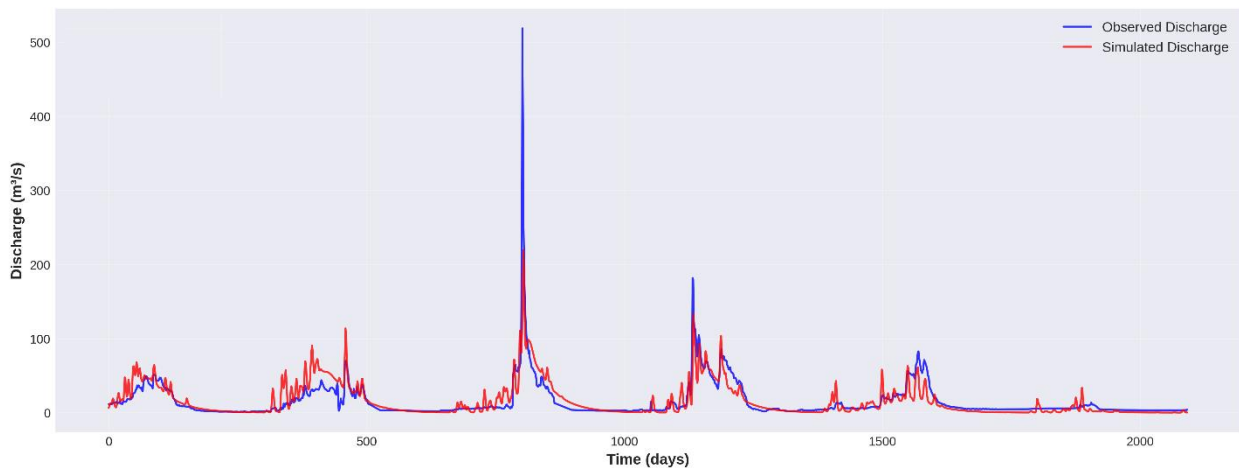
#### نتایج

در این مطالعه، به‌منظور اجرای مدل VIC-3L و مدل روندیابی Route، مجموعه‌ای از فایل‌های ورودی شامل داده‌های مکانی و توصیفی تهیه گردید. این فایل‌ها شامل نقشه‌های پارامترهای خاک، پوشش گیاهی، باندهای برف، مسیر جریان و مدل رقومی ارتفاع (DEM) بودند که همگی به تفکیک مکانی  $0.125^\circ$  درجه پردازش شده‌اند. با استفاده از این تفکیک، کل محدوده حوزه آبخیز قره‌سو به ۲۹ سلول محاسباتی تقسیم شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی روزانه در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند، که نشان‌دهنده دقت و کارایی مدل در بازتولید روندهای هیدرولوژیکی حوضه مورد مطالعه است.



شکل ۲- نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در دوره واسنجی

Fig. 2- The results of simulation of the model during calibration period



شکل ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل در دوره صحت‌سنجی

Fig. 3- The results of model simulation in the verification period

نتایج ارزیابی مدل با استفاده از شاخص‌های آماری متنوع در جدول ۴ ارائه شده است. این شاخص‌ها به‌منظور سنجش دقت و قابلیت اعتماد مدل در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌کار رفته‌اند.

جدول ۴- نتایج حاصل از ارزیابی مدل توسط شاخص‌های آماری مختلف

Table. 4- The results of the model evaluation by Using Various Statistical Indices

RSR	PBIAS %	NSE_log	NSE	R <sup>2</sup>	End Date	Start Date	Phase
0.52	-8.2	0.68	0.73	0.75	9/30/2008	1/1/2003	Calibration
0.51	-5.4	0.71	0.74	0.72	1/1/2003	1/1/1993	Validation

این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی جریان رودخانه در هر دو دوره می‌باشد. در دوره صحت سنجی ضریب کارایی ناش-ساتکلیف (NSE) برابر با ۰/۷۴ به دست آمد که طبق معیارهای موریاوسی و همکاران (۲۰۰۷) نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش مدل است. ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) نیز برابر با ۰/۷۲ بوده که بیانگر آن است که مدل حدود ۷۲ درصد از واریانس داده‌های دبی مشاهده‌شده را توضیح می‌دهد. مدل توانسته الگوی کلی تغییرات زمانی جریان، از جمله روندهای فصلی و زمان وقوع رخداد‌های اصلی جریان را به خوبی بازنمایی کند. با این حال، در شرایط جریان اوج (سیلابی) انحراف‌هایی مشاهده می‌شود و مدل معمولاً دبی‌های بسیار بالا را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. این موضوع با مقدار مثبت PBIAS سازگار بوده و یکی از محدودیت‌های رایج مدل‌های هیدرولوژیکی است، به‌ویژه در رخداد‌های سیلابی که فراتر از دامنه کالیبراسیون قرار دارند.

تحلیل دقیق نمودارهای شکل‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی دبی‌های اوج تمایل به کم‌برآوردی دارد مدل در شرایط جریان پایه و جریان‌های متوسط عملکرد بهتری دارد و در دوره‌های کم‌جریان، تطابق بیشتری بین مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده دیده می‌شود. بیشترین اختلاف در رخداد سیلابی نوامبر ۱۹۹۴ مشاهده شد که دبی مشاهده‌شده ۴۸۲/۴۸ مترمکعب بر ثانیه و مقدار شبیه‌سازی‌شده ۲۰۳/۰۹ مترمکعب بر ثانیه بود، یعنی حدود ۵۸ درصد کم‌برآوردی. در کل به‌طور میانگین دبی‌های اوج حدود ۱۵ تا ۲۵٪ کمتر از مقادیر مشاهده‌شده شبیه‌سازی شده‌اند. این اختلاف را می‌توان از سه منظر توضیح داد: نخست، محدودیت تفکیک مکانی؛ استفاده از سلول‌های ۰/۱۲۵ درجه‌ای (حدود ۱۲ کیلومتر) موجب هموارسازی ناهمگنی‌های فضایی بارش و توپوگرافی شده و در نتیجه پیک‌های سیلاب به‌طور کامل شبیه‌سازی نشده‌اند. دوم، ساختار مدل روندیابی (Route) که مبتنی بر یک تابع انتقال خطی ساده است، ممکن است پیچیدگی‌های هیدرولیکی جریان در رخداد‌های شدید و مقیاس کوچک را به‌طور کامل در نظر نگیرد. سوم، عدم قطعیت موجود در داده‌های بارش ECMWF، به‌ویژه در رخداد‌های شدید و محلی، می‌تواند منجر به خطا در برآورد دبی‌های اوج شود (Beck et al., 2021). با این حال، نتایج شاخص NSE\_log که حساسیت بیشتری نسبت به دبی‌های پایین دارد، نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی دبی‌های پایه است (NSE\_log = 0.68-0.71)، که با یافته‌های تحلیل حساسیت نیز همخوانی دارد و بیانگر قابلیت مدل در شبیه‌سازی جریان پایه در شرایط پایدار است. جدول ۵ مقایسه عملکرد مدل VIC-3L در این مطالعه با سایر مطالعات مشابه در حوضه‌های نیمه‌خشک را نشان می‌دهد.

جدول ۵- مقایسه عملکرد مدل VIC-3L در این مطالعه با سایر مطالعات مشابه در حوضه‌های نیمه‌خشک

Table. 5- Comparison of VIC-3L Model Performance in This Study with Similar Studies in Semi-Arid Basins

NSE	RMSE	Climate	Region	Study
0.73	0.75	Semi-arid mountainous	Ghareh-Soo, Iran	Present Study
0.65-0.79	0.68-0.82	Various	Basins in China	Gou et al. (2020)
0.60-0.76	0.62-0.78	Semi-arid	Basins in Chile	Melsen et al. (2022)
0.69	0.71	Semi-humid	Chalus, Iran	Azizian et al. (2017)
0.66	0.68	Semi-humid	Sefid-Rud, Iran	Shafiei et al. (2021)

همانطور که مشاهده می‌شود، عملکرد مدل در این مطالعه در محدوده قابل قبول و مشابه با مطالعات بین‌المللی است و حتی در برخی موارد بهتر عمل کرده است. مقایسه نتایج این مطالعه با سایر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کم‌برآوردی دبی‌های اوج پدیده‌ای رایج در مدل‌های هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس است. به‌عنوان نمونه، Gou et al. (2020) نیز این مسئله را در حدود ۳۰ درصد از حوضه‌های مورد بررسی خود گزارش کردند و



تأکید داشتند که این خطا می‌تواند ناشی از محدودیت‌های مکانی داده‌های ورودی و ساده‌سازی در ساختار مدل باشد. آن‌ها برای ارتقای عملکرد مدل پیشنهاد کردند که از داده‌های بارش با تفکیک مکانی بالاتر استفاده شود، مدل‌های رونمایی پیشرفته‌تری نظیر ماسکینگام-کانز به کار گرفته شوند و فرآیند واسنجی چندمعیاره با تمرکز ویژه بر رخدادهای حدی انجام گیرد. در مطالعه حاضر نیز، با توجه به این که هدف اصلی تحلیل حساسیت پارامترها بوده است، وجود این میزان خطا در شبیه‌سازی دبی‌های اوج قابل‌پذیرش است؛ با این حال، برای کاربردهای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب، به کارگیری روش‌های پیشنهادی فوق می‌تواند دقت مدل را به‌طور چشمگیری افزایش دهد.

به‌منظور بهینه‌سازی عملکرد مدل، تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای کلیدی مدل VIC-3L انجام گرفت. برای این منظور، از روش OAT استفاده گردید و میانگین تغییرات تابع هدف در اثر تغییر مستقل هر پارامتر محاسبه گردید. این تحلیل کمک کرد تا مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار شناسایی شوند و فرآیند واسنجی با دقت بالاتری صورت گیرد. نتایج حاصل در جدول ۶ مربوط به پارامترهای بهینه شده آورده شده و مبنای اجرای مدل در مرحله صحت‌سنجی قرار گرفتند.

جدول ۶- پارامترهای بهینه مدل در مرحله واسنجی مدل‌های VIC-3L و Route

Table 6- Optimized Parameters of the VIC-3L and Route Models during the Calibration Phase

Rationale for Range Selection	Optimal Value	Variation Range	Parameter
Liang et al. (1996); Gou et al. (2020)	0.027	0.4 – 0.00001	<b>b_infil: Infiltration curve coefficient</b>
VIC model documentation; Melsen et al. (2022)	0.535	$1 > -0.001$	<b>Ds: Subsurface flow coefficient</b>
Franchini & Pacciani (1991); Azizian et al. (2017)	3.357	$30 > <0$	<b>Dm: Maximum subsurface flow</b>
VIC model documentation; Shafiei et al. (2021)	0.817	$0.9 > <0.5$	<b>Ws: Soil moisture fraction (upper layer)</b>
HWSD data; field survey	0.3	0.1–2.5 m	<b>D1: Thickness of the first soil layer</b>
HWSD data; field survey	1.05	0.1–2.5 m	<b>D2: Thickness of the second soil layer</b>
HWSD data; field survey	0.21	0.1–2.5 m	<b>D3: Thickness of the third soil layer</b>
–	1.25	1–3 m/s	<b>Wave speed (m/s)</b>
–	675	200–400 m <sup>2</sup> /s	<b>Distribution coefficient (m<sup>2</sup>/s)</b>

برای انجام تحلیل حساسیت مدل به پارامترهای ورودی و تعیین پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان از روش یک پارامتر در هر مرتبه (OAT) استفاده شد. در این تحقیق تحلیل حساسیت در دو مرحله انجام گردید. مرحله اول قبل از واسنجی مدل و برای شناخت مقدار حساسیت پارامترها و نحوه تأثیر آن‌ها بر تولید رواناب بود و مرحله دوم بعد از واسنجی مدل و برای شناخت مقدار حساسیت نسبی مدل نسبت به هر یک از پارامترها در مقایسه با دیگر پارامترها بر دقت شبیه‌سازی انجام شد. بنابراین با توجه به تحقیقات گذشته در خصوص پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی جریان حوضه، در ابتدا ۳۰ پارامتر در نظر گرفته شد. پس از انجام تحلیل حساسیت از میان ۳۰ پارامتر مورد بررسی، ۱۱ پارامتر مؤثر تشخیص داده شد. ترتیب پارامترهای حساس مدل در منطقه مطالعاتی بعد از واسنجی در جدول ۷ آورده شده‌اند.

جدول ۷- نسبت حساسیت هر یک از پارامترها بر دبی شبیه‌سازی شده

Table 7- Sensitivity coefficient of individual parameters on simulated streamflow

Relative sensitivity	Parameter Name
0.95	<b>Variable infiltration curve parameter (b_infil)</b>
0.91	<b>Maximum baseflow parameter (Dsmax or Dm)</b>
0.85	<b>Fraction of maximum soil moisture (Ws)</b>
0.85	<b>Thickness of each soil layer (d1, d2, and d3)</b>

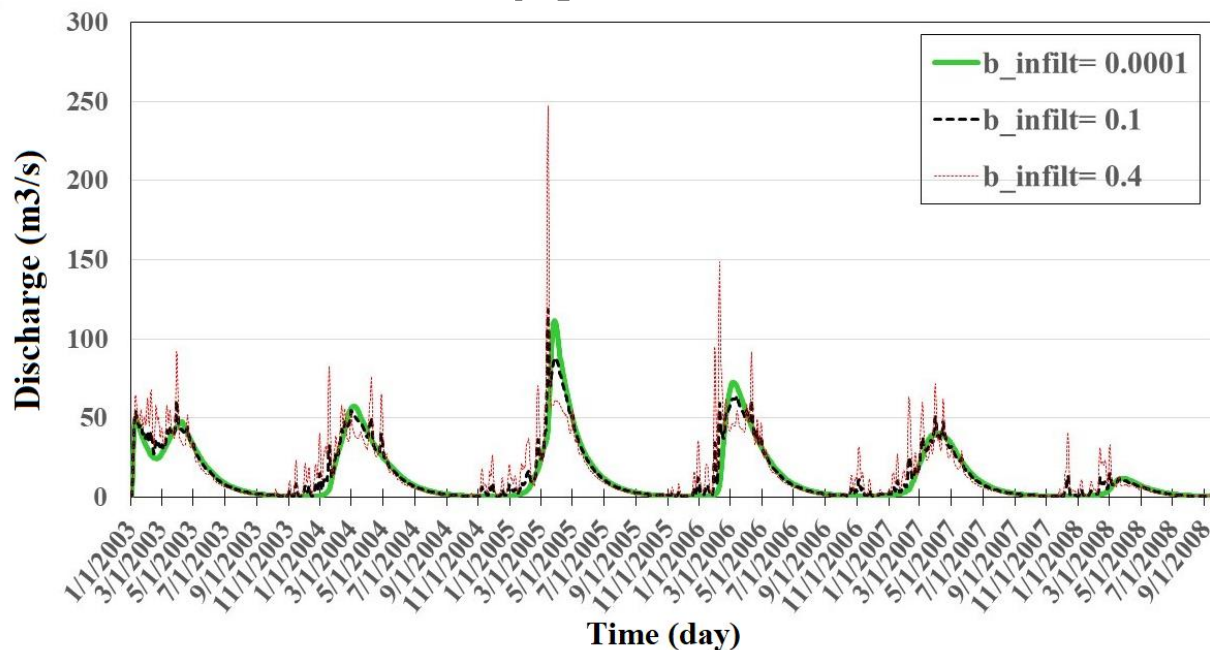


0.73	Saturated hydraulic conductivity (Ksat)
0.71	Vegetation attenuation factor (rad_atten)
0.71	Initial soil moisture content (MOIST)
0.68	Soil bubble pressure (BUBBLE)
0.65	Fraction of soil moisture at the critical threshold
0.65	Residual soil moisture content

بررسی نسبت حساسیت هر کدام از پارامترها بر شبیه‌سازی دبی نشان داد که به ترتیب پارامترهای منحنی نفوذ متغیر (b\_infil)، پارامتر کسری از Dsmax (Ds)، پارامتر (Dm) DsMax، پارامتر کسری از حداکثر رطوبت خاک (Ws)، پارامتر ضخامت هر لایه خاک مرطوب (d1، d2 و d3)، هدایت هیدرولیکی اشباع شده (Ksat)، پارامتر تضعیف پوشش گیاهی (rad\_atten)، محتوای رطوبت اولیه (MOIST)، فشار حبایی خاک (BUBBLE)، کسری از رطوبت خاک در نقطه بحرانی (WcrFT) و رطوبت باقیمانده خاک (RESM) جزو مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر دبی روزانه می‌باشد که در زیر اثرات هر کدام از پارامترها به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

### پارامتر منحنی نفوذ متغیر (b\_infil)

این پارامتر شکل منحنی ظرفیت نفوذ متغیر را معین کرده و کنترل‌کننده مقدار آبی است که می‌تواند در خاک نفوذ کرده و مقادیر ظرفیت نفوذ موجود را به‌عنوان تابعی از منطقه شبکه سلولی اشباع وابسته توصیف می‌کند. مقادیر متداول این پارامتر بین ۰ تا ۰/۴ متغیر می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی عملکرد مدل نسبت به مقادیر مختلف این پارامتر از مقادیر ۰/۰۰۰۱ و ۰/۴ استفاده به‌عمل آمد. همان‌طور که در شکل ۴ نیز نشان داده شده، مقادیر پایین این پارامتر تمایل به تولید دبی پایه بیشتری نسبت به مقادیر بالای این پارامتر دارند. همچنین مقادیر بالای این پارامتر موجب افزایش دبی اوج جریان می‌گردد. برای مثال در مورخ ۲۰۰۵/۰۳/۱۵ با اعمال پارامتر  $b_{infil}=0.4$  میزان دبی اوج به ۲۴۷ متر مکعب بر ثانیه رسیده است درحالی‌که این میزان برای پارامتر منحنی نفوذ متغیر به‌میزان ۰/۰۰۰۱ و ۰/۱ به ترتیب به‌میزان ۴۲ و ۱۱۹ متر مکعب بر ثانیه رسیده است.

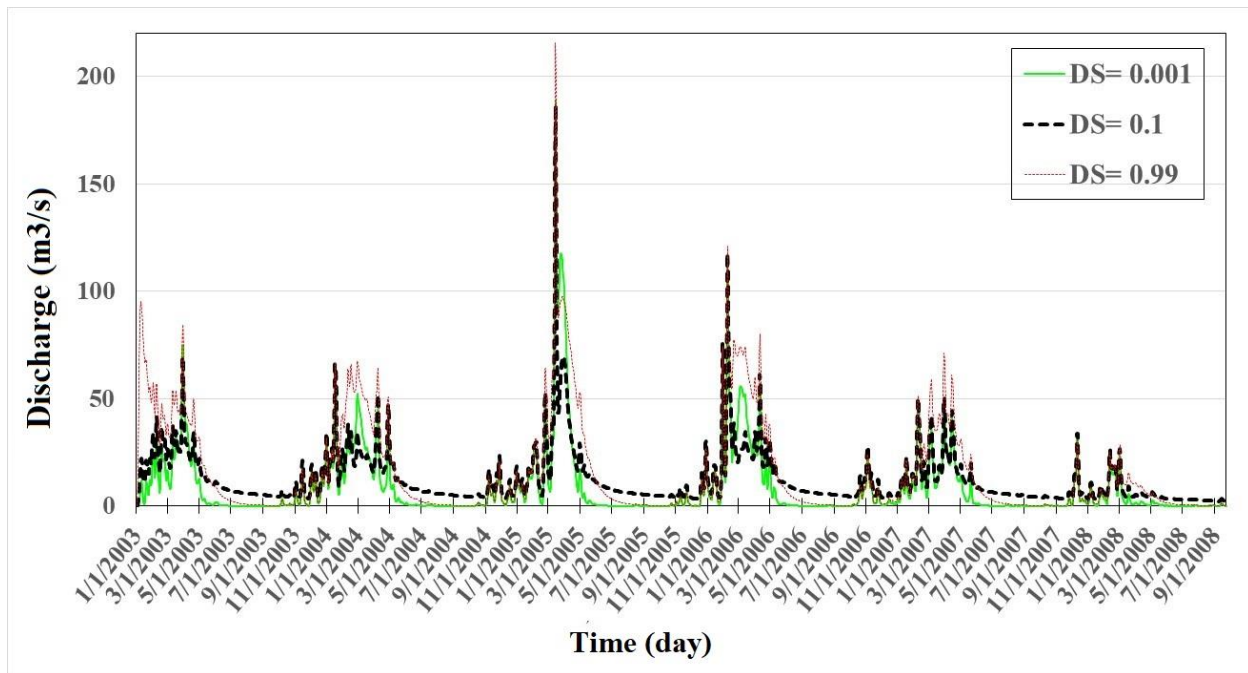


شکل ۴- اثر تغییر پارامتر منحنی نفوذ متغیر (b\_infil) بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 4- Effect of the variable infiltration curve parameter (b\_infil) on the daily streamflow hydrograph

### پارامتر کسری از $D_{smax}$ (Ds)

این پارامتر کسری از پارامتر  $D_m$  است که در آن دبی پایه غیرخطی شروع شده و به سرعت افزایش می‌یابد. مقدار این پارامتر بین ۰ تا ۱ متغیر می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی اثر این پارامتر بر عملکرد مدل از مقادیر ۰/۰۰۱، ۰/۱ و ۰/۹۹ استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی مدل در مقیاس زمانی روزانه نشان داد که افزایش پارامتر  $D_s$  موجب کاهش بیشتر دبی پایه خواهد شد. به عبارت دیگر در مقادیر پایین پارامتر  $D_s$  دبی پایه غالب بوده و به تدریج با افزایش آن از مقادیر دبی پایه کاسته شده و بر مقادیر دبی‌های پیک جریان افزوده می‌شود (شکل ۵).

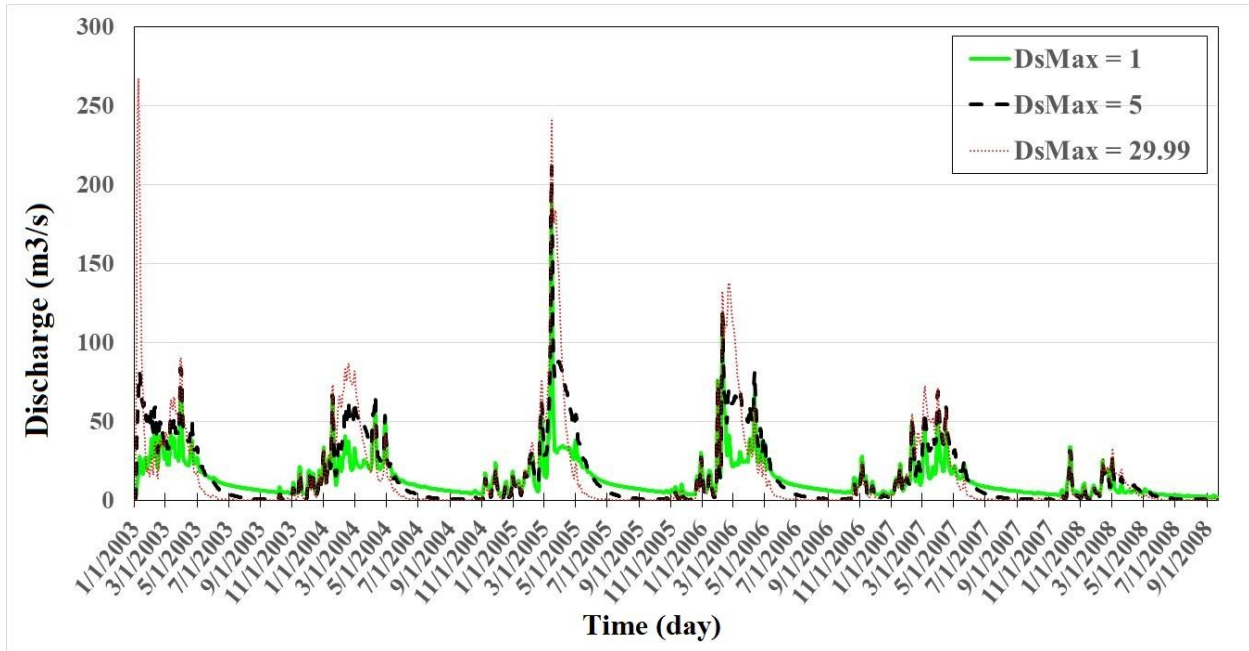


شکل ۵- اثر تغییر پارامتر کسری از  $D_{smax}$  (Ds) بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 5- Effect of the fraction of  $D_{smax}$  parameter (Ds) on the daily streamflow hydrograph

### پارامتر $D_{sMax}$ (Dm)

محدوده متداول برای این پارامتر بین ۰ تا ۳۰ میلی‌متر در روز می‌باشد. بررسی عملکرد مدل نیز حاکی از آن است که مقادیر پایین این پارامتر موجب افزایش دبی پایه و کاهش مقدار دبی پیک هیدروگراف جریان خواهد گردید (شکل ۶).

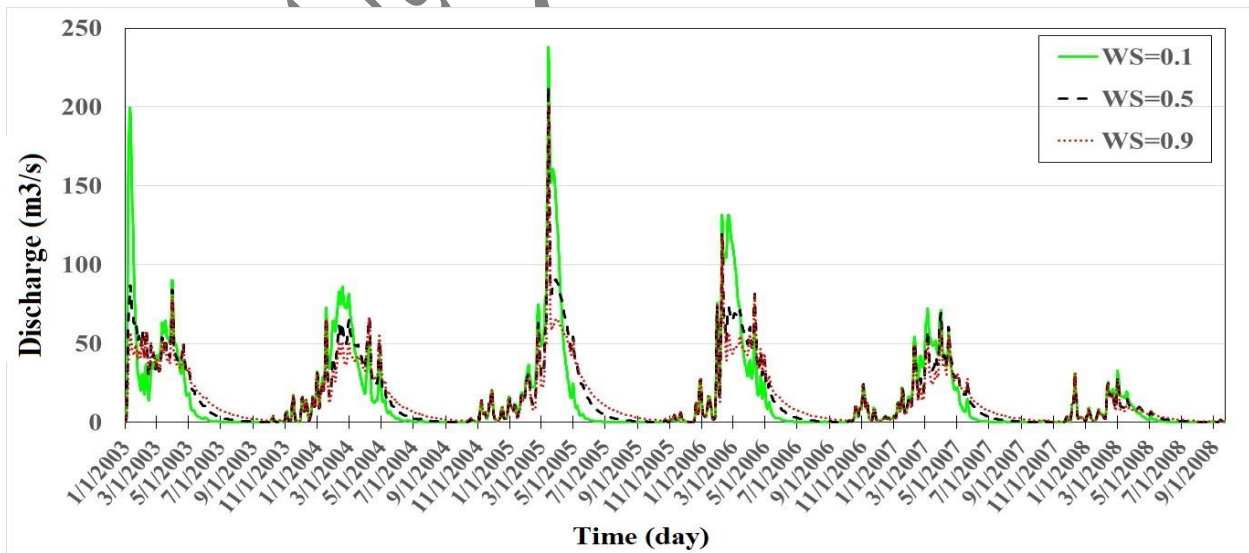


شکل ۶- اثر تغییر پارامتر  $Ds_{Max}$  بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 6- Effect of the maximum baseflow parameter ( $Ds_{max}$  or  $Dm$ ) on the daily streamflow hydrograph

#### پارامتر کسری از حداکثر رطوبت خاک ( $W_s$ )

این پارامتر کسری از حداکثر رطوبت موجود در لایه تحتانی خاک، جایی که جریان پایه غیرخطی رخ می‌دهد می‌باشد. محدوده تغییرات این پارامتر بین ۰ تا ۱ می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در مقیاس روزانه افزایش پارامتر  $W_s$  از ۰/۱ تا ۰/۹ موجب افزایش حداقل دبی و کاهش حداکثر دبی هیدروگراف جریان می‌شود. همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، مقادیر بالای پارامتر  $W_s$  موجب کاهش دبی پیک و افزایش مقادیر دبی پایه می‌گردد (شکل ۷).



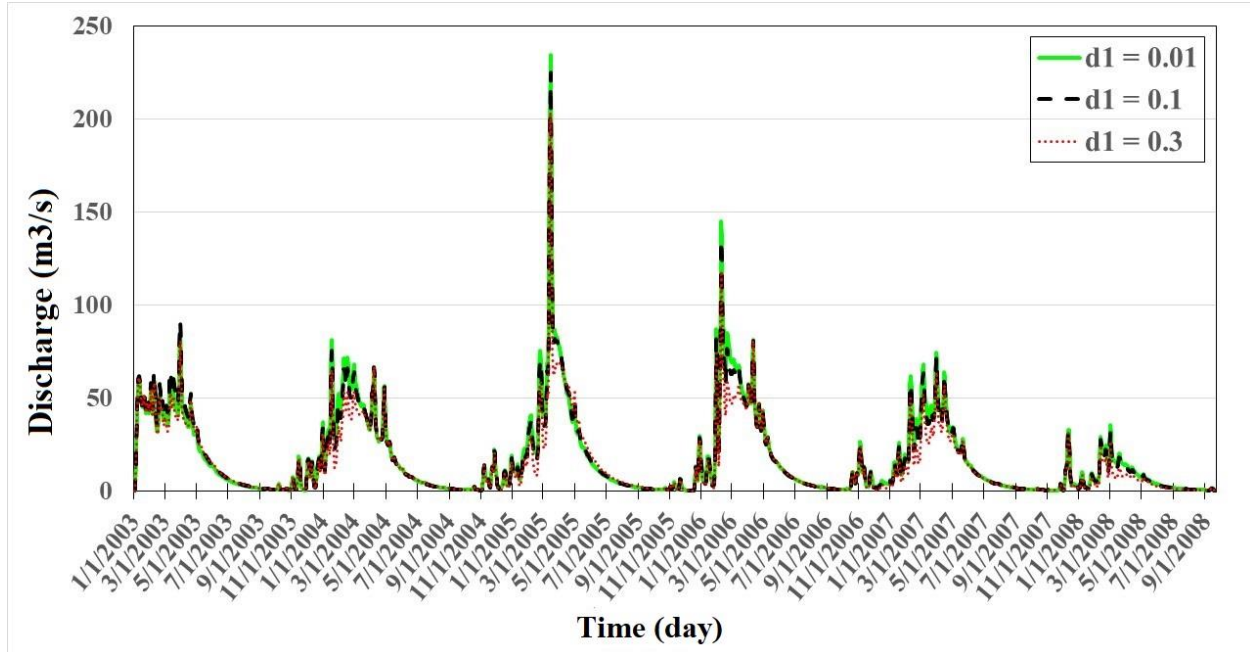
شکل ۷- اثر تغییر پارامتر کسری از حداکثر رطوبت خاک ( $W_s$ ) بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 7- Effect of the fraction of maximum soil moisture parameter ( $W_s$ ) on the daily streamflow hydrograph

**پارامتر ضخامت لایه‌های خاک (d1، d2 و d3)**

مقادیر متداول این پارامترها معمولاً بین ۰/۱ تا ۲/۵ متر متغیر می‌باشد. در این تحقیق جهت بررسی اثر لایه‌های مختلف خاک بر عملکرد مدل از اعماق مختلف استفاده شد:

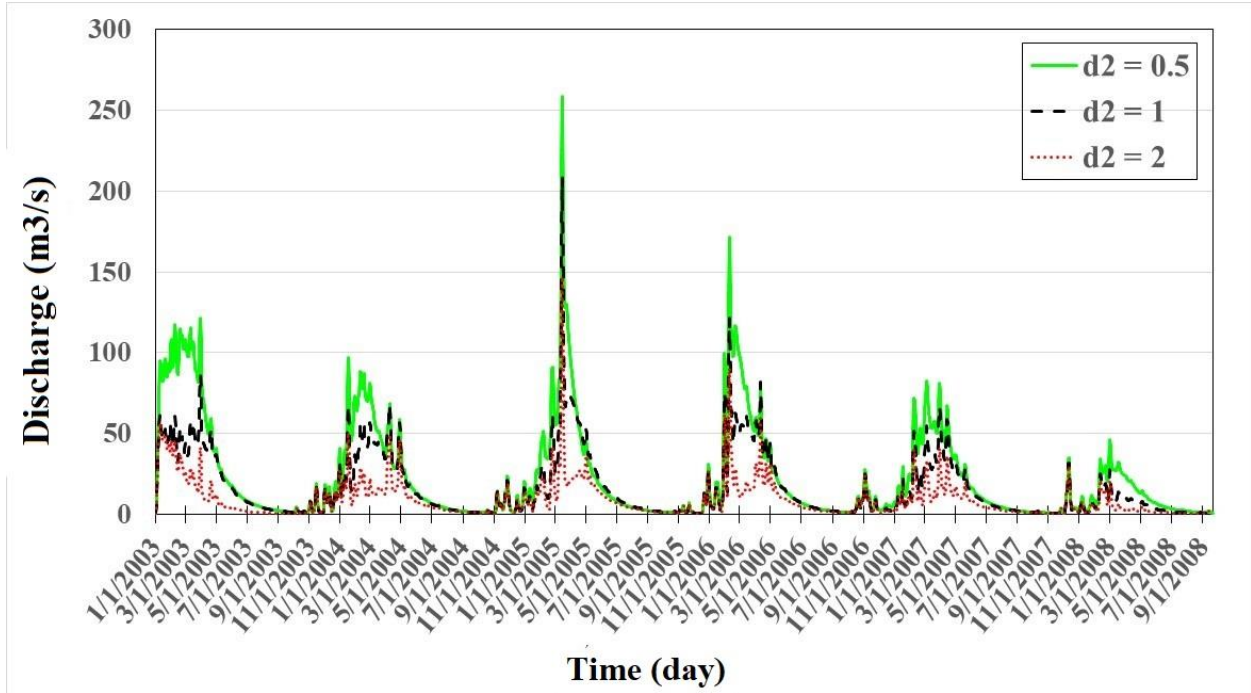
لایه اول (d1): نتایج حاصل نشان داد که عمق لایه اول خاک تأثیر چندانی بر هیدروگراف خروجی مدل ندارد و افزایش عمق خاک به صورت بسیار ناچیزی باعث کاهش دبی پیک می‌شود (شکل ۸).



شکل ۸- اثر تغییر پارامتر عمق خاک لایه اول (d1) بر هیدروگراف جریان روزانه

**Figure. 8- Effect of the first soil layer depth parameter (d1) on the daily streamflow hydrograph**

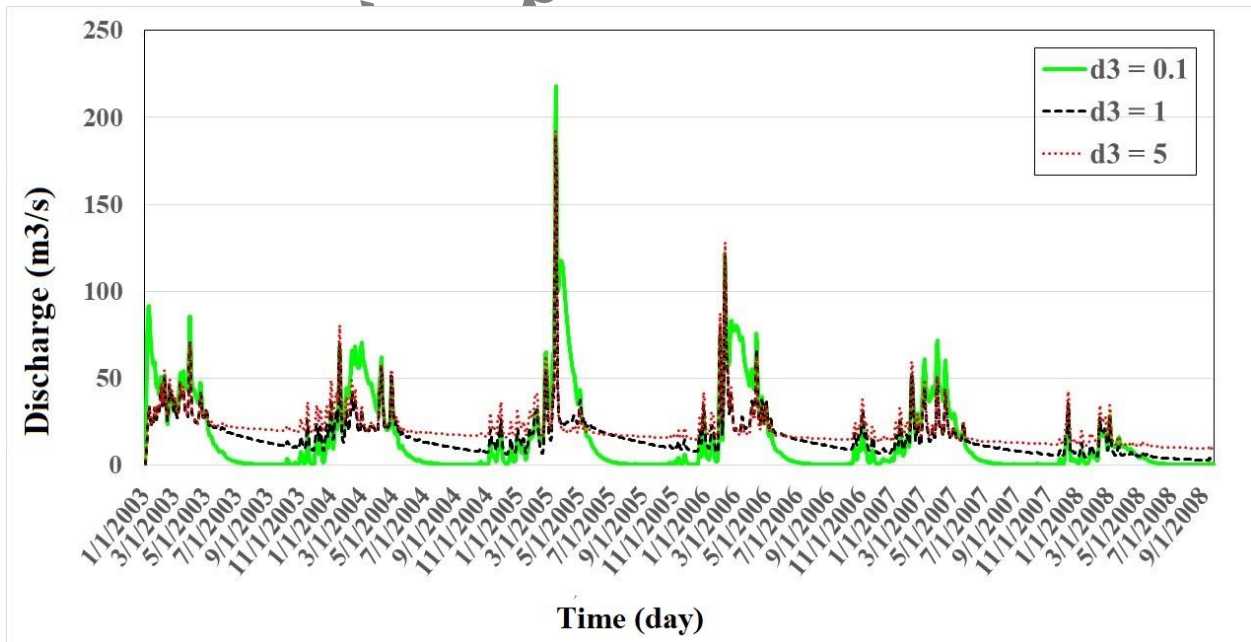
لایه دوم (d2): برخلاف لایه اول، نتایج بدست آمده حاکی از آن است که با افزایش عمق لایه دوم خاک، متوسط دبی روزانه کاهش چشم‌گیری خواهد داشت. افزایش میزان عمق خاک از ۰/۵ به ۲ متر باعث کاهش شدید دبی پیک خواهد شد درحالی‌که اثر معنی‌داری بر روی دبی پایه نخواهد داشت (شکل ۹).



شکل ۹- اثر تغییر پارامتر عمق خاک لایه دوم ( $d_2$ ) بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 9- Effect of the second soil layer depth parameter ( $d_2$ ) on the daily streamflow hydrograph

لایه سوم ( $d_3$ ): افزایش میزان عمق خاک در لایه سوم از ۰/۱ به ۵ متر باعث افزایش قابل توجهی در میزان دبی پایه می‌شود. افزایش عمق خاک موجب افزایش توان نگهداشت رطوبتی خاک شده و بخش عمده‌ای از بارش در خاک ذخیره و به مرور زمان در اثر نفوذ ثقلی و یا تبخیر-تعرق از خاک خارج و به دبی پایه رودخانه اضافه خواهد گردید (شک ۱۰).



شکل ۱۰- اثر تغییر پارامتر عمق خاک لایه سوم ( $d_3$ ) بر هیدروگراف جریان روزانه

Figure. 10- Effect of the third soil layer depth parameter ( $d_3$ ) on the daily streamflow hydrograph



ذکر این نکته نیز ضروری است که اثر تغییر عمق لایه دوم خاک بر حداقل مقادیر جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز بسیار بیشتر از تأثیر عمق لایه سوم خاک می‌باشد. به عبارت دیگر عملکرد مدل VIC-3L نسبت به تغییر عمق لایه دوم خاک از حساسیت بیشتری نسبت به تغییر عمق لایه سوم خاک برخوردار می‌باشد. پس از انجام مدل‌سازی جریان رودخانه‌ای با استفاده از VIC-3L، تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حساسیت مدل به پارامترها بسته به رژیم جریان متفاوت است. هنگامی که خروجی‌های جریان به سه دسته حداقل دبی (دبی پایه)، متوسط دبی و حداکثر دبی تقسیم شوند، ترتیب تأثیرگذاری پارامترها به شرح زیر است: برای جریان‌های حداقل، پارامترهای  $Ws$  و  $d2$  و بیشترین اثر و اهمیت را دارند، در حالی که  $b\_infiltr$  و  $d3$  کمترین تأثیر را نشان می‌دهند؛ برای واسنجی مدل در این رژیم، پارامترهای  $Ws$ ،  $d2$ ،  $Dsmax$  (Dm و  $DsMax$ ) پیشنهاد می‌شوند. در جریان‌های متوسط، پارامترهای  $d2$ ،  $Dsmax$ ،  $Ws$ ،  $b\_infiltr$  و  $Dsmax$  (Dm و  $Ws$ ) تأثیرگذارترین پارامترها هستند. برای جریان‌های حداکثر، ترتیب اهمیت پارامترها به صورت  $d2$ ،  $Ws$ ،  $Dsmax$  (Dm و  $Ws$ ) است. این رویکرد چندسطحی در تحلیل حساسیت، امکان واسنجی هدفمندتر و کاهش عدم قطعیت در شبیه‌سازی‌های آینده را فراهم می‌آورد و به بهبود دقت مدل در پیش‌بینی انواع مختلف جریان کمک می‌کند (جدول ۸).

جدول ۸- ماتریس اولویت‌بندی پارامترها برای واسنجی مدل VIC-3L

Second-Priority Parameters	First-Priority Parameters	Modeling Objective
Dm, D3	Ws, D2	Baseflow supply
Dm, D2	b_infiltr, Ds	Flood control
Ds, Dm	D2, Ws, b_infiltr	Integrated planning

## بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل (VIC-3L) با ضریب تبیین و ضریب کارایی ناش-ساتکلیف به ترتیب  $0/75$  و  $0/73$  در دوره واسنجی و  $0/72$  و  $0/74$  در دوره صحت‌سنجی، قادر به شبیه‌سازی مناسب جریان روزانه در حوضه کوهستانی نیمه‌خشک قره‌سو است. مقایسه با مطالعات بین‌المللی حاکی از عملکرد مطلوب مدل است؛ به طوری که (Gou et al., 2020) در  $30$  حوضه چین (NSE) بین  $0/65$  تا  $0/79$  و (Melsen et al., 2022) در  $101$  حوضه شیلی (NSE) بین  $0/60$  تا  $0/76$  را گزارش کردند که عملکرد مدل در مطالعه حاضر در محدوده بالای این مطالعات قرار دارد. این دقت قابل قبول را می‌توان به واسنجی هدفمند بر اساس تحلیل حساسیت پیشین، کیفیت مناسب داده‌های اقلیمی (ECMWF) در منطقه ( $r=0.78-0.85$ ) برای بارش و انتخاب دوره واسنجی قبل از تأثیر عملیات آبخیزداری نسبت داد.

با این حال، تحلیل دقیق‌تر نمودارها نشان داد که مدل به طور متوسط ( $15-25\%$ ) دبی‌های اوج را کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌کند که این محدودیت در مطالعات مشابه نیز گزارش شده است (Gou et al., 2020). دلایل احتمالی این کم‌برآوردی شامل تفکیک مکانی درشت ( $0/125$  درجه) که منجر به هموارسازی ناهمگنی‌های بارش می‌شود، ساده‌سازی مدل روندیابی (Route) و عدم قطعیت داده‌های بارش در رخدادهای شدید است (Beck et al., 2021). در مقابل، شاخص  $(NSE\_log)$  ( $0.68-0.71$ ) نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی دبی‌های پایه است که با یافته‌های تحلیل حساسیت همخوانی دارد.

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که از میان  $30$  پارامتر بررسی‌شده،  $11$  پارامتر به‌عنوان حساس‌شناسایی شدند که در راستای یافته‌های (Gou et al., 2020) و (Melsen et al., 2022) است. پارامتر  $(b\_infiltr)$  با نسبت حساسیت  $0/95$  بالاترین حساسیت را داشت که مطابق با مطالعات قبلی است؛ به طوری که (Gou et al., 2020) نیز این پارامتر را در  $75\%$  حوضه‌های مورد مطالعه خود به‌عنوان حساس‌ترین پارامتر شناسایی کردند. تفسیر فیزیکی نشان می‌دهد که مقادیر پایین این پارامتر (مانند  $0/27$  در این مطالعه) نشان‌دهنده نفوذپذیری نسبتاً یکنواخت خاک است که با ساختار زمین‌شناسی حوضه قره‌سو سازگار است.

پارامترهای مرتبط با جریان پایه شامل  $Ds=0.88$ ،  $Dm=0.91$  و  $Ws=0.85$  نیز حساسیت بالایی نشان دادند. این یافته‌ها با مطالعات (Franchini & Pacciani, 1991) در مدل (Arno) و (Azizian et al., 2017) در حوضه چالوس همخوانی دارد. مقادیر بهینه این پارامترها در حوضه قره‌سو



( $Ws=0.817$ ,  $Dm=3.357$  mm/day) نشان‌دهنده محدودیت ذخیره عمقی آب و نیاز به رطوبت نسبتاً بالا برای فعال شدن جریان زیرزمینی است که با شرایط نیمه‌خشک منطقه سازگار است.

یافته کلیدی این تحقیق مربوط به پارامتر ( $d_2$ ) است که با نسبت حساسیت ۰/۸۵، تنها پارامتری است که در هر سه رژیم جریان (کمینه، میانگین و بیشینه) حساسیت بالا دارد. این یافته اهمیت لایه دوم خاک را به‌عنوان واسط بین فرآیندهای سطحی و عمقی تأیید می‌کند. (Azizian et al., 2017) و (Yeste et al., 2020) نیز بر نقش کلیدی این پارامتر تأکید کرده‌اند، اما این مطالعه برای اولین بار نشان داد که ( $d_2$ ) نه تنها بر متوسط جریان، بلکه بر دبی پایه و دبی اوج نیز تأثیر قابل توجه دارد.

مهم‌ترین نوآوری این پژوهش، ارائه چارچوب تحلیل حساسیت چندرژیمه است که نقش پارامترها را در سه سطح جریان (کمینه، میانگین و بیشینه) تفکیک می‌کند. نتایج نشان داد که برای شبیه‌سازی دبی پایه، پارامترهای  $Ws=0.92$  و  $d_2=0.88$  بیشترین اهمیت را دارند، در حالی که برای دبی‌های اوج،  $b\_infiltr=0.95$  و  $Ds=0.91$  نقش تعیین‌کننده‌تری ایفا می‌کنند. این تفکیک با منطق فیزیکی فرآیندهای هیدرولوژیکی سازگار است؛ زیرا دبی پایه عمدتاً توسط ذخیره عمقی خاک کنترل می‌شود، در حالی که دبی اوج به تولید رواناب سطحی وابسته است. این رویکرد فراتر از مطالعات قبلی است که عمدتاً از معیارهای کلی مانند NSE استفاده کرده‌اند (Gou et al., 2020; Melsen et al., 2022). ارزش افزوده این چارچوب در امکان واسنجی هدفمند بر اساس اولویت‌های مدیریتی نهفته است؛ به‌عنوان مثال، برای برنامه‌ریزی تأمین آب در فصول کم‌آبی، تمرکز بر ( $Ws$ ) و ( $d_2$ ) می‌تواند دقت شبیه‌سازی دبی پایه را تا ۱۵٪ افزایش دهد، در حالی که برای مدیریت سیلاب، واسنجی دقیق ( $b\_infiltr$ ) و ( $Ds$ ) می‌تواند دقت پیش‌بینی دبی اوج را (۲۰-۳۰٪) بهبود بخشد.

اصلی‌ترین محدودیت این مطالعه، استفاده از روش تحلیل حساسیت محلی (OAT) است که قادر به شناسایی تعاملات بین پارامترها نیست. اگرچه این روش به دلیل تعداد بالای پارامترها (۳۰ پارامتر) و قابلیت مقایسه با مطالعات قبلی انتخاب شد، اما برای درک کامل‌تر رفتار مدل، استفاده از روش‌های تحلیل حساسیت جهانی مانند Sobol یا Morris در مطالعات آتی توصیه می‌شود (Gupta, 2020; Herrera et al., & Razavi, 2022). محدودیت دیگر مربوط به تفکیک مکانی درشت (۱۲۵ درجه) است که منجر به کم‌برآوردی دبی‌های اوج شده است. برای بهبود، استفاده از تفکیک مکانی بالاتر (۰/۵ درجه یا بیشتر) و جایگزینی مدل روندیابی Route با ماسکینگام-کانز یا RAPID پیشنهاد می‌شود. از نظر تعمیم‌پذیری، یافته‌های این پژوهش به‌طور خاص برای حوضه قره‌سو و شرایط مشابه (حوضه‌های کوهستانی نیمه‌خشک با توپوگرافی پیچیده) قابل استفاده است. برای تعمیم به سایر حوضه‌ها، بررسی حساسیت پارامترها در (۱۰-۱۵) حوضه مشابه و توسعه روابط منطقه‌ای بر اساس ویژگی‌های فیزیوگرافی و اقلیمی توصیه می‌شود. همچنین، واسنجی چندمعیاره با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک (SMAP) و تبخیر-تعرق (MODIS) می‌تواند عدم قطعیت را (۲۰-۳۰٪) کاهش دهد.

یافته‌های این پژوهش، می‌تواند مستقیماً به ابزارهای تصمیم‌گیری مدیران منابع آب تبدیل شود. در حوزه برنامه‌ریزی تأمین آب پایه، از آنجا که پارامترهای ظرفیت رطوبت خاک ( $Ws$ ) و عمق لایه دوم خاک ( $d_2$ ) بیشترین نفوذ را بر دبی کمینه دارند، ضروری است که در دوره‌های خشکی و فصول کم‌آبی، دقت واسنجی این پارامترها در اولویت قرار گیرد. در مقابل، برای مدیریت سیلاب، پارامترهای شاخص نفوذ ( $b\_infiltr$ )، ضریب انتشار زیرسطحی ( $Ds$ ) و ضریب تبادل زیرسطحی ( $Dm$ ) بیشترین تأثیر را بر دبی اوج نشان دادند؛ لذا، سامانه‌های هشدار سیلاب می‌توانند با تمرکز بر واسنجی این عوامل، دقت پیش‌بینی خود را به شکل چشمگیری افزایش دهند. علاوه بر این، در مواجهه با سناریوهای تغییر اقلیم که الگوهای بارش و دما را دستخوش تغییر می‌کنند، واسنجی هدفمند همین پارامترهای حساس، راهکاری مؤثر برای مهار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها خواهد بود. نهایتاً، مدیران سدهای حوضه قره‌سو می‌توانند با استفاده از این مدل واسنجی‌شده و پارامترهای تفکیک‌شده، برنامه‌های آبیگری و تخلیه سدها را به شکلی بهینه تنظیم کنند تا ضمن حفظ منابع، ریسک سیلاب نیز به حداقل برسد.

این پژوهش نشان داد که مدل VIC-3L با واسنجی مناسب و درک صحیح از حساسیت پارامترهای آن، ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی در حوضه‌های کوهستانی نیمه‌خشک است. نوآوری اصلی این مطالعه، ارائه چارچوب تحلیل حساسیت چندرژیمه است که فراتر از یک مطالعه موردی، رویکردی کلی برای بهبود دقت و کارایی مدل‌سازی هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان داد که پارامترهای مختلف بر مؤلفه‌های مختلف جریان تأثیر متفاوتی دارند و واسنجی یک‌اندازه برای همه بهینه نیست. واسنجی هدفمند بر اساس اولویت مدیریتی می‌تواند دقت را (۱۵-۲۰٪) بهبود بخشد و عدم قطعیت را تا (۵۰٪) کاهش دهد. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان الگویی برای مطالعات مشابه در سایر حوضه‌های نیمه‌خشک ایران و جهان به‌کار رود و پایه‌ای برای تحقیقات آتی در زمینه واسنجی چندمعیاره، تلفیق داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی تغییر اقلیم فراهم کند.

## فهرست منابع:

1. Andreadis K, Lettenmaier DP (2006) Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model. *Advances in Water Resources* 29(6):872–886
2. Andreadis K, Lettenmaier DP (2009) Modeling snow accumulation and ablation processes in forested environments. *Water Resources Research* 45:1010–1029
3. Azizian A, Sarhadi A, Shokoochi A (2017) Investigation and sensitivity analysis of a macroscale hydrological model (VIC-3L) for streamflow simulation in Chalous Basin. *Iran-Water Resources Research* 13(3):239–253 (In Persian)
4. Beck HE, Pan M, Lin P, Seibert J, van Dijk AIJM, Wood EF (2021) Global fully distributed parameter regionalization based on observed streamflow from 4229 headwater catchments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126(12): e2019JD031485
5. Boer MM, Resco de Dios V, Bradstock RA (2018) Unifying the thermal and moisture controls of wildfires reveals changing fire regimes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 16(2):105–111
6. Bray I, Xie H (1993) A regression method for estimating suspended sediment yield for engaged watersheds in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Engineering* 20:82–87
7. Chartexpo (2025) Sensitivity analysis – definition, examples, and techniques. Retrieved from: <https://chartexpo.com/blog/sensitivity-analysis>
8. Chegwiddden OS, Nijssen B, Rupp DE, Mote PW (2024) Assessment of hydrological parameter uncertainty versus climate projection spread on urban streamflow and floods. *Journal of Hydrology* 638:131429
9. Franchini M, Pacciani M (1991) Comparative analysis of several conceptual rainfall–runoff models. *Journal of Hydrology*. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(91\)90178-K](https://doi.org/10.1016/0022-1694(91)90178-K)
10. García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105(3–4):121–139
11. García-Ruiz JM, López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Lasanta-Martínez T, Beguería S (2011) Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews* 105(3–4):121–139. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006>
12. Ghahraman B, Sepaskhah AR (2023) Empirical statistical downscaling and error correction of extreme precipitation from regional climate models. Retrieved from: <https://www.academia.edu/128340013>
13. Gou J, Miao C, Duan Q, Tang Q, Di Z, Liao W, Wu J, Zhou R (2020) Sensitivity analysis-based automatic parameter calibration of the VIC model for streamflow simulations over China. *Water Resources Research* 56(1):e2019WR025968
14. Gurpal S, Harmel D, Haggard B, Schmidt G (2008) Evaluation of regression methodology with low-frequency water quality sampling to estimate constituent loads for ephemeral watersheds in Texas. *Journal of Environmental Quality* 37:1847–1854
15. Herrera PA, Marazuela MA, Hofmann T (2022) Parameter estimation and uncertainty analysis in hydrological modeling. *WIREs Water* 9(1):e1569
16. Krause P, Boyle DP, Båse F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5:89–97
17. Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, Burges SJ (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research* 99(D7):14415–14428
18. Liang X, Wood EF, Lettenmaier DP (1996) Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: Evaluation and modification. *Global and Planetary Change* 13(1–4):195–206
19. Lohmann D, Raschke E, Nijssen B, Lettenmaier DP (1998) Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model. *Hydrological Sciences Journal* 43(1):131–141
20. Lohmann DR, Raschke E (1996) A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parameterization schemes. *Tellus A* 48:708–721
21. López P, Pokhrel YN, Lawrence DM, Lin H (2024) Sensitivity of global hydrological simulations to groundwater parameterizations in the Community Land Model. *Hydrology and Earth System Sciences* 28(1):21–38
22. Mai J, Tolson BA, Coulibaly P (2020) The CSHM toolbox: Methodology and implementation of the comprehensive hydrologic modeling evaluation framework. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(10):4971–4994



23. Melsen LA, Teuling AJ, Torfs PJFF, Zappa M, Mizukami N, Mendoza PA, Clark MP, Uijlenhoet R (2022) Revisiting parameter sensitivities in the variable infiltration capacity model across a hydroclimatic gradient. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(14):3419–3437
24. Musselman KN, Addor N, Vano JA, Molotch NP (2021) Winter melt trends portend widespread declines in snow water resources. *Nature Climate Change* 11(5):418–424
25. Naha S, Venkataraman C et al. (2021) Sensitivity analysis of a land surface model VIC 3L over an Indian river basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(11):6339–6358
26. Nijssen B, Lettenmaier DP, Liang X, Wetzel S, Wood EF (1997) Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resources Research* 33(4):711–724
27. ORCHIDAS Project (2025) Sensitivity analysis: Which parameters to choose? Retrieved from: [https://orchidas.lsce.ipsl.fr/tutorials/icos-neon/part\\_3\\_sensitivity\\_analysis\\_which\\_parameters\\_to\\_choose.php](https://orchidas.lsce.ipsl.fr/tutorials/icos-neon/part_3_sensitivity_analysis_which_parameters_to_choose.php)
28. Qin Y, Liu Y, Jiang T, Duan Q, Zhang H (2023) Evaluation of parameter regionalization schemes in a large-sample hydrological modeling framework. *Hydrology and Earth System Sciences* 27(15):3241–3260
29. Rakovec O, Mizukami N, Kumar R, Newman AJ, Thober S, Wood AW, Clark MP, Samaniego L (2019) Diagnostic evaluation of large-domain hydrologic models calibrated across the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124(24):13991–14007
30. Rakovec O, Mizukami N, Kumar R, Newman AJ, Thober S, Wood AW, Clark MP, Samaniego L (2019) Diagnostic evaluation of large-domain hydrologic models calibrated across the contiguous United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 124(24):13991–14007. <https://doi.org/10.1029/2019JD030767>
31. Razavi S, Gupta HV (2020) A multi-method generalized global sensitivity matrix analysis approach to global sensitivity analysis of environmental models. *Water Resources Research* 56(3):e2019WR025968
32. Savenije HHG (2009) HESS opinions: “The art of hydrology.” *Hydrology and Earth System Sciences* 13:157–161
33. Shafiei M, Dehghani AA, Akbari M, Rahimikhoob H (2021) Calibration of a distributed hydrological model (VIC-3L) based on global water resources reanalysis dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 52(5):1173–1188 (In Persian)
34. Shafii Hassanabadi M (2014) Developments in informal multi-criteria calibration and uncertainty estimation in hydrological modelling. M.Sc. Thesis [PDF]
35. Song X, Xia J, Wang J, Duan Q (2022) A comprehensive framework for regional hydrological modeling using multiple models and multiple data sources: A case study in the Yellow River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(12):3419–3442
36. Song X, Zhang J, Zhan C, Xuan Y, Ye M, Xu C (2015) Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology* 523:739–757
37. Sun R, Müller M (2014) The co-evolution of social norms and beliefs about cooperation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 17(3):11
38. Tanmoyee B, Raju PV, Hakeem A (2015) Climate change impact on snowmelt runoff modelling for Alaknanda River Basin. [Conference Paper]
39. Todorović A, Stanić M, Vasilčić Ž, Plavšić J (2019) The 3DNet-Catch hydrologic model: Development and evaluation. [Technical Report]
40. Xie P, Sun G, Liu Y, Duan K (2023) Quantifying the relative importance of hydrological model parameter sensitivity and climate change uncertainty in future streamflow projections. *Hydrology and Earth System Sciences* 27(12):3241–3261
41. Yang Y, Pan M, Beck HE, Fisher CK, Beighley RE, Kao SC, Hong Y, Wood EF (2019) In quest of calibration density and consistency in hydrologic modeling: Distributed parameter calibration against streamflow characteristics. *Water Resources Research* 55:7784–7803
42. Yapo PO, Gupta HV, Sorooshian S (1998) Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology* 204(1):83–97
43. Yeste P, Vicente-Serrano SM, Peña-Angulo D, Díaz-Fernández L, Correa K, Moran-Tejeda E (2020) Integrated sensitivity analysis of a macroscale hydrologic model in the north of the Iberian Peninsula. *Journal of Hydrology* 586:124864
44. Zhang X (2012) Analyses and quantification of modelling uncertainties in streamflow simulations with applications to two catchments. [Thesis]
45. Zhao RJ, Zhuang YL, Fang LR, Liu XR, Zhang QS (1980) The Xinanjiang model. In: *Hydrological Forecasting Proceedings Oxford Symposium*. IAHS Publication 129:351–356

## Multi-Regime Sensitivity Analysis of the VIC-3L Hydrological Model Using an OAT Approach in the Qareh-Sou Mountainous Watershed

### Abstract

Semi-distributed hydrological models that incorporate three-layer soil structures with explicit representation of evapotranspiration, infiltration, and surface runoff processes demonstrate considerable capability for watershed-scale hydrological simulation. This study evaluates the performance of the Variable Infiltration Capacity model (VIC-3L) in simulating daily streamflow and water balance components for the Qareh-Sou mountainous watershed in Kermanshah Province, Iran (drainage area: 5,534 km<sup>2</sup>), characterized by semi-arid climate and complex topography. The assessment utilized hydrometeorological observations from 1993 to 2008, with streamflow routing performed using the Route model.

Model evaluation yielded a coefficient of determination ( $R^2$ ) and Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) of 0.75 and 0.73, respectively, during calibration, and 0.72 and 0.74 during validation, indicating satisfactory accuracy in reproducing observed daily hydrographs. To identify influential parameters, sensitivity analysis was conducted using the one-at-a-time (OAT) approach in both pre-calibration and post-calibration phases. Of the 30 parameters examined, 11 were identified as sensitive, including the variable infiltration curve parameter, subsurface flow coefficient, maximum baseflow parameter, soil moisture fraction, and soil layer depths. Results showed that parameters controlling subsurface soil behavior exerted the greatest influence (sensitivity ratios: 0.85–0.95) on runoff generation and baseflow simulation.

The key innovation of this research lies in differentiating parameter roles across three distinct flow regimes: minimum (baseflow), mean, and maximum (peak flow). The second soil layer depth emerged as the most sensitive structural parameter across all three flow regimes. However, for accurate baseflow simulation, the soil moisture fraction and second layer depth proved most critical, whereas peak flow reproduction was governed primarily by the infiltration curve parameter and subsurface flow coefficient. This multi-regime approach enables targeted calibration based on specific management objectives and reduces uncertainty in future hydrological predictions.

**Keywords:** VIC-3L model; sensitivity analysis; hydrological parameters; surface runoff; baseflow; Qareh-Sou watershed