

ارتقای مدل SMA-SAC با پارامتردهی پویا و امضاهای هیدرولوژیک در بازسازی رواناب‌های حدی در زیرحوضه‌های منتخب

دریاچه ارومیه (سیمینه‌رود و نازلوچای)

رقیه علی‌پور^۱ | وحید موسوی^{۲*} | هیراد عبقری^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۲. دانشیار (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.

۳. دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

رایانامه: v.moosavi@modares.ac.ir

چکیده

برآورد رواناب ناشی از بارش‌های حدی برای طراحی سازه‌های آبی و مدیریت سیلاب اهمیت دارد. مدل مفهومی SAC-SMA به‌طور گسترده استفاده می‌شود، اما فرض ایستایی پارامترها و تکیه بر معیارهای حجمی، توان آن را در بازنمایی جریان‌های حدی و شرایط غیرایستایی اقلیمی محدود می‌کند. در این مطالعه، برای بهبود واقع‌گرایی فرآیندی و شبیه‌سازی رخداد‌های حدی، یک رویکرد یکپارچه شامل پارامتردهی پویا و واسنجی چندهدفه برای SAC-SMA توسعه داده شد. در این چارچوب، پارامترهای کلیدی مدل به‌صورت تابعی از شاخص پوشش گیاهی (NDVI) و ناهنجاری‌های اقلیمی تعریف شدند. واسنجی مدل با الگوریتم PSO انجام شد و از امضاهای هیدرولوژیک همراه با وزن‌دهی ویژه به جریان‌های حدی استفاده شد. عملکرد مدل در دو حوضه نازلوچای و سیمینه‌رود در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ ارزیابی شد. نتایج نشان داد نسخه ارتقا یافته نسبت به مدل کلاسیک عملکرد بهتری در شبیه‌سازی هیدروگراف، جریان پایه و دبی‌های اوج دارد. میانگین بهبود عملکرد در حوضه‌های نازلوچای و سیمینه‌رود به ترتیب ۳۲.۰۴٪ و ۳۱.۱۹٪ گزارش شد. همچنین شاخص NSE در جریان‌های حدی در نازلوچای بیش از ۱۰۱٪ و در سیمینه‌رود حدود ۵۳٪ افزایش یافت. کاهش RMSE و افزایش هم‌زمان KGE و R^2 نیز نشان‌دهنده کاهش خطاهای سیستماتیک و بهبود بازنمایی رفتارهای غیرخطی حوضه تحت شرایط متغیر اقلیمی است. در مجموع، نتایج بیانگر آن است که پویاسازی پارامترهای SAC-SMA و استفاده از واسنجی مبتنی بر امضاهای هیدرولوژیک می‌تواند محدودیت مدل‌های مفهومی کلاسیک را در شبیه‌سازی رخداد‌های حدی کاهش داده و چارچوبی مؤثر برای تحلیل حوضه‌های نیمه‌خشک تحت تأثیر تغییر اقلیم فراهم کند.

کلیدواژه‌ها: پارامتر پویا، پنجره لغزان، جریان‌های حدی، دریاچه ارومیه، واسنجی چندهدفه.

۱- مقدمه

رویدادهای جریان شدید و جریان کم، که به ترتیب اغلب به‌عنوان سیل و خشکسالی شناخته می‌شوند، تأثیرات طبیعی، اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی دارند (Di Baldassarre et al., 2010). اگرچه پژوهش‌های فراوانی برای برآورد تأثیر تغییر اقلیم بر محیط‌زیست و جامعه انجام شده است، این تحقیقات اغلب بر تغییرات میانگین تمرکز دارند. با این حال، رخداد‌های حدی اغلب بیش از تغییرات میانگین، سامانه‌های طبیعی و اجتماعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، به‌ویژه در مقیاس‌های محلی تا ناحیه‌ای (Wrzesien et al., 2021). در سطح جهانی، تعداد جان‌باختگان و خسارات اقتصادی ناشی از رویدادهای جریان شدید طی دهه‌های گذشته به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. برای کاهش پیامدهای اجتماعی ناشی از نوسانات هیدرولوژیک شدید، شناخت فرآیندهای منجر به این رویدادها حیاتی است (Van Kempen et al., 2021). مدل‌های شبیه‌سازی هیدرولوژیک امکان درک رفتار هیدرولوژیک یک حوضه را فراهم می‌کنند و استفاده از آن‌ها را برای ارزیابی راهبردهای مدیریت



منابع آب و پیش‌بینی رخدادهای حدی ممکن می‌سازند (Andrade et al., 2013). با این حال، دقت این مدل‌ها تحت تأثیر نااطمینانی‌هایی قرار دارد که ناشی از منابع خطای مرتبط با داده‌های ورودی، ساختار مدل و پارامترهای آن است. بهبود مدل‌سازی هیدرولوژیک، به‌ویژه در محیط‌هایی با تغییرات شدید اقلیمی و شرایط متغیر، بسیار ضروری است (Alvarez & Barco., 2025). همچنین شناسایی نقاط قوت و ضعف مدل‌ها برای انتخاب مناسب یک مدل هیدرولوژیک، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که داده‌های مشاهده‌ای محدود است، برای استفاده صحیح از مدل حیاتی است. مدل‌سازی هیدرولوژیک ابزاری قدرتمند برای ایجاد سناریوها جهت مدیریت پایدار منابع آب است (Beven and Young, 2013; Paul et al., 2021).

اگرچه مدل‌های توزیعی و فیزیک‌مینا ابزار اصلی برای درک فرآیندهای فیزیکی در سیستم‌های هیدرولوژیک و تحلیل سناریوها هستند، اما این مدل‌ها با محدودیت‌های عملی روبرو هستند (Beven, 2001). از آنجا که بسیاری از آبخیزها داده‌های اندازه‌گیری‌شده کافی ندارند، یا اساساً بدون ایستگاه اندازه‌گیری هستند، اعتبارسنجی این مدل‌ها دشوار است. در چنین مواردی، مدل‌های مفهومی (CMs) جایگزین مناسبی هستند. این مدل‌ها معمولاً ترکیبی از معادلات دیفرانسیل مبتنی بر قوانین هیدرولیکی ساده‌شده و معادلات تجربی جبری هستند که برای شبیه‌سازی فرآیندهای پیچیده‌تر به کار می‌روند (Arnold et al., 1998). مدل‌های اولیه شامل مدل آبخیز استنفورد، SAR، مدل ساکرامنتو، مدل تانک، HEC-1، HYMO و RORB می‌باشند. مدل حسابداری رطوبت خاک ساکرامنتو (SAC-SMA) یکی از پرکاربردترین مدل‌های مفهومی و تجمیعی شبیه‌سازی جریان آب سطحی در سطح جهان است (Wang et al., 2023). این مدل به‌طور خاص پایه سیستم پیش‌بینی هیدرولوژیک ملی خدمات هواشناسی ایالات متحده را تشکیل می‌دهد و توسط مراکز پیش‌بینی رودخانه (RFCs) به‌عنوان هسته اصلی شبیه‌سازی رواناب در سامانه‌های عملیاتی پیش‌بینی و هشدار سیلاب به کار گرفته شده است؛ همچنین SAC-SMA یکی از اجزای کلیدی سیستم راهنمایی سیلاب ناگهانی (FFG) محسوب می‌شود (Roe et al., 2010; Demargne et al., 2014). SAC-SMA یک مدل تجمیعی کم‌پارامتر است که دارای ۱۱ پارامتر اصلی و ۵ پارامتر فرعی خاک‌مبنای پیش‌فرض می‌باشد و این پارامترها از طریق معادلات تحلیلی و تجربی استخراج شده‌اند (Koren et al., 2003). ساختار مفهومی ذخایر رطوبت خاک این مدل و نیاز به حداقل داده‌های ورودی شامل بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل و جریان رودخانه مشاهده‌شده برای واسنجی، امکان کاربرد مؤثر در حوضه‌های مختلف به‌شرایط داده‌ای متفاوت را فراهم می‌کند. اگرچه مدل به‌صورت یکپارچه (lumped) توسعه یافته است، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که در بسیاری از حوضه‌ها عملکردی قابل رقابت و حتی برتر نسبت به سایر مدل‌های هیدرولوژیک ارائه می‌دهد و اغلب به‌عنوان مدل مرجع برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های جدید مورد استفاده قرار می‌گیرد (Wijayarathne and Coulibaly, 2020; Birhanu et al., 2018).

کاربردهای SAC-SMA محدود به پیش‌بینی سیلاب (Roodsari et al., 2019; Abbaszadeh et al., 2025; Walters et al., 2026) نبوده و این مدل در زمینه‌های متنوع هیدرولوژی از جمله شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه‌های دارای داده محدود یا بدون ایستگاه (Alvarez and Barco, 2025; Alvarez and Barco, 2023)، تحلیل فرآیندهای ذخیره و انتقال رطوبت خاک و تفکیک مؤلفه‌های جریان سطحی (Koren et al., 2000; Buchtele et al., 1996)، ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر رژیم جریان (Najafi et al., 2011; Zhang et al., 2011)، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای هیدرولوژیک (Thasneem et al., 2023; Ngo et al., 2025) و توسعه چارچوب‌های ترکیبی با مدل‌های داده‌محور و یادگیری ماشین (Slater et al., 2023; Guniganti et al., 2026) مورد استفاده قرار گرفته است. روابط پارامترهای پیش‌فرض SAC-SMA مبتنی بر روش‌های فیزیکی واقع‌گرایانه است که در سطح جهانی قابل اعمال بوده و داده‌های خاک با وضوح مناسب در مقیاس منطقه‌ای به‌طور گسترده در دسترس هستند (Chouaib et al., 2021). پژوهش‌های اخیر نیز به بررسی انتقال‌پذیری پارامترهای SAC-SMA بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و رطوبت خاک در حوضه‌های مختلف پرداخته‌اند (Wang et al., 2023). با وجود کاربرد گسترده این مدل، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های مفهومی کلاسیک در بازتولید مقادیر حدی جریان با عدم قطعیت و محدودیت‌های ساختاری قابل توجهی همراه هستند. (Alvarez and Barco, 2023) در مطالعه‌ای عملکرد مدل SAC-SMA را در چندین حوضه با ویژگی‌های اقلیمی و



فیزیوگرافی متفاوت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اگرچه مدل قادر به بازنمایی مناسب هیدروگراف و جریان پایه است، اما در شبیه‌سازی جریان‌های شدید و مقادیر حدی با سوگیری کم‌برآوردی مواجه است، که محدودیت‌های ساختاری مدل‌های مفهومی کلاسیک را در بازتولید رویدادهای حدی نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای توسط (Brunner et al. 2021) عملکرد چهار مدل هیدرولوژیک شناخته‌شده شامل SAC-SMA، HBV، VIC و mHM در بازتولید ویژگی‌های سیلاب و الگوهای فضایی آن‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که حتی با کالیبراسیون استاندارد بر اساس شاخص کارایی کلینگ-گوپتا (KGE)، مدل‌ها بزرگی و زمان وقوع سیلاب را به‌طور دقیق بازتولید نمی‌کنند و تغییرات اقلیمی مانند بارش و دما به‌طور کامل به تغییرات جریان سیلاب منتقل نمی‌شوند. (Gupta et al. 2024) نیز مدل هیدرولوژیک SAC-SMA را در حوضه رودخانه St. Joseph در شرایط وجود و عدم وجود ایستگاه ارزیابی کردند. آن‌ها با استفاده از روش جنگل تصادفی مبتنی بر چندک ϵ و ترکیب آن با شاخص‌های جریان رودخانه مانند توان هرست و شاخص جریان پایه، عدم قطعیت داده‌ها را در ارزیابی مدل لحاظ کردند. نتایج نشان داد که مدل قادر به شبیه‌سازی جریان‌های متوسط است، اما در پیش‌بینی جریان‌های حدی محدودیت دارد و اغلب جریان‌های بالا کم‌برآورد و جریان‌های پایین بیش‌برآورد می‌شوند. در پژوهشی توسط (Uliana et al. 2019) عملکرد مدل‌های هیدرولوژیک SAC-SMA و IPH II در حوضه رودخانه Teles Pires بررسی شد. پارامترهای SAC-SMA با الگوریتم SCE-UA کالیبره شدند و تحلیل‌ها نشان دادند که مدل در شبیه‌سازی رواناب‌های شدید و حداقل رواناب در برخی واحدها دچار خطا بود. شاخص‌های Nash-Sutcliffe و Willmott عملکرد مدل را مناسب تا خوب نشان دادند، ولی Bias مدل SAC-SMA گرایش به برآورد بیش‌ازحد رواناب داشت.

با توجه به نقش حیاتی تخمین دقیق جریان‌های حدی در مدیریت منابع آب، کاهش ریسک سیلاب و خشکسالی و برنامه‌ریزی سازگار با تغییر اقلیم، ارتقای عملکرد مدل‌های مفهومی هیدرولوژیک در بازنمایی رفتارهای حدی ضروری است. با وجود کاربرد گسترده مدل حسابداری رطوبت خاک ساکرامنتو (SAC-SMA)، فرض ایستایی پارامترها و انکلی صرف به معیارهای برازش حجمی، توان این مدل را در شبیه‌سازی مقادیر بیشینه و کمینه جریان و نیز تضمین واقع‌گرایی فرآیندی محدود می‌کند؛ مسئله‌ای که در مطالعات اخیر نیز با ضرورت استفاده از راهبردهای کالیبراسیون چندمعیاره و پارامترهای متغیر با زمان مورد توجه قرار گرفته است (Asadzadeh et al., 2025; Lan et al., 2026). در این پژوهش، به‌منظور غلبه بر این محدودیت‌ها، یک چارچوب یکپارچه کالیبراسیون پویا هدایت‌شده توسط امضاهای هیدرولوژیک شامل شاخص‌های کمی استخراج‌شده از سری زمانی جریان که ویژگی‌هایی نظیر جریان پایه، رفتار فروکش هیدروگراف و رژیم کلی جریان حوضه را توصیف می‌کنند و وزن‌دهی شده بر اساس رخدادهای حدی توسعه داده شده است که به‌طور هم‌زمان سه چالش اساسی شامل غیرایستایی پارامترها، هم‌ارزی پارامتری و ضعف در پیش‌بینی رخدادهای حدی را مورد توجه قرار می‌دهد. در این چارچوب، پارامترهای مدل علاوه بر حالت پایه، در دو ساختار متفاوت شامل پارامترهای ثابت و پارامترهای پویا وابسته به شرایط اقلیمی و پوشش گیاهی پیاده‌سازی شده‌اند و فرآیند واسنجی در قالب یک بهینه‌سازی چندهدفه با وزن‌دهی تطبیقی به جریان‌های حدی انجام می‌شود. با این حال، ارزیابی چارچوب پیشنهادی در این مطالعه به دو حوضه آبخیز سیمینه‌رود و نازلوچای و یک دوره زمانی ۲۰ ساله محدود بوده و بنابراین، تعمیم‌پذیری نتایج به حوضه‌هایی با ویژگی‌های اقلیمی، فیزیوگرافی و هیدرولوژیک متفاوت نیازمند آزمون‌های بیشتر است. افزون بر این، با وجود استفاده از پارامتردهی پویا، ساختار تجمیعی SAC-SMA همچنان ناهمگنی‌های مکانی فرآیندهای هیدرولوژیک را به‌طور صریح بازنمایی نمی‌کند و روابط تعریف‌شده میان پارامترهای مدل و متغیرهای اقلیمی و پوشش گیاهی نیز نمی‌تواند تمامی عوامل مؤثر بر تغییرات زمانی ویژگی‌های حوضه را دربرگیرد. از این‌رو، نتایج این پژوهش باید در چارچوب شرایط داده‌ای، اقلیمی و فیزیوگرافی حوضه‌های مورد مطالعه تفسیر شوند. هدف اصلی این مطالعه، مقایسه نظام‌مند عملکرد دو رویکرد شامل مدل پایه با پارامترهای ثابت و مدل با پارامترهای دینامیک در بازنمایی جریان‌های بالا و پایین است تا میزان تأثیر پارامتردهی پویا و گنجانیدن اهداف فرآیندی و حدی در واسنجی بر بهبود مهارت پیش‌بینی مدل مشخص شود.

فرآیند روش‌شناسی این پژوهش شامل آماده‌سازی داده‌های ورودی، پیاده‌سازی ساختار مفهومی SAC-SMA، توسعه و واسنجی چندهدفه‌ی دو پیکربندی پارامتری ایستا و پویا، و ارزیابی تطبیقی نتایج در دو حوضه‌ی مطالعاتی است. نمای کلی این گردش کار و توالی مراحل اجرای پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.

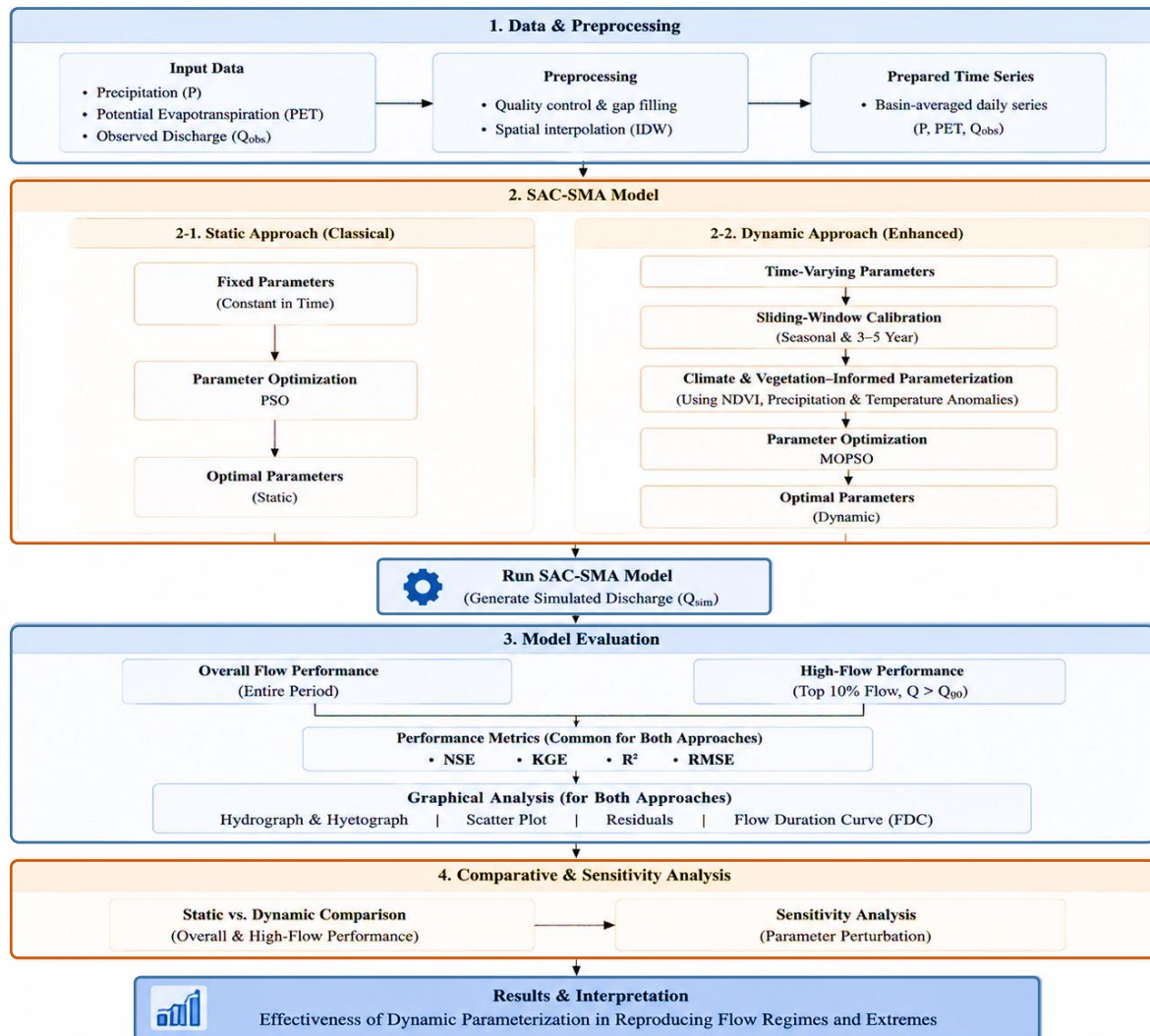


Fig. 1- Overview of the research methodology

شکل ۱- نمای کلی روش‌شناسی پژوهش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران با پهنه‌ای نزدیک به ۵۷۵۰ کیلومتر مربع، دومین دریاچه فوق‌شور جهان به‌شمار می‌رود (Delju et al., 2012; Hassanzadeh et al., 2013). این دریاچه طی دو دهه گذشته در پی هم‌افزایی فعالیت‌های انسانی و دگرگونی‌های اقلیمی، با افت شدید تراز آب و جهش میزان شوری روبه‌رو شده است (Tourian et al., 2015; Arkian et al., 2018). در این میان، زیرحوضه‌های سیمینه‌رود و نازلوچای به سبب نقش حیاتی در آبرسانی به دریاچه و به‌ویژه نبود سازه‌های بزرگ ذخیره‌ای در مسیر جریان که بررسی واکنش طبیعی حوضه به رخداد‌های حدی را میسر می‌سازد برای این پژوهش برگزیده شدند (شکل ۲).



حوضه سیمینه رود با مساحت ۳۷۲۷ کیلومتر مربع در جنوب دریاچه ارومیه (بین $35^{\circ} 45'$ تا $46^{\circ} 25'$ شرقی و $36^{\circ} 1'$ تا $37^{\circ} 56'$ شمالی) واقع شده است. این حوضه با شیب متوسط ۱۷ درصد، دارای توپوگرافی کوهستانی در بخش‌های غربی و دشت‌های ملایم در نواحی شرقی و شمالی است. اقلیم منطقه از نیمه خشک سرد تا نیمه مرطوب سرد متغیر بوده، و میانگین بارش سالانه آن در ارتفاعات به ۴۶۷ میلی متر می‌رسد. رژیم جریان این رودخانه در سال‌های اخیر به شدت تحت تأثیر خشکسالی‌های متوالی و توسعه کشاورزی قرار گرفته که منجر به افزایش حساسیت آن به جریان‌های حدی شده است (Yousefzadeh et al., 2019; Youneszadeh et al., 2021).

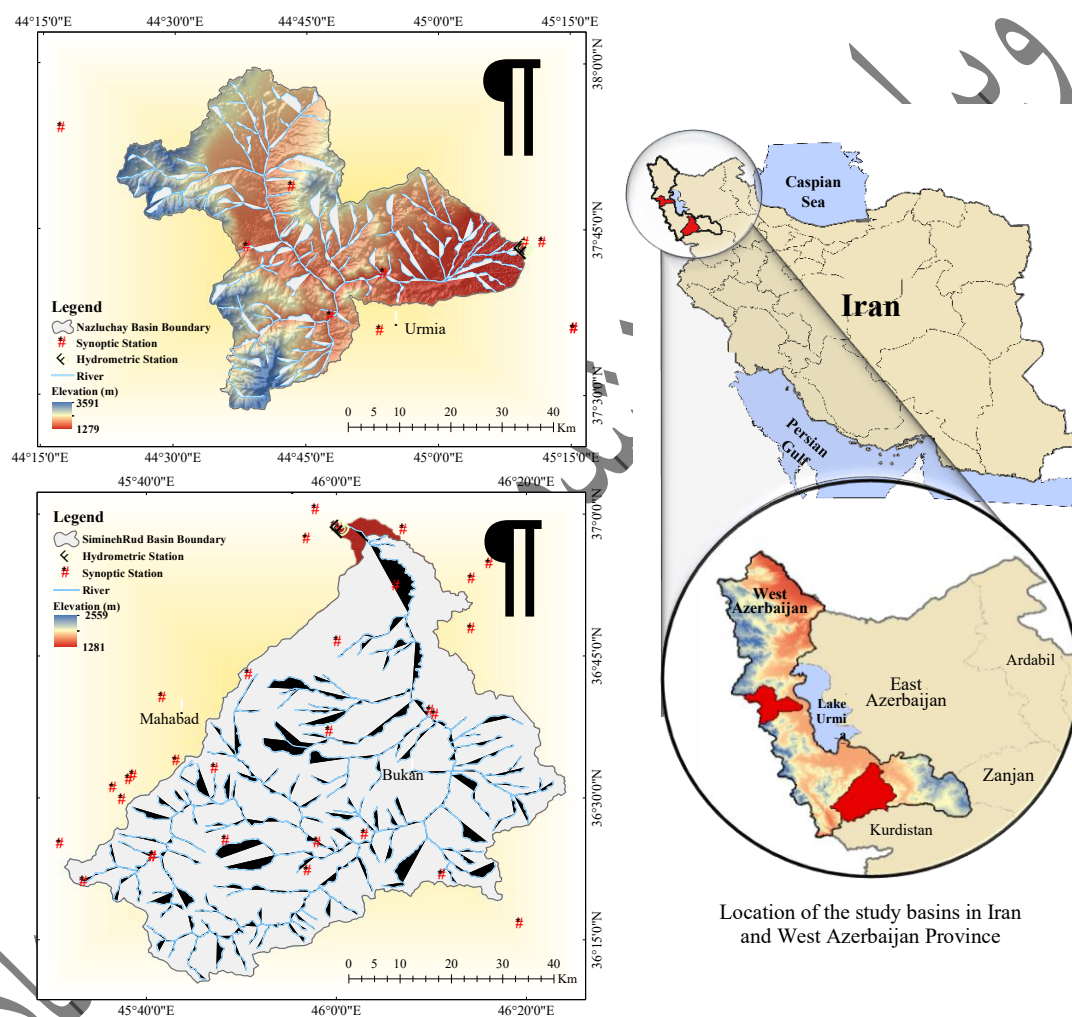


Fig.2- Location of the studied watersheds
شکل ۲- موقعیت مکانی آبخیزهای مورد مطالعه

حوضه نازلوچای با مساحت ۱۸۸۰ کیلومتر مربع در غرب دریاچه ارومیه (بین $44^{\circ} 24'$ تا $45^{\circ} 53'$ شرقی و $37^{\circ} 30'$ تا $37^{\circ} 58'$ شمالی) قرار دارد. ارتفاع حوضه از حدود ۱۳۴۰ تا ۳۶۰۰ متر متغیر بوده و ارتفاع متوسط آن حدود ۱۹۴۴ متر است، به گونه‌ای که شیب عمومی حوضه از ارتفاعات غربی به سمت دشت‌های شرقی کاهش می‌یابد. اقلیم این حوضه نیمه مرطوب سرد، میانگین بارش سالانه حدود ۴۸۸ میلی متر، دمای



متوسط سالانه بین ۱/۹- تا ۹/۱۱ درجه سانتی گراد و میانگین سالانه تبخیر و تعرق پتانسیل نیز ۱۳۷۰ میلی متر گزارش شده است (Mashhadi-Heydar et al., 2022; Roustaei et al., 2018). این رودخانه که از ارتفاعات مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می گیرد، فاقد سازه های ذخیره ای عمده است؛ از این رو رژیم هیدرولوژیک آن بازتاب مستقیمی از تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی منطقه محسوب می شود (Rezaei and Jabbari, 2017).

در پژوهش حاضر، جهت شبیه سازی فرآیند تبدیل بارش به رواناب، مدل مفهومی SAC-SMA مورد استفاده قرار گرفت. طبق تعریف (Devia et al., 2015) مدل های هیدرولوژیک با بهره گیری از مجموعه ای از معادلات ساختاریافته، سهم بارش موثر را بر مبنای خصوصیات فیزیکی حوضه برآورد می کنند. پیاده سازی مدل SAC-SMA مستلزم استفاده از سری های زمانی پیوسته در مقیاس روزانه است؛ به طوری که این مدل با دریافت مقادیر میانگین بارش سطحی (P) و تبخیر-تعرق بالقوه (PET) به عنوان متغیرهای ورودی، دبی جریان (Q) را به عنوان خروجی اصلی شبیه سازی می نماید (Burnash, 1995). در این راستا، داده های دبی از ایستگاه های تازه کند میاندوآب و آباجالوسفلی و آمار اقلیمی (بارش، دما و تبخیر) از شبکه ای گسترده شامل ایستگاه های داخلی و پیرامونی سازمان هواشناسی و شرکت مدیریت منابع آب ایران استخراج شد. لحاظ کردن ایستگاه های هم جوار، تحلیل اثر گردان های اقلیمی بر رفتار هیدرولوژیک حوضه را میسر می سازد. با بررسی پیوستگی آماری، بازه ۲۰ ساله (۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱) به عنوان دوره مرجع برگزیده شد. تمامی سری های زمانی پس از کنترل کیفی و بازسازی شکاف های آماری با روش های متداول، جهت یکپارچه سازی، تحت درون یابی مکانی قرار گرفتند. بدین منظور، داده های نقطه ای با استفاده از روش وزن دهی معکوس فاصله (IDW^۵) در محیط Matlab به داده های پهنه ای تبدیل شدند. در این الگو، وزن بیشتری به ایستگاه های نزدیک تر اختصاص می یابد تا سری های زمانی نماینده و یکنواختی برای کل سطح هر حوضه حاصل شود (Wei and McGuinness, 1973).

۲-۲- بازسازی سری زمانی تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)

با توجه به محدودیت در دسترسی به داده های روزانه تبخیر و تعرق در ایستگاه های سینوپتیک حوضه های مورد مطالعه، از روش هارگریوز-سامانی (H^۲HS) استفاده شد. این روش که توسط Hargreaves and Samani (1985) توسعه یافته است، یک رابطه تجربی دما محور برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه است که بر اساس متغیرهای دمایی و تابش برون جوی تعریف می شود. بر این اساس، تبخیر و تعرق مرجع (ET_{0,HS}) به صورت تابعی از دمای میانگین (T_{mean})، دمای حداکثر (T_{max})، دمای حداقل (T_{min}) و تابش برون جوی (R_a) و با استفاده از ضرایب تجربی K_H و K_T و e_H برآورد شده و رابطه آن به صورت زیر ارائه می شود:

$$ET_{0,HS} = 0.408 K_H R_a (T_{max} - T_{min})^{e_H} \left[\frac{T_{max} + T_{min}}{2} + K_T \right] \quad \text{رابطه ۱}$$

در این رابطه، ضرایب تجربی در حالت استاندارد به ترتیب K_H=0.0023، K_T=17.8 و e_H=0.5 در نظر گرفته شده و ضریب ۰.۴۰۸ نیز برای تبدیل واحد انرژی به معادل تبخیر استفاده می شود (Cobaner et al., 2017).

۲-۳- مدل حسابداری رطوبت خاک ساکرامنتو (SAC-SMA)

مدل SAC-SMA یک مدل مفهومی-قطعی و یکپارچه است که بر پایه تئوری مخازن متوالی، بیلان آب را در مقیاس حوضه شبیه سازی می کند (Burnash et al., 1973). این مدل در ردیف مدل های جعبه خاکستری قرار می گیرد، به این معنا که فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیک را در قالب مجموعه ای از قوانین فیزیکی ساده شده و مخازن ذخیره نمایش می دهد. علت اطلاق واژه قطعی (Deterministic) به این مدل آن است که تمامی متغیرها و فرآیندهای آن فاقد تغییرات تصادفی فرض می شوند؛ به عبارتی، با ورودی های یکسان، مدل همواره خروجی ثابتی تولید می کند و متغیرهای آن تابع توزیع احتمالاتی خاصی نیستند (Xu, 2002). همچنین، ساختار یکپارچه مدل بدین معناست که پارامترها تنها به عنوان

تابعی از زمان تغییر کرده و تغییرات مکانی در سطح آبریز نادیده گرفته می‌شود (Breda, 2008).

۲-۴- پویایی ذخایر و تعاملات لایه‌ای

ساختار فیزیکی مدل بر پایه تقسیم افق‌های خاک به دو لایه اصلی استوار است: ناحیه بالایی (Zone Upper) که لایه‌ای نسبتاً نازک برای مدل‌سازی پاسخ‌های سریع حوضه است و ناحیه پایینی (Zone Lower) که مسئول مدل‌سازی جریان‌های پایه و ذخیره درازمدت است. در هر یک از این نواحی، رطوبت به دو شکل آب کششی (Water Tension) و آب آزاد (Free Water) ذخیره می‌شود. آب کششی تنها از طریق تبخیر و تعرق تخلیه شده، در حالی که آب آزاد تحت تأثیر گرانش زهکشی می‌شود. مطابق با شکل (۳)، که نمایش شماتیک مخازن و پارامترهای مدل را ارائه می‌دهد، ذخیره آب آزاد در ناحیه پایینی خود به دو زیرمخزن تکمیلی (Supplemental) و اصلی (Primary) تقسیم می‌شود که به ترتیب جریان‌های آب زیرزمینی با زهکشی سریع و کند را شبیه‌سازی می‌کنند. همچنین، فرآیند تبخیر و تعرق (ET) به عنوان محرک اصلی تخلیه رطوبت از مخازن کششی عمل می‌کند. نرخ بازگشت رطوبت به اتمسفر از لایه بالایی (ET_{upper}) و لایه پایینی (ET_{lower}) تابعی از پتانسیل تبخیر و تعرق (ETP) و تراز لحظه‌ای ذخایر است که با لحاظ کردن تغییرات زمانی در سقف ذخیره‌سازی، طبق روابط زیر محاسبه می‌گردد (Paredes Arquiola et al., 2017):

$$ET_{upper} = ET_p \cdot \min \left(1, \frac{UZTWC}{UZTWM} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$ET_{lower} = (ET_p - ET_{upper}) \cdot \frac{LZTWC}{LZTWM} \quad \text{رابطه (۳)}$$

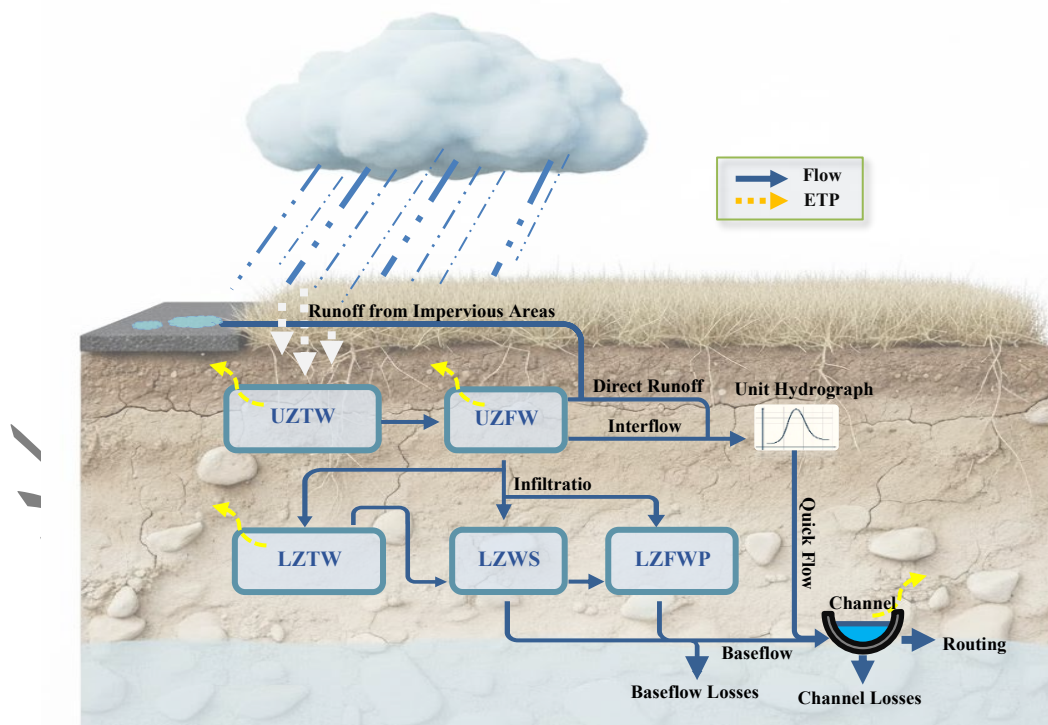


Fig. 3- Schematic representation of the reservoir structure and flow pathways in the SAC-SMA model

شکل ۳- نمایش شماتیک ساختار مخزنی و مسیرهای جریان در مدل SAC-SMA

۲-۵. مکانیسم نفوذ و تولید رواناب

بخش اصلی عملکرد مدل SAC-SMA بر نفوذ عمقی (Percolation) بین مخازن بالایی و پایینی مبتنی است، که جریان رطوبت از لایه بالایی به پایین را هدایت می‌کند. این جریان (PERC) یک تابع غیرخطی پیچیده است که بر اساس ظرفیت اشباع لایه پایینی (PBASE) و شدت کمبود رطوبت در مخازن پایینی تعریف می‌شود:

$$\text{PERC} = \min \left(\text{UZFWC}, \text{Perc}_{\text{dem}} \cdot \frac{\text{UZFWC}}{\text{UZFWM}} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

$$\text{ET}_{\text{lower}} = (\text{ET}_p - \text{ET}_{\text{upper}}) \cdot \frac{\text{LZTWC}}{\text{LZTWM}} \quad \text{رابطه ۵}$$

در این ساختار، پس از اشباع مخازن بالایی، رواناب سطحی تولید شده و همزمان جریان میان‌لایه‌ای (Q_{int}) از مخزن آب آزاد بالایی با ضریب UZK تخلیه می‌گردد. در لایه پایینی، آب آزاد بین دو مخزن اصلی و تکمیلی توزیع شده تا جریان‌های پایه کند و سریع را طبق رابطه زیر شبیه‌سازی کند (Crow and Ryu, 2008):

$$Q_{\text{slow}} = \text{LZFSC} \cdot \text{LZSK} + \text{LZFPC} \cdot \text{LZPK} \quad \text{رابطه ۶}$$

در نهایت، رواناب کل مدل در هر گام زمانی از مجموع جریان‌های سطحی، میان‌لایه‌ای، جریان‌های پایه کند و رواناب مستقیم حاصل می‌شود (Burnash, 1995; eWater CRC, 2010; Crow and Ryu, 2008):

$$Q = \text{RO}_{\text{ptim}} + \text{RO}_{\text{adimp}} + Q_{\text{quick}} + Q_{\text{int}} + Q_{\text{slow}} + Q_{\text{gwx}} \quad \text{رابطه ۷}$$

ساختار کلاسیک این مدل بر پایه این فرض بنا شده است که ویژگی‌های فیزیکی حوضه در طول دوره شبیه‌سازی ثابت هستند؛ به عبارت دیگر، پارامترهای مدل (جدول ۱) به‌طور معمول به صورت ایستا (Static) در نظر گرفته می‌شوند (Breda, 2008).

Table 1. Structural parameters of the SAC-SMA model
جدول ۱- پارامترهای ساختاری مدل SAC-SMA

Description and Function	Full Name	Parameter	Classification
رطوبتی که تنها با تبخیر و تعرق تخلیه می‌شود.	ظرفیت آب کششی ناحیه بالایی	UZTWM	ذخیره سطحی و میان رواناب
عاملی که پس از اشباع، منجر به رواناب سطحی می‌شود.	ظرفیت آب آزاد ناحیه بالایی	UZFWM	
کنترل‌کننده سرعت تبدیل نفوذ به میان‌رواناب.	ضریب تخلیه جانبی آزاد ناحیه بالایی	UZK	
پتانسیل نگهداری رطوبت در لایه‌های عمیق خاک.	ظرفیت آب کششی ناحیه پایینی	LZTWM	جریان پایه
منبع تغذیه جریان پایه در درازمدت.	ظرفیت آب آزاد اصلی ناحیه پایینی	LZFPM	
منبع تغذیه جریان پایه پس از بارندگی.	ظرفیت آب آزاد تکمیلی ناحیه پایینی	LZFSM	
تعیین‌کننده تداوم جریان در فصول خشک.	ضریب تخلیه آب آزاد اصلی ناحیه پایینی	LZPK	
کنترل‌کننده شیب فروکش هیدروگراف.	ضریب تخلیه آب آزاد تکمیلی ناحیه پایینی	LZSK	
ضریب تعیین‌کننده نرخ نفوذ حداکثری از ناحیه بالایی به ناحیه پایینی در شرایط اشباع.	ضریب نرخ نفوذ حداکثری به ناحیه پایینی	ZPERC	نفوذ و تغذیه اعماق
بیانگر سرعت کاهش نفوذ هم‌زمان با افزایش رطوبت در مخازن تحتانی.	توان معادله نفوذ	REXP	
سهمی از نفوذ که مستقیماً و بدون اشباع لایه کششی به مخازن آب آزاد تحتانی وارد می‌شود.	کسر نفوذ مستقیم به مخازن آب آزاد پایینی	PFREE	
بخشی از بارش که بلافاصله به رواناب مستقیم تبدیل می‌شود.	کسر سطوح نفوذناپذیر دائم	PCTIM	پاسخ مستقیم
سطوحی که با پیشروی اشباع خاک، به سطح روانابزا اضافه می‌شوند.	کسر سطوح نفوذناپذیر موقت	ADIMP	سیلابی

۲-۶- چارچوب یکپارچه پارامتردهی پویا و واسنجی چندهدفه

به‌منظور بهبود مهارت پیش‌بینی، ارتقای واقع‌گرایی فرآیندی و افزایش سازگاری اقلیمی مدل حمایت‌داری رطوبت خاک ساکرامنتو (SAC-SMA)، در این پژوهش یک چارچوب یکپارچه واسنجی پویا، هدایت‌شده با امضاهای هیدرولوژیک و وزن‌دهی‌شده بر اساس رخدادهای حدی توسعه داده شد. این چارچوب با هدف مواجهه با سه چالش اساسی در مدل‌سازی هیدرولوژیک مفهومی طراحی گردید که شامل (۱) ناپایداری پارامترها تحت شرایط تغییر اقلیم و پوشش گیاهی، (۲) عدم واقع‌گرایی فرآیندی ناشی از هم‌ارزی پارامتری در مدل‌های تجمیعی و (۳) محدودیت در پیش‌بینی رخدادهای حدی نظیر سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها است. در این رویکرد، پارامتردهی پویا، هدایت مبتنی بر امضاهای هیدرولوژیک و بهینه‌سازی چندهدفه با وزن‌دهی رخدادهای حدی در قالب یک گردش کار واسنجی یکپارچه ترکیب شده است تا امکان بازنمایی دقیق‌تر فرآیندهای هیدرولوژیک و پاسخ‌های غیریستای حوضه فراهم شود.

۲-۷- واسنجی با پنجره لغزان

به‌منظور لحاظ‌کردن تغییرپذیری زمانی ویژگی‌های هیدرولوژیک حوضه، از راهبرد پارامتردهی پویا در مدل SAC-SMA استفاده شد. بدین منظور، پارامترهای کلیدی مدل در پنجره‌های زمانی لغزان^۸ به‌صورت بازه‌ای مجدداً واسنجی شدند. پنجره لغزان به بازه زمانی متحرکی اطلاق می‌شود که در آن پارامترهای مدل به‌طور مستقل در هر زیر دوره زمانی برآورد شده و سپس پنجره به‌صورت گام‌به‌گام در طول سری زمانی جابه‌جا می‌شود تا تغییرات زمانی رفتار سیستم ثبت شود (Wang et al., 2024). در این پژوهش، طول پنجره‌های واسنجی در مقیاس‌های



فصلی و ۳ تا ۵ ساله تعیین گردید تا تغییرات کوتاه مدت و بلندمدت رفتار حوضه به طور هم زمان بازنمایی شود. فرآیند بازواسنجی بر پارامترهای UZTWM، LZTWM و ضرایب تبخیر و تعرق تمرکز دارد؛ متغیرهایی که با کنترل پویایی رطوبت خاک و تبادلات سطح-جو، نقشی تعیین کننده در پاسخ بارش-رواناب و تولید جریان پایه ایفا می کنند (Burnash et al., 1973). پیاده سازی این رویکرد، علاوه بر ردیابی تکامل ساختاری حوضه، منجر به کاهش اثر هم ارزی پارامتری^۹ می گردد.

۲-۸- پارامتردهی مبتنی بر اقلیم و پوشش گیاهی

به منظور افزایش کثرت اقلیمی پارامترها، ارتباط آن ها با شاخص های قابل مشاهده اقلیمی و پوشش گیاهی شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، ناهنجاری های بارش و انحرافات دمایی برقرار گردید. کثرت اقلیمی پارامترها بیانگر حساسیت و واکنش پارامترهای مدل نسبت به تغییرات اقلیمی و زیست محیطی بوده و امکان تطبیق پویا مدل با شرایط غیرایستای اقلیمی را فراهم می کند (Yang et al., 2011). پارامترهای مرتبط با ظرفیت ذخیره رطوبت خاک و فرآیندهای تبخیر و تعرق به صورت تابعی از متغیرهای اقلیمی زیستی بازتعریف شدند، به گونه ای که پارامتر حداکثر ظرفیت آب کششی لایه بالایی به صورت زیر به شاخص های محیطی پیوند داده شد:

$$UZTWM(t) = UZTWM_0 \cdot f(NDVI(t), SPI(t)) \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن $UZTWM_0$ مقدار پایه پارامتر و f تابع انتقال وابسته به سبزیگی پوشش گیاهی و وضعیت رطوبتی اقلیم است. این رویکرد امکان تطبیق پویای مدل با تغییرات سبزیگی پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی را فراهم کرده و عملکرد پیش بینی را تحت شرایط غیرایستا به طور معنی داری بهبود می دهد. همچنین سبب بهبود بازنمایی فرآیندهای هیدرولوژیک و پاسخ های غیرایستای حوضه در شرایط تغییر اقلیم می شود (Samaniego et al., 2010). تمامی مراحل شبیه سازی، توسعه توابع انتقال و فرآیند بهینه سازی پارامتریک در این مطالعه، از طریق برنامه نویسی اختصاصی در محیط نرم افزار MATLAB پیاده سازی گردید.

۲-۹- ارتقای واسنجی چندهدفه مدل SAC-SMA با تکیه بر امضاهای هیدرولوژیک و تحلیل وقایع حدی

در این مطالعه، روش های متداول واسنجی با ادغام امضاهای هیدرولوژیک و شاخص های رخدادهای حدی در یک چارچوب بهینه سازی چندهدفه ارتقا یافته است. هدف اصلی این ساختار، بهبود واقع گرایی فرآیندی مدل SAC-SMA و کاهش عدم قطعیت ناشی از هم ارزی پارامترهاست که از طریق محدودسازی مدل با اطلاعات ساختاری رژیم جریان انجام می شود. تابع هدف در این پژوهش به صورت یک معیار ترکیبی وزن دار تعریف شده است که به طور همزمان برازش هیدروگراف، بازسازی امضاها و عملکرد در شرایط حدی را ارزیابی می کند. برای ارزیابی دقیق پویایی زمانی جریان، شاخص های خطی جهت شبیه سازی سیلاب ها و $\log-NSE$ برای تحلیل جریان های کم و دوره های خشکسالی به کار گرفته شدند تا عملکرد مدل در کل دامنه تغییرات متوازن شود (Krause et al., 2005).

در این چارچوب، بخش های مختلف منحنی تداوم جریان به صورت وزن دار مورد استفاده قرار گرفت؛ به گونه ای که بخش بالایی FDC برای کنترل و بازسازی جریان های سیلابی و رخدادهای حدی، بخش میانی برای حفظ رفتار عمومی رژیم جریان و بخش انتهایی منحنی برای بازنمایی جریان پایه و شرایط کم آبی مورد تأکید قرار گرفت. این رویکرد سبب شد مدل علاوه بر برازش آماری هیدروگراف، توانایی بازسازی واقع گرایانه رفتار بلندمدت و غیرخطی حوضه را نیز حفظ نماید. در بخش رخدادهای حدی، صدک های بالای جریان (Top of 10% flow) جهت بررسی شدت و فراوانی وقایع حدی استفاده شدند. این چارچوب به کمک استراتژی وزن دهی ویژه، حساسیت مدل را به جریان های بالا، جریان های پایه و امضاهای رژیم جریان افزایش داده و آن را برای تحلیل مخاطرات هیدرولوژیک تحت شرایط متغیر اقلیمی بهینه سازی می کند. به منظور ایجاد توازن بین برازش کلی جریان، سازگاری فرآیندی و بازنمایی دقیق رخدادهای حدی، یک تابع هدف ترکیبی^{۱۰} با وزن دهی تطبیقی

تعریف شد:

$$J = w_{NSE} \cdot NSE + w_{log} \cdot \log NSE + \sum w_{sig} \cdot \text{Signatures} + \sum w_{ext} \cdot \text{Extremes} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن، NSE و $\log NSE$ به ترتیب نمایانگر برازش کلی هیدروگراف و دبی‌های کم مقدار هستند (Gupta et al., 1998; Krause et al., 2005)، امضاها و هیدرولوژیک شاخص‌های فرآیندی سیستم را نشان می‌دهند (Yilmaz et al., 2008) و شاخص‌های رخدادها و فصلی ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها لحاظ شده‌اند. وزن‌های تابع هدف به صورت پویا و وابسته به شرایط اقلیمی و فصلی تنظیم شدند تا در دوره‌های بحرانی، تأکید بیشتری بر رخدادها و عملیات محدودی اعمال شود و از غلبه معیارهای برازش میانگین بر رفتارهای حدی جلوگیری گردد.

۲-۱۰- واسنجی خودکار مبتنی بر منطق ازدحام محور (PSO)

در گام نخست، برای خروج از محدودیت‌های واسنجی دستی و شناسایی فضای بهینه پارامترها، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) استفاده گردید. الگوریتم PSO با جستجوی هوشمند در فضای پارامتریک تعریف شده در جدول (۲)، خطای بین دبی محاسباتی و مشاهداتی را کمینه می‌سازد. این روش تکاملی مبتنی بر جمعیت است که با الهام از رفتار جمعی موجودات در طبیعت توسعه یافته و در آن هر ذره معرف یک مجموعه پارامتر از مدل است. ذرات با بهره‌گیری از تجربه شخصی خود و بهترین تجربه جمعی کل جمعیت، موقعیت خود را در فضای جستجو به‌روزرسانی کرده و به سمت پاسخ بهینه همگرا می‌شوند (Knight et al., 2015). مقداردهی اولیه پارامترها به صورت تصادفی در محدوده‌های فیزیکی مجاز انجام شده و فرآیند بهینه‌سازی طی تکرارهای متوالی ادامه می‌یابد. به‌روزرسانی موقعیت و سرعت هر ذره i در تکرار $t + 1$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$V_i(t+1) = w \times V_i(t) + C_1 \times r \times (X_i^{pbest} - X_i(t)) + C_2 \times r \times (X_i^{gbest} - X_i(t)) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن w وزن اینرسی، $V_i(t)$ نشان‌دهنده سرعت ذره i در زمان t ، C_1 و C_2 به ترتیب ضرایب وزنی برای بهترین موقعیت شخصی و بهترین موقعیت جهانی هستند. X_i^{pbest} بهترین موقعیت شناخته‌شده توسط ذره i ؛ X_i^{gbest} نشان‌دهنده بهترین موقعیت شناخته‌شده توسط کل ازدحام (جمعیت) و r بیانگر یک عدد تصادفی بین ۰ و ۱ است (Jahandideh Tehrani et al., 2020). این الگوریتم‌ها مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه غیرقابل غلبه (جبهه پارتو) را استخراج می‌کنند که بیانگر مصالحه بین اهداف مختلف هستند. تحلیل جبهه پارتو امکان انتخاب مجموعه پارامترهایی را فراهم می‌کند که به‌طور هم‌زمان برازش هیدروگراف، واقع‌گرایی فرآیندی و دقت رخدادها و فصلی را بیشینه می‌کنند. به منظور بهینه‌سازی پارامترهای مدل در حالت Static از الگوریتم PSO و برای بهینه‌سازی فرم پویا از فرم چند هدفه آن یعنی MOPSO استفاده گردید.

Table 2. Parameter ranges of the SAC-SMA structural model
جدول ۲. دامنه پارامترهای ساختاری مدل SAC-SMA

Parameter	Unit	Lower Bound	Upper Bound	Optimal Values			
				SiminehRoud Watershed		NazluChay Watershed	
				SAC-SMA (Static)	SAC-SMA (Dynamic)	SAC-SMA (Static)	SAC-SMA (Dynamic)
UZW	mm	10	150	10	10.326	10	8
UZF	mm	10	150	150	89.9633	145.1824	83.6062
LZW	mm	50	300	50	60.0791	175.5832	63.8226
LZF	mm	50	500	489.0513	50	192.4861	50
LZF	mm	10	300	300	10	10.0002	299.9472
UZK	day-1	0.1	0.5	0.1601	0.5	0.1578	0.1
LZPK	day-1	0.001	0.02	0.004	0.0185	0.0057	0.02
LZSK	day-1	0.02	0.25	0.02	0.02	0.0732	0.1331
PCTIM	km ² /km ²	0	0.1	0.1	0	0.0376	3.7779 e-05
ADIMP	km ² /km ²	0	0.2	0	4.7934 e-04	2.2395 e-05	0
PFREE	mm/mm	0	0.6	0.6	0.6	0.5844	0.4942
ZPERC	none	5	250	5	5	36.9248	5
REXP	none	1	5	5	5	4.9999	1

۲-۱۱- ارزیابی عملکرد و اعتبارسنجی مدل

به منظور قضاوت در مورد توانمندی مدل ارتقایافته در بازسازی فرایندهای پیچیده هیدرولوژیک، کارایی شبیه‌سازی در دو سطح پاسخ کلی حوضه و رفتار وقایع حدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از ۴ شاخص کلیدی جهت سنجش انطباق میان جریان مشاهداتی (Q_{obs}) و شبیه‌سازی شده (Q_{sim}) تحلیل شدند (جدول ۳). در این راستا، از ضریب نش-ساتکلیف (NSE) برای ارزیابی هم‌سویی کلی هیدروگراف و از شاخص کلینگ-گوپتا (KGE) به منظور بازنمایی دقیق تغییرپذیری داده‌ها و تعادل پارامتریک استفاده شد. علاوه بر معیارهای فوق، دقت مدل در تخمین مقادیر نقطه‌ای و تحلیل خطاها با استفاده از شاخص‌های ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) تکمیل گردید؛ به‌طوری که RMSE به دلیل حساسیت بالا به انحرافات بزرگ، معیار اصلی برای قضاوت در مورد عملکرد مدل در دبی‌های اوج قرار گرفت. در نهایت، با توجه به تمرکز این پژوهش بر ارتقای مدل از طریق پارامترهای پویا، تمامی شاخص‌های مذکور علاوه بر کل دوره، به‌طور مجزا برای جریان‌های فراتر از صدک ۹۰ ($Q > Q_{90}$) نیز محاسبه شدند. این تحلیل تفکیکی، در کنار بررسی منحنی‌های تداوم جریان (FDC)، مبنای اصلی برای اثبات کارایی پارامترهای متغیر با زمان در بازسازی رفتارهای غیرخطی حوضه‌های نازلوچای و سیمینه‌رود قرار گرفت. همچنین، به منظور شناسایی میزان تأثیر پارامترهای ساختاری بر عملکرد مدل و بررسی رفتار پاسخ مدل نسبت به تغییرات پارامترها، تحلیل حساسیت پارامترهای منتخب نیز انجام شد. در این تحلیل، حساسیت عملکرد مدل نسبت به انحراف درصدی پارامترها از مقادیر بهینه حاصل از

فرآیند واسنجی بررسی و تغییرات شاخص‌های NSE و KGE ارزیابی گردید. همچنین، اهمیت نسبی پارامترها بر اساس میزان تغییرپذیری شاخص‌های عملکرد و الگوی پاسخ مدل تعیین شد. این تحلیل، در کنار ارزیابی عملکرد مدل در مقیاس کلی و جریان‌های حدی، برای شناسایی پارامترهای مؤثر بر پاسخ هیدرولوژیک و تفسیر نقش آن‌ها در رفتار مدل به کار گرفته شد.

Table 3. Model performance evaluation metrics

جدول ۳. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل

(Alvarez and Barco, 2023; Mostafaei et al., 2023; Sabzipour et al., 2023)

Description	Equations	Index
مقدار بهینه برابر با ۱ است. مقادیر بین ۰ و ۱ عموماً نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل هستند. با این حال، شبیه‌سازی مدل زمانی رضایت‌بخش تلقی می‌شود که $NSE > 0.50$ باشد.	$1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \right]$	NSE
مقدار بهینه برابر با ۱ است، مقادیر بین ۰.۵ تا ۱ عموماً عملکرد قابل قبول مدل را نشان می‌دهند، و R^2 بالاتر از ۰.۷ نشان‌دهنده شبیه‌سازی رضایت‌بخش است.	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(e_i - \bar{e})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}} \right)^2$	R^2
مقدار هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد، خطای پیش‌بینی مدل کمتر است و شبیه‌سازی دقیق‌تر است.	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - e_i)^2}{n}}$	RMSE
مقدار ۱ نشان‌دهنده عملکرد کامل مدل است. مقادیر مثبت نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب و مقادیر منفی نشان‌دهنده عملکرد ضعیف مدل می‌باشد.	$1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\left\ \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right\ \right)^2 + \left(\left\ \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1 \right\ \right)^2}$	KGE

f: ضریب همبستگی خطی بین $Q_{sim,t}$ و $Q_{obs,t}$

σ : انحراف معیار $Q_{sim,t}$ و $Q_{obs,t}$

μ : میانگین $Q_{sim,t}$ و $Q_{obs,t}$

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA در دو سطح کلاسیک (ایستا) و ارتقایافته (پویا) برای دو حوضه‌ی سیمینه‌رود و نازلوچای ارائه شده است. برای هر سناریو، خروجی‌های مدل در قالب چهار نمودار گرافیکی شامل: (a) هیدروگراف و هایتوگراف جریان، (b) نمودار پراکندگی^{۱۱}، (c) تحلیل باقی‌مانده‌ها^{۱۲} و (d) منحنی تداوم جریان^{۱۳} (FDC) در دوره‌های آموزش و اعتبارسنجی تحلیل شده‌اند. همچنین به منظور ارزیابی دقیق عملکرد مدل در بازسازی وقایع حدی، شاخص‌های آماری علاوه بر کل سری زمانی، به‌طور اختصاصی برای ۱۰ درصد بالای جریان (Top 10% Flow) نیز محاسبه و ارائه گردید.

۳-۱- عملکرد مدل در حوضه سیمینه‌رود



شکل‌های (۴) تا (۷) برآیند ارزیابی‌های آماری و خروجی‌های ترسیمی مدل SAC-SMA را در دو ساختار کلاسیک و ارتقایافته برای دوره‌های آموزش و اعتبارسنجی به تصویر می‌کشند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل کلاسیک در مرحله آموزش (شکل ۴) با دستیابی به ضریب تبیین 0.729 و کارایی نش-ساتکلیف 0.713 ، انطباق قابل قبولی در بازسازی حجم جریان از خود نشان داده است؛ سطحی که در محدوده‌ی معمول گزارش شده برای کاربرد عملیاتی این مدل در حوضه‌های داده‌محدود قرار دارد (Macedo et al., 2025). در این مرحله، سنجه کلینگ-گوپتا (KGE) برابر با 0.826 ثبت شد و مقادیر خطا نیز در سطح نسبتاً مناسبی قرار داشت؛ به‌طوری‌که ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برابر با $11/59 \text{ m}^3/\text{s}$ برآورد گردید. با این حال، در مرحله اعتبارسنجی (شکل ۵)، عملکرد این سیستم با افت همراه شده و شاخص NSE به 0.681 و R^2 به 0.701 تقلیل یافته است. همچنین افزایش مقادیر خطا در این مرحله، به‌ویژه RMSE برابر با $0.915 \text{ m}^3/\text{s}$ ، نشان‌دهنده دشواری مدل در تعمیم‌پذیری و انطباق با شرایط متغیر دوره آزمون در ساختار ثابت پارامتری است.

بررسی دقیق‌تر رفتار مدل در پیش‌بینی وقایع حدی نشان می‌دهد که کارایی سیستم برای ده درصد بالای جریان در دوره اعتبارسنجی با کاهش همراه بوده و سنجه‌های NSE و R^2 به ترتیب به 0.544 و 0.580 رسیده است. چنین افت عملکردی در شبیه‌سازی جریان‌های بالا برای SAC-SMA نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است؛ (Guniganti et al. (2024 و Alvarez and Barco (2024 هر دو به محدودیت این مدل در بازنمایی مناسب جریان‌های بالا اشاره کرده‌اند. در مقابل، نتایج حاصل از به‌کارگیری رویکرد ارتقایافته با پارامترهای پویا در مراحل آموزش (شکل ۶) و اعتبارسنجی (شکل ۷)، مبین پایداری ساختاری محسوس، بهبود تعمیم‌پذیری و واقع‌گرایی فیزیکی بیشتر در فرآیند شبیه‌سازی حوضه است. بر اساس سنجه‌های آماری به‌دست‌آمده، مدل پویا در مرحله آموزش (شکل ۶) توانسته است با ثبت ضریب تبیین 0.882 و شاخص نش-ساتکلیف 0.879 ، انطباق بسیار بالایی با داده‌های مشاهداتی ایجاد کند. در این مرحله، شاخص KGE به 0.926 رسیده و میزان خطای کلی سیستم کاهش محسوسی یافته است؛ به‌طوری‌که RMSE برابر با $7/54 \text{ m}^3/\text{s}$ برآورد شد. نقطه قوت اصلی این ساختار، در حفظ ثبات عملکرد و تعمیم‌پذیری مناسب در مرحله اعتبارسنجی (شکل ۷) نمایان می‌شود؛ جایی که شاخص کارایی NSE برابر با 0.851 و R^2 معادل 0.855 محاسبه شده است. پایداری معیار KGE در سطح 0.917 و کنترل میزان خطا (RMSE برابر با $10/32 \text{ m}^3/\text{s}$) در این دوره آزمون، برتری محسوس رویکرد پویای پارامترها را در مواجهه با شرایط متغیر هیدرولوژیک و اقلیمی حوضه نشان می‌دهد.

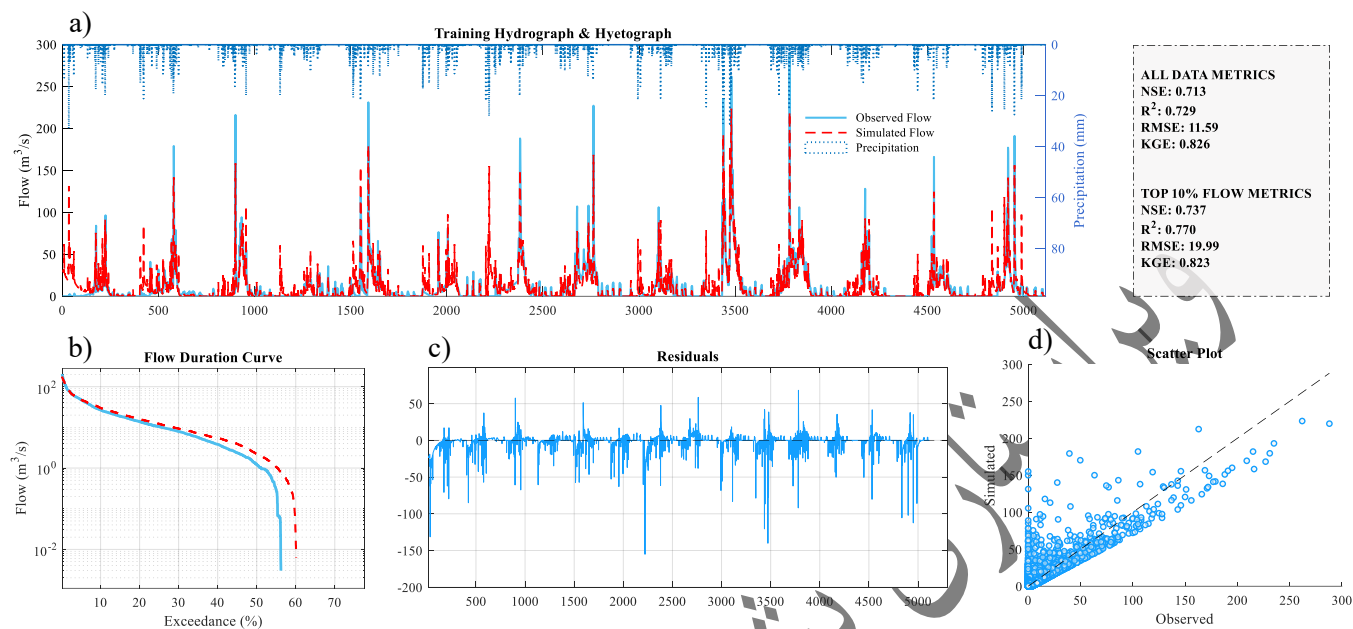


Fig. 4- Simulation results of the classical SAC-SMA model during the calibration period in the SiminehRoud watershed

شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA کلاسیک در دوره آموزش آبخیز سیمینه‌رود

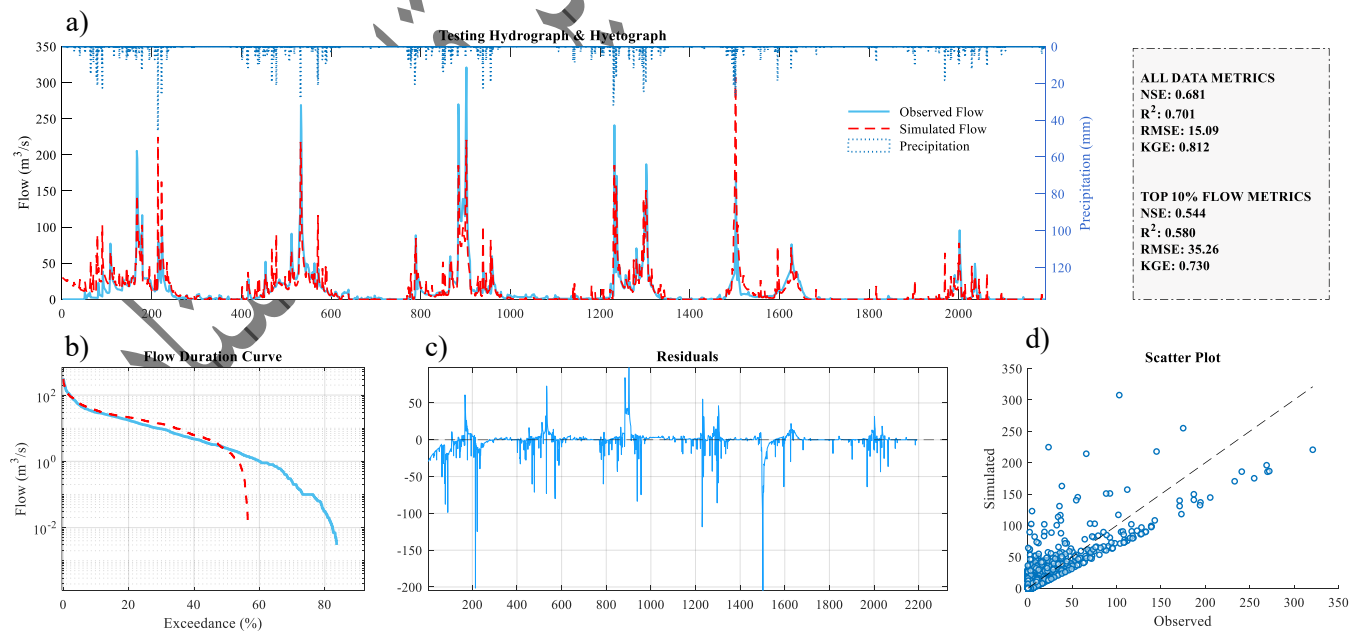


Fig. 5- Simulation results of the classical SAC-SMA model during the validation period in the SiminehRoud watershed



شکل ۵- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA کلاسیک در دوره آزمون آبخیز سیمینه‌رود

ارزیابی سنج‌های اختصاصی جریان‌های حدی (Top 10% Flow Metrics) در ساختار پویا، بهبود قابل‌توجهی را در ردیابی سیلاب‌ها نشان می‌دهد. در مرحله آموزش (شکل ۶)، مدل برای ده درصد بالای جریان به شاخص‌های NSE معادل ۰/۹۱۵ و R^2 برابر با ۰/۹۲۰ دست یافته است و مقدار RMSE نیز برابر با $11/40 \text{ m}^3/\text{s}$ ثبت شده است. این عملکرد در مرحله اعتبارسنجی (شکل ۷) نیز با پایداری مناسبی حفظ شده، به‌طوری‌که شاخص NSE جریان‌های حدی برابر با ۰/۸۳۳، ضریب R^2 معادل ۰/۸۳۶ و سنج KGE برابر با ۰/۸۸۶ محاسبه گردید. همچنین کنترل خطای جریان‌های اوج (RMSE برابر با $21/35 \text{ m}^3/\text{s}$) در دوره آزمون نشان می‌دهد که مکانیزم پویای مدل توانسته است مشکل کم‌برآوردی دبی‌های سیلابی شدید را تا حد زیادی تعدیل کند. بهبود قابل‌توجه NSE در جریان‌های حدی با یافته‌های (۲۰۲۵) Trung et al هم‌راستا است. تحلیل حساسیت سراسری سوپول در مطالعه آنان نشان داد که LZFSM و LZFPF در فصل سیلاب، عمدتاً از طریق برهم‌کنش با سایر پارامترها بر جریان‌های اوج اثر می‌گذارند. این شواهد نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری زمانی پارامترهای ذخیره‌ای می‌تواند در بازنمایی بهتر پاسخ حوضه در شرایط سیلابی نقش داشته باشد؛ سازوکاری که با بهبود عملکرد ساختار پویای مدل حاضر در جریان‌های حدی سازگار است.

تحلیل تطبیقی منحنی‌های تداوم جریان (FDC) در بخش (ت) نمودارها، جزئیات مهمی از فرآیند اصلاح هیدرولوژیک مدل را آشکار می‌سازد. اگرچه در هر دو دوره آموزش و اعتبارسنجی، خط شبیه‌سازی شده در بازه جریان‌های سیلابی و میانی (تداوم ۰ تا ۵۰ درصد) انطباق بسیار مناسبی با منحنی مشاهداتی دارد، اما در بخش جریان‌های کم‌دبی و پایه (تداوم بیش از ۶۰ درصد) همچنان الگوی افت ناگهانی و کاهش سریع خط شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. با این حال، مقایسه مرتبه بزرگی محور دبی در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد که مدل پویا انحراف ساختاری را تا حدودی به تأخیر انداخته است، هرچند تخلیه سریع مخازن کم‌عمق زیرسطحی همچنان به‌عنوان یکی از رفتارهای ساختاری مدل در تداوم‌های بالا مشاهده می‌شود. نمودارهای باقی‌مانده‌ها و پراکنش نیز پایداری توزیع خطاها را به‌خوبی تأیید می‌کنند. در نمودار پراکنش شکل‌های (۶) و (۷)، تمرکز نقاط در اطراف خط ۱:۱، به‌ویژه در دبی‌های میانی و جریان‌های سیلابی، نشان‌دهنده کاهش خطاهای سیستماتیک و کاهش تمایل مدل به کم‌برآوردی دبی‌های اوج است. تحلیل هیدروگراف باقی‌مانده‌ها نیز نشان می‌دهد که دامنه نوسانات خطا در دوره آموزش تا حد زیادی محدود شده و در دوره اعتبارسنجی نیز، به‌جز یک نوسان شاخص در حوالی گام زمانی ۲۰۰، سایر خطاها عمدتاً در اطراف خط صفر توزیع شده‌اند که بیانگر پایداری مناسب عملکرد مدل در طول سری زمانی است.

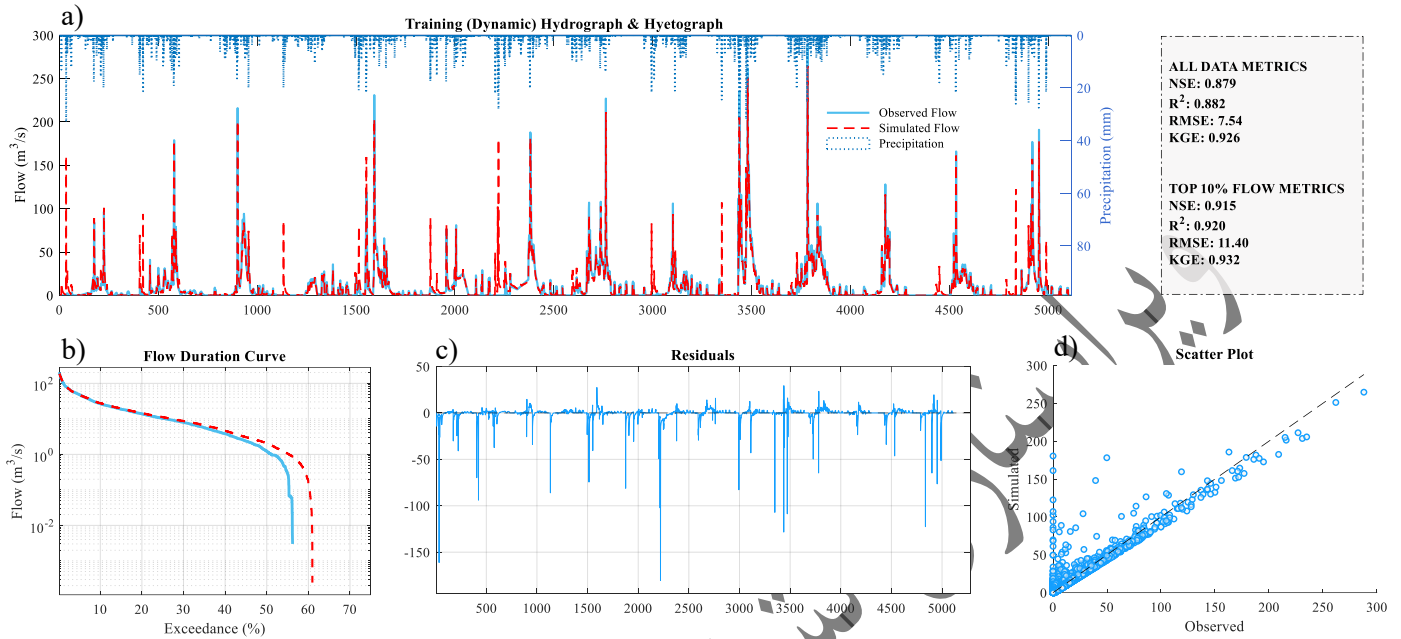


Fig. 6- Simulation results of the enhanced (dynamic) SAC-SMA model during the calibration period in the SiminehRoud watershed

شکل ۶- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA ارتقا یافته (پویا) در دوره آموزش آبخیز سیمینه‌رود

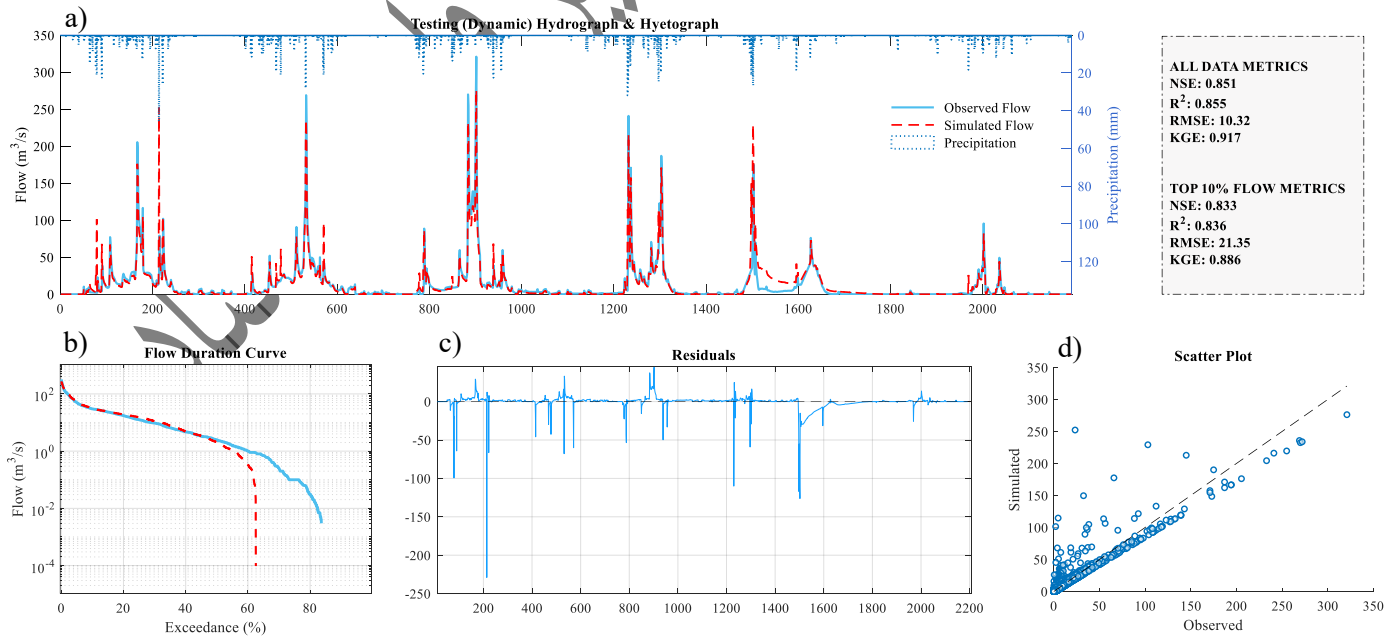


Fig. 7- Simulation results of the enhanced (dynamic) SAC-SMA model during the validation period in the SiminehRoud watershed

شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA ارتقا یافته (یویا) در دوره آزمون آبخیز سیمینه‌رود

۳-۲- عملکرد مدل در حوضه نازلوچای

ارزیابی خروجی‌های گرافیکی و آماری در حوضه نازلوچای که در شکل‌های (۸) تا (۱۱) ارائه شده، بیانگر تفاوت‌های ساختاری میان دو رویکرد مورد مطالعه است. مطابق نتایج حاصل از مدل کلاسیک در مرحله آموزش (شکل ۸)، این سیستم توانسته است به ضریب تبیین 0.705 و کارایی نش-ساتکلیف 0.705 دست یابد. در این وضعیت، میزان RMSE برابر با $5.41 \text{ m}^3/\text{s}$ و شاخص KGE معادل 0.812 ثبت گردید که نشان از برازش قابل قبول مدل بر داده‌های اولیه دارد. با این وجود، انتقال به مرحله اعتبارسنجی (شکل ۹) نشان‌دهنده حفظ پایداری نسبی عملکرد مدل در داده‌های مستقل بوده است؛ به‌گونه‌ای که شاخص NSE برابر با 0.702 و مقدار RMSE معادل $4.94 \text{ m}^3/\text{s}$ برآورد شده است. این موضوع بیانگر آن است که مدل کلاسیک توانسته است بخش قابل قبولی از رفتار هیدرولوژیک حوضه را در دوره اعتبارسنجی نیز بازسازی نماید.

بررسی عمیق‌تر سبجه‌های مربوط به وقایع حدی در این مرحله، محدودیت نسبی مدل در بازسازی دقیق رواناب‌های بحرانی را نمایان می‌سازد؛ به‌طوری‌که مقدار NSE برای ۱۰ درصد بالایی جریان برابر با 0.634 ثبت شده است. همچنین، شاخص KGE در بازه جریان‌های حدی مرحله آزمون 0.712 برآورد شد که بیانگر وجود انحراف نسبی در تخمین دبی‌های اوج است. این انحراف، که در مطالعه Alvarez and Barco (2025) نیز در حوضه‌های کوهستانی و پرشیب آند کلمبیا مشاهده شد، می‌تواند در حوضه‌هایی با شرایط توپوگرافی مشابه نازلوچای برجسته‌تر باشد. در مقابل، نتایج مدل ارتقایافته در مرحله آموزش (شکل ۱۰) و اعتبارسنجی (شکل ۱۱)، نشان‌دهنده بهبود معنی‌دار در بازسازی رفتارهای غیرخطی حوضه نازلوچای است. در مرحله آموزش این مدل (شکل ۱۰)، شاخص NSE برابر با 0.875 و ضریب تبیین معادل 0.879 محاسبه گردید و مقدار RMSE نیز به $3.52 \text{ m}^3/\text{s}$ کاهش یافت که بیانگر ارتقای دقت مدل در شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب است. همچنین، شاخص KGE در این مرحله برابر با 0.913 ثبت شد که نشان‌دهنده همخوانی مناسب میان داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

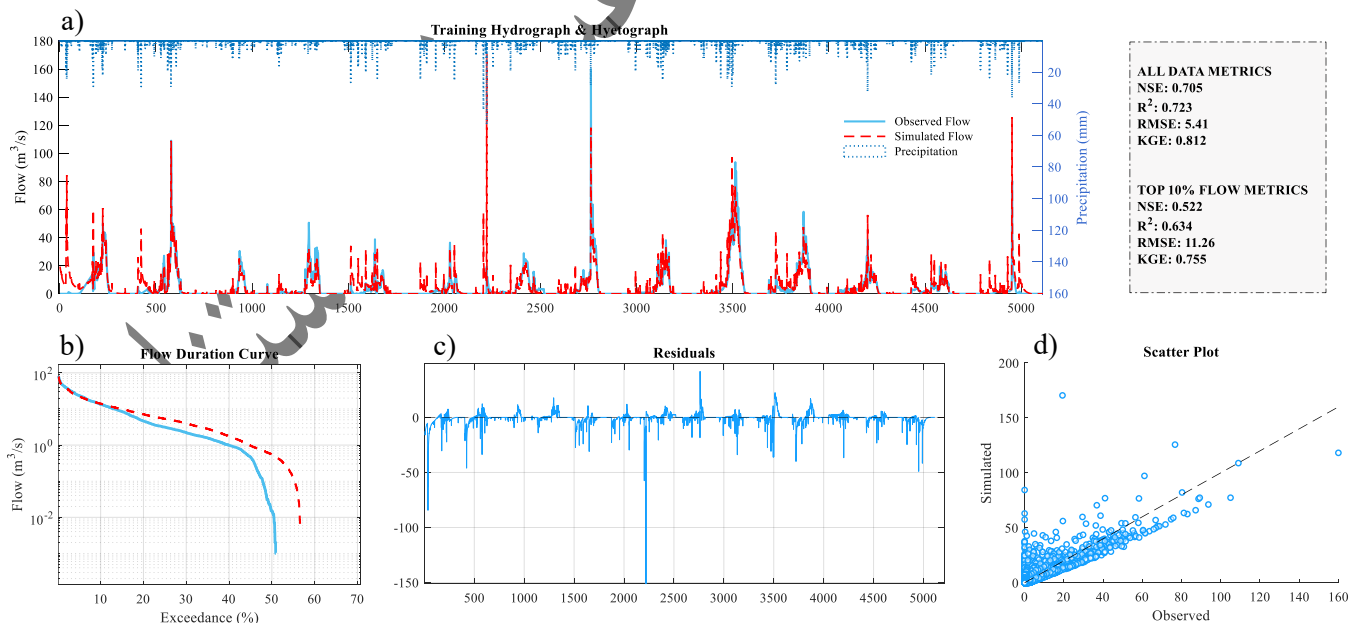


Fig. 8- Simulation results of the classical SAC-SMA model during the calibration period in the NazluChay watershed

شکل ۸- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA کلاسیک در دوره آموزش آبخیز نازلوچای

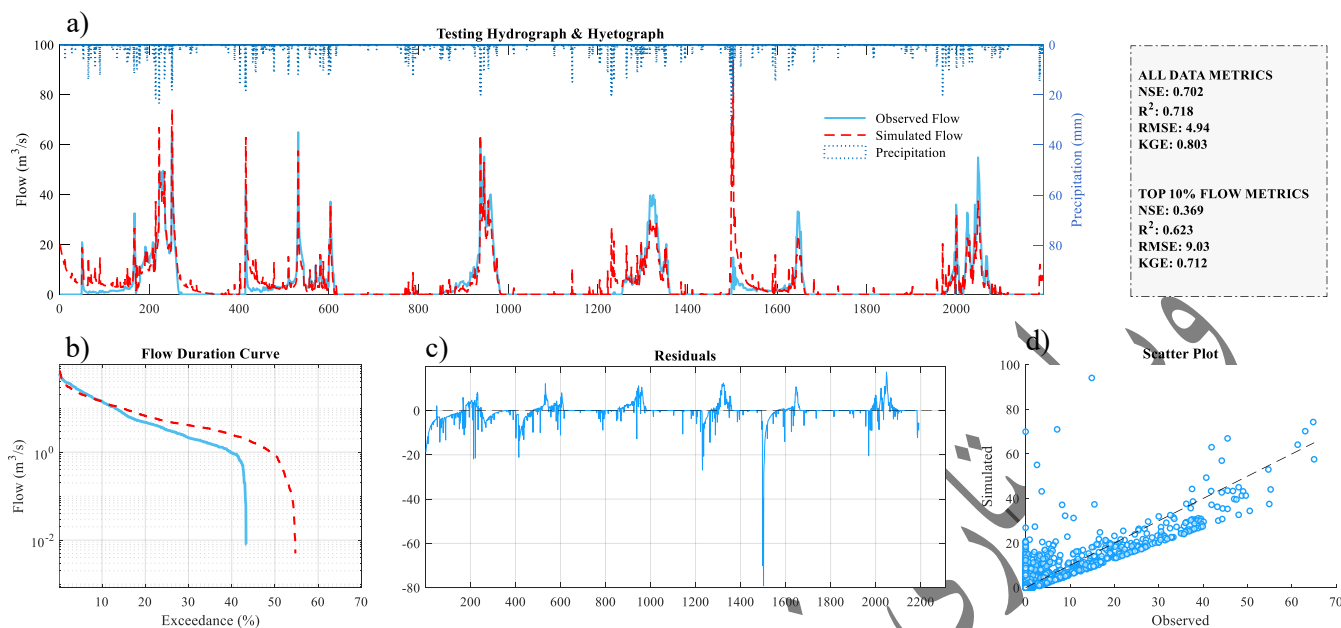


Fig. 9- Simulation results of the classical SAC-SMA model during the validation period in the NazluChay watershed
 شکل ۹- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA کلاسیک در دوره آزمون آبخیز نازلوچای

در مرحله اعتبارسنجی مدل ارتقایافته (شکل ۱۱)، شاخص NSE کل داده‌ها برابر با ۰/۸۲۶ و KGE معادل ۰/۸۸۷ برآورد گردید، در حالی که مقدار RMSE به $3/78 \text{ m}^3/\text{s}$ محدود شد. همچنین، سنجه NSE برای جریان‌های بالا برابر با ۰/۷۴۵ محاسبه شد که نسبت به مدل کلاسیک بهبود محسوسی را نشان می‌دهد. تحلیل توزیع باقی‌مانده‌ها در بخش (پ) نیز تایید می‌کند که میزان خطاهای سیستماتیک در برآورد دبی‌های اوج نسبت به مدل کلاسیک کاهش یافته است. در این سناریو، شاخص KGE مربوط به جریان‌های حادی به ۰/۸۶۴ رسیده که نشان‌دهنده توانایی بالاتر مدل در بازسازی رخداد‌های حادی می‌باشد.

تطبیق هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی نشان می‌دهد که پویاسازی پارامترها باعث شده است تا مدل در ردیابی نوسانات میان‌مدت جریان پایداری بیشتری داشته باشد. مطابق با منحنی تداوم جریان (FDC) در بخش (ت) شکل ۱۱، ساختار ارتقایافته موفق شده است بیش‌برآوردی جریان‌های پایه را، که از نقاط ضعف اصلی مدل کلاسیک در نازلوچای محسوب می‌شد، تعدیل نماید. این اصلاح ساختاری منجر به کنترل بهتر دامنه تغییرات خطا در طول دوره شبیه‌سازی گردیده و توزیع منطقی‌تری از خطاها را نسبت به مدل کلاسیک فراهم ساخته است. تحلیل نمودار پراکندگی (بخش ب) نیز گویای این مطلب است که مدل پویا با کاهش پراکندگی نقاط پیرامون خط نیمساز، عدم قطعیت در برآورد مقادیر کم‌دبی را به حداقل رسانده است. در مجموع، هم‌سویی منحنی‌های تداوم جریان با واقعیت‌های هیدرولوژیک حوضه در مدل ارتقایافته، کارایی این رویکرد را در بازسازی پاسخ‌های پیچیده حوضه به بارش‌های فصلی به اثبات می‌رساند.

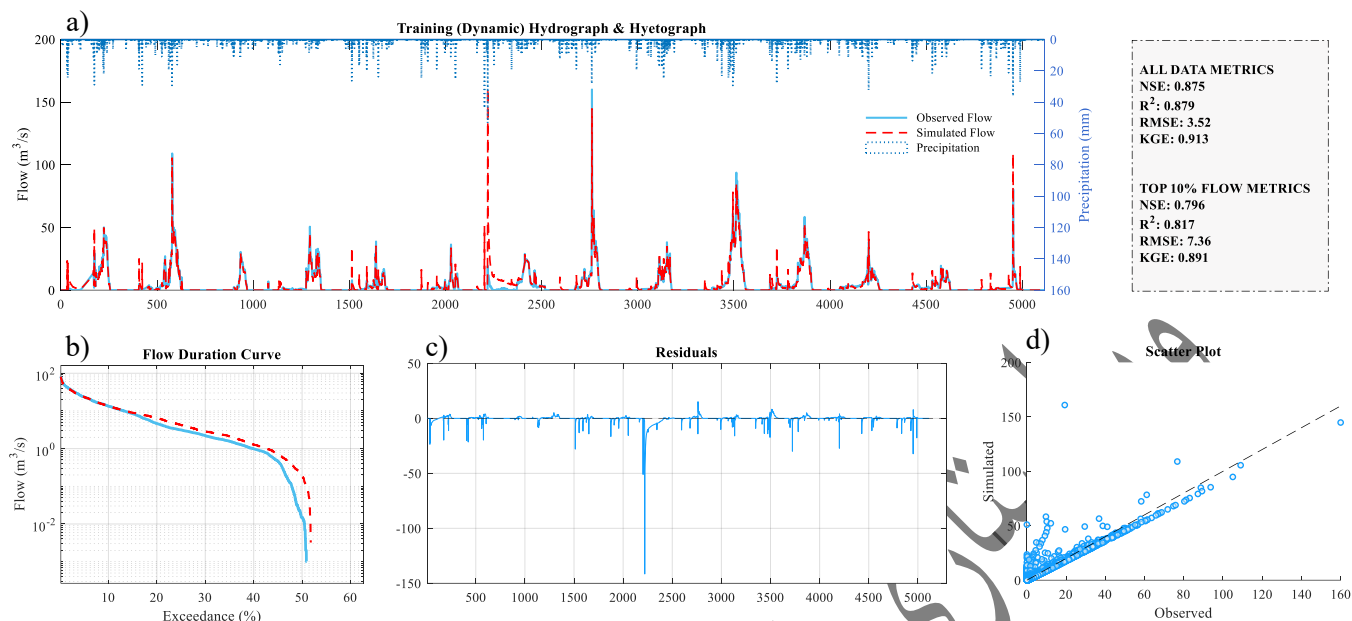


Fig. 10- Simulation results of the enhanced (dynamic) SAC-SMA model during the calibration period in the NazluChay watershed

شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA ارتقا یافته (پویا) در دوره آموزش آبخیز نازلوچای

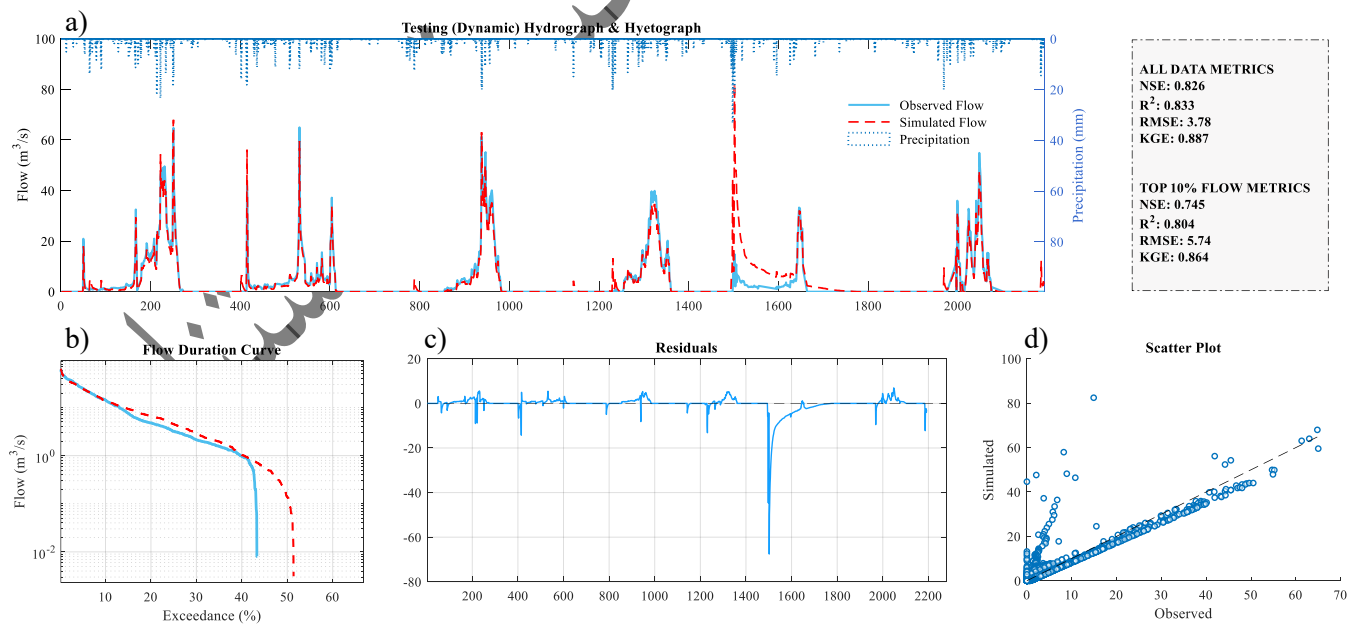


Fig. 11- Simulation results of the enhanced (dynamic) SAC-SMA model during the validation period in the NazluChay watershed

شکل ۱۱- نتایج شبیه‌سازی مدل SAC-SMA ارتقا یافته (پویا) در دوره آزمون آبخیز نازلوچای

۳-۳- تحلیل حساسیت پارامترهای ساختاری مدل

شکل ۱۲ تحلیل حساسیت پارامترهای مدل، رفتار دینامیکی و میزان حساسیت پاسخ‌دهی رواناب را نسبت به تغییرات پارامترهای مدل در قالب سه بخش مکمل به تصویر می‌کشد. در بخش اول شکل (A)، منحنی‌های پاسخ ضریب نش-ساتکلیف (NSE) نسبت به اختلال و تغییرات درصدی پارامترها نشان می‌دهد که مدل بیشترین حساسیت غیرخطی را نسبت به پارامترهای PCTIM base (مساحت غیرقابل نفوذ دائمی) و UZTWM base (ظرفیت نگهداری رطوبت سطحی) از خود بروز می‌دهد؛ به‌طوری که با انحراف این پارامترها از مقدار بهینه (نقطه صفر)، مقدار کارایی NSE به شکل محسوس و شیب‌داری افت پیدا می‌کند، در حالی که پارامترهای مربوط به لایه‌های عمیق‌تر مانند PFREE یا LZTWM منحنی‌های کاملاً افقی و رفتاری بی‌تفاوت نشان می‌دهند. در بخش دوم شکل (B)، رتبه‌بندی اهمیت کلی پارامترها بر اساس انحراف معیار کارایی NSE، برداشتی انباشته و کمی ارائه می‌دهد که بر طبق آن، پارامتر دینامیک PCTIM base با اختلاف زیاد در رتبه نخست حساسیت قرار گرفته و پس از آن پارامترهای دبی پایه‌ای و فروکاشت جریان یعنی LZSK، UZTWM base و UZK بیشترین تأثیر را بر خروجی رواناب مدل ایفا می‌کنند. این امر تأکید می‌کند که پاسخ‌دهی حوضه عمدتاً توسط مکانیزم‌های سطحی، نفوذناپذیری دینامیک و سرعت تخلیه مخازن رواناب سریع کنترل می‌شود و پارامترهای عمیق‌تر مانند LZFSM و PFREE نقش فرعی و کم‌اهمیت‌تری در واسنجی دارند. در نهایت، در بخش سوم شکل (C)، نقشه حرارتی حساسیت شاخص KGE تغییرات هم‌زمان رفتار مدل را بر حسب معیار عملکردی دیگر تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تغییرات در محدوده منفی اختلال PCTIM base باعث افت شدید کیفیت مدل (رنگ‌های آبی تیره با مقادیر منفی KGE) می‌گردد، در حالی که در پارامتر بیشترین حساسیت مثبت در سمت تغییرات منفی پارامتر مشاهده می‌شود.

در مجموع، نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که پاسخ مدل بیش از همه تحت تأثیر پارامترهای مرتبط با سطح حوضه، ظرفیت نگهداری رطوبت لایه بالایی و سرعت تخلیه مخازن سریع قرار دارد. این الگو با نتایج تحلیل‌های حساسیت انجام‌شده برای مدل SAC-SMA در مطالعات پیشین نیز قابل مقایسه است؛ به‌طوری که PCTIM، LZSK و پارامترهای مرتبط با ذخیره رطوبت و جریان پایه در مطالعات Tang et al. (2007)، van Werkhoven et al. (2009)، Uliana et al. (2019) و Yudianto et al. (2026) در شمار پارامترهای اثرگذار گزارش شده‌اند. در مطالعه Yudianto et al. (2026)، به‌طور مشخص PCTIM، UZFWM، LZFSM و LZSK در میان پارامترهای حساس SAC-SMA قرار گرفتند، در حالی که van Werkhoven et al. (2009) نیز اهمیت PCTIM و پارامترهای ناحیه ریشه و لایه‌های زیرین را در فرایند واسنجی چندهدفه نشان دادند. از این منظر، نتایج حاضر ضمن تأیید اهمیت این گروه از پارامترها، حساسیت غالب PCTIM و UZTWM و تفاوت آشکار میان پارامترهای سطحی و لایه‌های عمیق‌تر را در حوضه‌های مورد مطالعه آشکار می‌کند. این یافته با ساختار پارامتردهی پویا در پژوهش حاضر نیز ارتباط دارد؛ زیرا تغییرپذیری زمانی پارامترهای کنترل‌کننده ذخیره رطوبت و پاسخ سریع حوضه می‌تواند در بازنمایی بهتر تغییرات رژیم جریان و رخدادهای حدی مؤثر باشد.

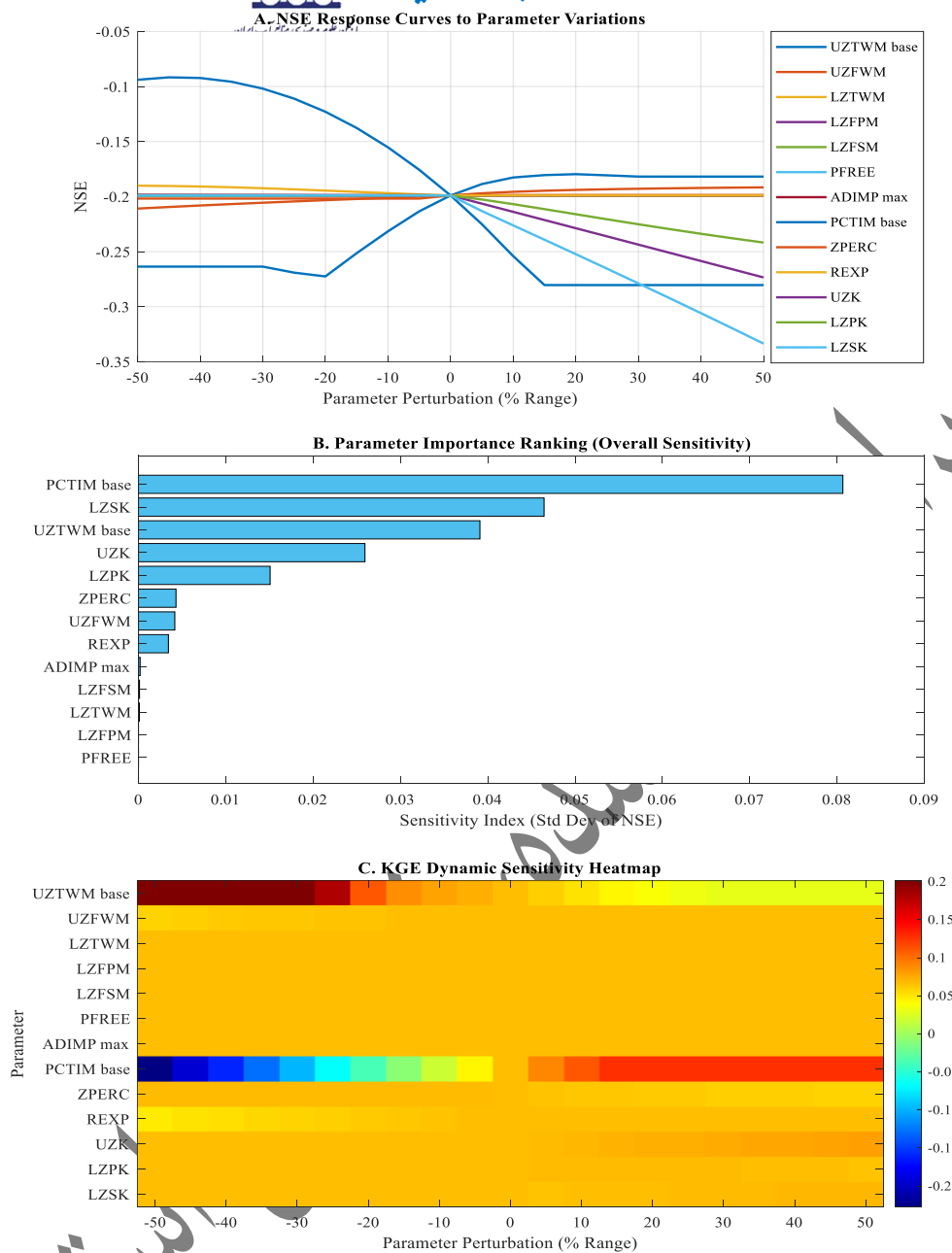


Fig. 12- Sensitivity analysis of SAC-SMA model parameters based on NSE response curves (A), parameter importance ranking (B), and KGE heatmap (c)

شکل ۱۲- تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SAC-SMA بر اساس منحنی‌های پاسخ NSE (A)، رتبه‌بندی اهمیت پارامترها (B) و نقشه حرارتی KGE (C)

۳-۴- مقایسه و تبیین بهبود عملکرد مدل SAC-SMA

مقایسه تطبیقی شاخص‌های عملکردی ارائه‌شده در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که چارچوب پارامتردهی پویای SAC-SMA در هر دو حوضه مورد مطالعه، نسبت به ساختار کلاسیک، بهبود معناداری در بازسازی رفتار هیدرولوژیک ایجاد کرده است. میانگین ارتقای عملکرد مدل در

حوضه‌های نازلوچای و سیمینه‌رود به‌ترتیب برابر با ۳۲/۰۴ و ۳۱/۱۹ درصد به‌دست آمد که بیانگر اثربخشی پایدار ساختار پویا در شرایط هیدرواقليمی متفاوت است. در مقیاس کل سری زمانی، بیشترین میزان بهبود در حوضه سیمینه‌رود مربوط به کاهش RMSE (معادل ۳۱/۶۱ درصد) و افزایش NSE (معادل ۲۴/۹۶ درصد) بوده که نشان‌دهنده ارتقای هم‌زمان دقت بازسازی هیدروگراف و کاهش خطاهای بزرگ در شبیه‌سازی دبی است.

Hydrological Performance Comparison of Static and Dynamic SAC-SMA Configurations

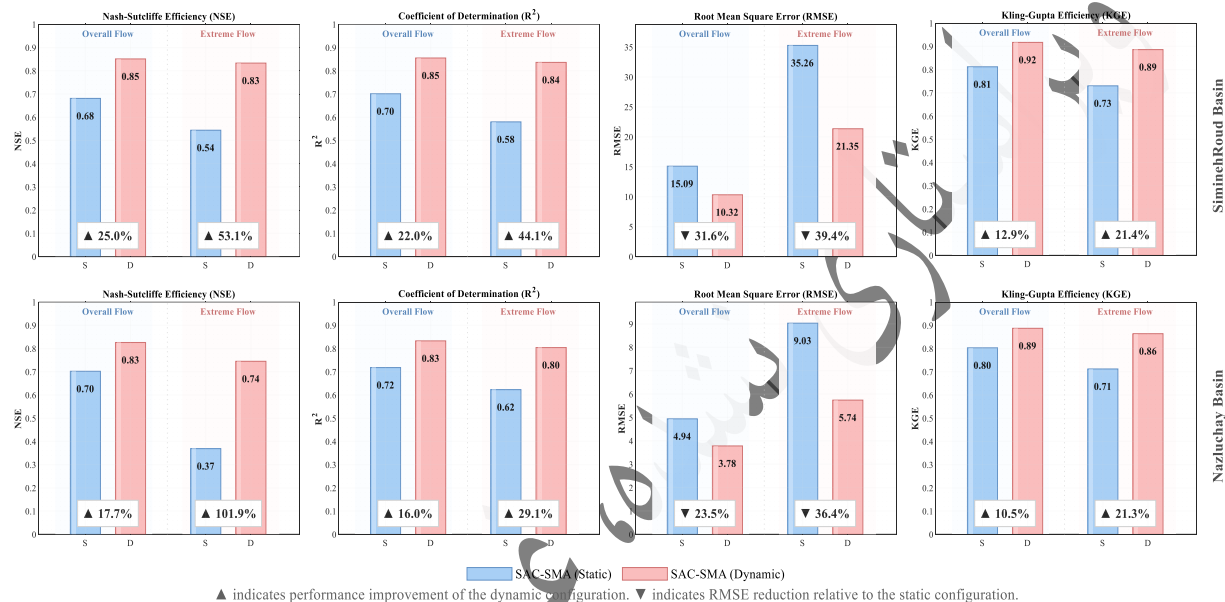


Fig. 13- Comparative evaluation of the classical and dynamic SAC-SMA models in reconstructing flow regimes and extreme events

شکل ۱۳- مقایسه تطبیقی عملکرد مدل SAC-SMA کلاسیک و پویا در بازسازی رژیم جریان و رخداد های حدی

در حوضه نازلوچای نیز کاهش ۲۳/۴۸ درصدی RMSE و افزایش ۱۷/۶۶ درصدی NSE بیانگر افزایش توان مدل در بازنمایی پاسخ‌های زمانی حوضه تحت شرایط غیرایستا است. با این حال، برجسته‌ترین تفاوت میان دو ساختار در بازسازی جریان‌های حدی مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که شاخص NSE مربوط به دبی‌های اوج در نازلوچای بیش از دو برابر (حدود ۱۰۲ درصد) و در سیمینه‌رود حدود ۵۳/۱۲ درصد بهبود یافته است. هم‌زمان، افزایش KGE و R² در کنار کاهش RMSE نشان می‌دهد که ساختار پویا علاوه بر بهبود برازش آماری، توانسته است انسجام فرآیندی رژیم جریان و بازنمایی رخداد های سیلابی را نیز به‌صورت واقع‌بینانه‌تری شبیه‌سازی کند.

بر اساس نتایج حاصل، شبیه‌سازی انجام شده در مدل ارتقا یافته نسبت به مدل کلاسیک از واقع‌گرایی فرآیندی و پایداری بالاتری در حوضه نازلوچای برخوردار است. علت عملکرد ضعیف‌تر مدل SAC-SMA کلاسیک در پیش‌بینی رواناب‌های حدی، به‌ویژه در دوره‌های اعتبارسنجی، مستقیماً به ساختار صلب و ایستای (Static) پارامترهای آن مربوط می‌شود؛ چرا که در این مدل، پارامترهای حیاتی مانند حداکثر ظرفیت آب کششی لایه‌ی بالایی (UZTWM) در طول کل دوره ثابت فرض می‌شوند، در حالی که حوضه طی دهه‌های اخیر با تغییرات اقلیمی و پوشش گیاهی روبرو بوده است. این فرض ناصحیح باعث می‌شود که مدل کلاسیک در دوره آموزش با تنظیم وزن‌ها بر روی داده‌های موجود به نتایج قابل قبولی دست یابد، اما در مواجهه با شرایط غیرایستای دوره اعتبارسنجی، توانایی ردیابی واکنش‌های غیرخطی حوضه به بارش‌های ناگهانی



یا خشکسالی‌ها را از دست بدهد. در مقابل، برتری روش ارتقایافته ریشه در انعطاف‌پذیری پارامتریک و اتصال هوشمند ساختار مدل به متغیرهای محیطی دارد. با بازتعریف پارامترهای کلیدی به صورت تابعی از شاخص سبزی‌نگی (NDVI) و ناهنجاری‌های اقلیمی، مدل پیشنهادی توانسته است جایگزین ساختار جعبه خاکستری سنتی شود و ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و نرخ نفوذ را با پویایی پوشش گیاهی و وضعیت رطوبتی اقلیم تطبیق دهد. Anderson et al (2006) و Wang et al (2023)، هر دو با اتکا به داده‌های خاک (به ترتیب SSURGO و HWSD)، نشان دادند که استخراج پارامترهای SAC-SMA از ویژگی‌های فیزیکی محیطی، پایداری فضایی و قابلیت انتقال پارامتر را در مقایسه با کالیبراسیون مستقیم بهبود می‌بخشد؛ رویکردی که از نظر مفهومی با راهبرد پژوهش حاضر هم‌راستاست. علاوه بر این، استفاده از الگوریتم PSO در یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه، از غلبه معیارهای میانگین‌محور بر رفتارهای حدی جلوگیری کرده است. این رویکرد باعث شده تا مشکل بیش‌برازش که در مدل کلاسیک مشاهده می‌شد، تا حد زیادی مرتفع گردد و مدل با بهره‌گیری از استراتژی پنجره لغزان، تکرارپذیری و دقت خود را در بازسازی پاسخ‌های هیدرولوژیک حوضه به وقایع بحرانی به طور معنی‌داری افزایش دهد.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

پژوهش حاضر با هدف گذر از پارامتردهی ثابت به رویکرد پویای مبتنی بر ویژگی‌های محیطی در مدل SAC-SMA نشان داد که مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب در حوضه‌های حساسی نظیر سیمینه‌رود و نازلوچای، فراتر از یک تخمین ریاضی ساده و مستلزم درک دینامیک رطوبتی خاک در شرایط تغییر اقلیم است. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که نایستایی حاکم بر داده‌های هیدرولوژیک در مناطق نیمه‌خشک پیرامون دریاچه ارومیه، لزوم استفاده از روش‌هایی برای غلبه بر عدم قطعیت‌های زمانی را به طور برجسته‌ای نشان می‌دهد؛ چرا که مدل‌های مفهومی با پارامترهای ایستا، علیرغم ساختار فیزیکی مناسب، در بازسازی رفتارهای غیرخطی حوضه به ویژه در دبی‌های کم و اوج سیلابی با چالش‌های جدی روبرو هستند. در این راستا، نشان داده شد که مدل‌های مفهومی-قطعی نظیر SAC-SMA، در صورت ارتقا از طریق توابع انتقال پارامتر و اتصال به شاخص‌های پوشش گیاهی، می‌توانند با دقت و صحت مناسبی برای مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرند، اما نکته حایز اهمیت در خصوص این مدل‌ها، نیاز مبرم به بهینه‌سازی چندهدفه و هدایت فرآیند واسنجی با امضاهای هیدرولوژیک است تا از مشکل هم‌ارزی پارامتری جلوگیری شود.

در واقع، انتخاب میان ساختارهای ارتقایافته مفهومی و مدل‌های جایگزین، کاملاً به نیاز و اولویت کاربر بستگی دارد. اگر درک فرآیندهای حاکم بر پدیده و تحلیل فیزیکی مخازن زیرسطحی برای کاربر اهمیت بالایی داشته باشد و یا هدف، ارزیابی اثرات متقابل تغییر اقلیم و سبزی‌نگی حوضه بر رواناب باشد، مدل‌های ارتقایافته‌ای نظیر آنچه در این پژوهش ارائه شد، به دلیل حفظ پیوستگی فیزیکی در اولویت قرار دارند. اما اگر صرفاً تخمین مقادیر عددی رواناب در خروجی بدون تحلیل تعاملات مخازن مد نظر باشد، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند گزینه‌ای سریع‌تر محسوب شوند. به عبارت دیگر، برای کاربرانی که واقع‌گرایی فرآیندی را بر تخمین‌های مدل‌های جعبه سیاه مقدم می‌شمارند، چارچوب پارامتردهی پویا توصیه می‌گردد. برای مطالعات آینده نیز پیشنهاد می‌شود جهت غلبه بر چالش نایستایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ترکیب مدل‌های مفهومی پویا با روش‌های پیشرفته پردازش سیگنال مانند تجزیه حالت متغیر و یا تحلیل‌های موجک مد نظر قرار گیرد تا نوسانات زمانی ورودی‌ها با دقت بیشتری در ساختار مدل لحاظ گردد. همچنین توسعه توابع انتقالی که بتوانند اثرات فعالیت‌های انسانی و تغییرات کاربری اراضی را به طور مستقیم در مخازن لایه پایینی مدل ساکرامنتو بازنمایی کنند، می‌تواند گامی رو به جلو در جهت ارتقای تاب‌آوری هیدرولوژیک حوضه‌های منتهی به دریاچه ارومیه باشد.

- ۱ Conceptual Models
- ۲ Sacramento Soil Moisture Accounting
- ۳ River Forecast Centers
- ۴ Flash Flood Guidance
- ۵ Inverse Distance Weighting
- ۶ Quantile Random Forest
- ۷ Hargreaves-Samani
- ۸ Moving-WindowCalibration
- ۹ Equifinality
- ۱۰ Signature-Guided Objective Function
- ۱۱ Scatter Plot
- ۱۲ Residuals
- ۱۳ Flow Duration Curve

- Abbaszadeh, P., Gholizadeh, F., Gavahi, K., & Moradkhani, H. (2025). Towards a robust hydrologic data assimilation system for hurricane-induced river flow forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29(11), 2407-2427.
- Alvarez M, Barco J (2023) Effectiveness of SAC-SMA model to simulate streamflow in the Colombian Andes: results for watersheds with different physical properties and high climate variability. *Research Square Platform LLC* (preprint)
- Alvarez, M., & Barco, J. (2025). Streamflow modeling in the Colombian Andes: insights from watersheds with diverse physical properties and climate patterns. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 13(2), 128-141.
- Anderson, R. M., Koren, V. I., & Reed, S. M. (2006). Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 103-116.
- Andrade MA, Mello CR, Beskow S (2013) Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 17(1):69-76
- Arkian F, Nicholson SE, Ziaie B (2018) Meteorological factors affecting the sudden decline in Lake Urmia's water level. *Theoretical and Applied Climatology* 131(1):641-651
- Arnold JG, et al (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development1. *Journal of the American Water Resources Association* 34:73-89
- Asadzadeh, M., & Farokhzad, P. (2025). A Comprehensive framework for integrating diverse model performance metrics in calibration. *Water Resources Research*, 61(11), e2024WR039656.
- Beven K (2001) Dalton Medal lecture: how far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth System Sciences* 5:1-12
- Beven K, Young P (2013) A guide to good practice in modeling semantics for authors and referees. *Water Resources Research* 49(8):5092-5098

- Birhanu D, Kim H, Jang C, Park S (2018) Does the complexity of evapotranspiration and hydrological models enhance robustness? Sustainability 10(8)
- Breda A (2008) Avaliação de melhorias para um sistema de previsão hidrológica horária. M.Sc. Thesis, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (In Portuguese)
- Brunner MI, Melsen LA, Wood AW, Rakovec O, Mizukami N, Knoben WJ, Clark MP (2021) Flood spatial coherence, triggers, and performance in hydrological simulations: large-sample evaluation of four streamflow-calibrated models. Hydrology and Earth System Sciences 25(1):105-119
- Buchtele J, Elias V, Tesar M, Herrmann A (1996) Runoff components simulated by rainfall-runoff models. Hydrological Sciences Journal 41(1):49-60
- Burnash RJ, Ferral RL, McGuire RA (1973) A generalized streamflow simulation system: conceptual modeling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service, and State of California, Department of Water Resources
- Burnash RJC (1995) The NWS river forecast system-catchment modeling. In: Singh VP (ed) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, Littleton, CO, 311-366
- Chouaib W, Alila Y, Caldwell PV (2021) Implications of a priori parameters on calibration in conditions of varying terrain characteristics: case study of the SAC-SMA model in Eastern United States. Hydrology 8(2):78
- Cobaner M, Citakoğlu H, Haktanir T, Kisi O (2017) Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey. Hydrology Research 48(2):480-497
- Crow WT, Ryu D (2008) A new data assimilation approach for improving hydrologic prediction using remotely-sensed soil moisture retrievals. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 5(4)
- Delju AH, Ceylan A, Piguet E, Rebetez M (2013) Observed climate variability and change in Urmia Lake basin, Iran. Theoretical and Applied Climatology 111(1-2):285-296
- Di Baldassarre G, Montanari A, Lins H, Koutsoyiannis D, Brandimarte L, Blöschl G (2010) Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. Geophysical Research Letters 37:L22402
- Evia GK, Ganasri BP, Dwarakish GS (2015) A review on hydrological models. Aquatic Procedia 4:1001-1007
- eWater Cooperative Research Centre (2010) Source scientific reference guide. eWater CRC, Canberra, Australia
- Guniganti, S. K., Regonda, S. K., & Rajagopalan, B. (2026). A hybrid hydrologic modeling framework-role of spatial resolution, calibration approaches and error modeling. Journal of Hydrology: Regional Studies, 63, 103053.
- Guniganti, S. K., Regonda, S. K., P, A., & Reed, S. (2024). Modified calibration strategies and parameter regionalization potential for streamflow estimation using a hydrological model. Hydrological Sciences Journal, 69(6), 765-781.
- Gupta A, Hantush M, Govindaraju R (2024) Evaluating a conceptual hydrological model at gauged and ungauged basins using machine learning-based limits-of-acceptability and hydrological signatures. Journal of Hydrology 131774

- Gupta HV, Sorooshian S, Yapo PO (1998) Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research* 34(4):751-763
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2):96-99
- Hassanzadeh E, Zarghami M, Hassanzadeh Y (2012) Determining the main factors in declining the Urmia Lake level by using system dynamics modelling. *Water Resources Management* 26(1):129-145
- Jahandideh-Tehrani M, Bozorg-Haddad O, Loáiciga HA (2020) Application of particle swarm optimization to water management: an introduction and overview. *Environmental Monitoring and Assessment* 192(5):281
- Knight JT, Singer DJ, Collette MD (2015) Testing of a spreading mechanism to promote diversity in multi-objective particle swarm optimization. *Optimization and Engineering* 16(2):279-302
- Koren V, Smith M, Duan Q (2003) Use of a priori parameter estimates in the derivation of spatially consistent parameter sets of rainfall-runoff models. In: *Calibration of watershed models*, American Geophysical Union, Washington DC, 239-254
- Koren V, Smith M, Wang D, Zhang Z (2000) Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters. In: *Proceedings of the 15th Conference on Hydrology*, American Meteorological Society, Long Beach, California, 103-106
- Krause P, Boyle DP, Bäse F (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5:89-97
- Lan, T., Zhang, J., Cheng, W., Wang, X., Zhang, H., Gong, X., ... & Xu, C. Y. (2026). A Robust Calibration and Evaluation Framework for Dynamic Catchment Characteristics in Hydrological Modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 30(8), 2455-2471.
- Macedo ASAAD, Lima MFDDS, Ferreira DM, Pontello MC, Gonçalves JE (2025) Applying the Sacramento model for hydrological forecasting in selected watersheds of Paraná state. XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, Brazil.
- Mostafaei S, Moosavi V, Berndtsson R (2023) Comparing the performance of deep learning, polynomial neural network and HEC-HMS models in predicting daily runoff. *Iran-Water Resources Research* 19(4):16-33 (In Persian)
- Najafi MR, Moradkhani H, Jung IW (2011) Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Processes* 25(18):2814-2826
- Ngo, T. T., Luong, T. T., Luong, H. D., & Van, T. H. (2026). A Coupled Framework of Reservoir Operation and SAC-SMA Hydrological Model for River Basin Simulation. *Civil and Environmental Engineering*, 0 (0). <https://doi.org/10.2478/cee2026-0074>
- Paredes Arquiola J, Solera Solera A, Andreu Álvarez J, Lerma Elvira N (2017) EvalHid tool for evaluation of water resources: technical manual v1.1. Water Resources Group, Universitat Politècnica de València
- Paul PK, Zhang Y, Ma N, Mishra A, Panigrahy N, Singh R (2021) Selecting hydrological models for developing countries: perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. *Journal of Hydrology* 600

- Rezaei H, Jabbari Gharabagh S (2017) Noise reduction effect on chaotic analysis of Nazluchay river flow. *Water and Soil Science* 27(3):239-250 (In Persian)
- Roe JM, Dietz C, Restrepo P, Shedd R, Horwood R, Opitz H, Welles E (2010) Introduction of NOAA's community hydrologic prediction system. In: 26th Conference on Interactive Information and Processing Systems for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, Atlanta, GA, Amer Meteor Soc B7
- Roodsari BK, Chandler DG, Kelleher C, Kroll CN (2019) A comparison of SAC-SMA and adaptive neuro-fuzzy inference system for real-time flood forecasting in small urban catchments. *Journal of Flood Risk Management* 12:e12492
- Roostaei S, Najafi Igdar A, Hejazi A (2018) Landslide hazard zonation using the fuzzy logic method in Nazlo-Chay basin. *Quantitative Geomorphological Research* 6(4):103-119 (In Persian)
- Ruggiu D, Viola F (2019) Linking climate, basin morphology and vegetation characteristics to Fu's parameter in data poor conditions. *Water* 11(11):2333
- Sabzipour B, Arsenault R, Troin M, Martel JL, Brissette F, Brunet F, Mai J (2023) Comparing a long short-term memory (LSTM) neural network with a physically-based hydrological model for streamflow forecasting over a Canadian catchment. *Journal of Hydrology* 627:130380
- Slater LJ, Arnal L, Boucher MA, Chang AYY, Moulds S, Murphy C, Zappa M (2023) Hybrid forecasting: blending climate predictions with AI models. *Hydrology and Earth System Sciences* 27(9):1865-1889
- Tang, Y., Reed, P., Wagener, T., & Van Werkhoven, K. (2007). Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 793-817.
- Tourian MJ, Elmi O, Chen Q, Devaraju B, Roohi S, Sneeuw N (2015) A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment* 156:349-360
- Trung LT, Ngo TT, Luong DH (2025) Seasonal based-global sensitivity analysis of SAC-SMA model parameters. *Journal of Climate Change Science* 35:18–24.
- Uliana EM, Almeida FTD, Souza APD, Cruz IFD, Lisboa L, Sousa Júnior MFD (2019) Application of SAC-SMA and IPH II hydrological models in the Teles Pires River basin, Brazil. *RBRH* 24:e15
- Uliana, E. M., Silva, D. D. D., Moreira, M. C., & Pereira, D. D. R. (2019). Global sensitivity analysis methods applied to hydrologic modeling with the SAC-SMA model. *Engenharia Agrícola*, 39(1), 65-74.
- Van Kempen G, Van Der Wiel K, Melsen LA (2021) The impact of hydrological model structure on the simulation of extreme runoff events. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21(3):961-976
- Van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., & Tang, Y. (2009). Sensitivity-guided reduction of parametric dimensionality for multi-objective calibration of watershed models. *Advances in Water Resources*, 32(8), 1154-1169.
- Walters, G., Bracken, C., Gillies, B., Pope, L., Pai, H., Chokshi, S., ... & Intermill, J. (2026). A comprehensive calibration framework for the northwest river forecast center. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 62(2), e70112.
- Wang B, Sun H, Guo S, Huang J, Wang Z, Bai X, Jin X (2023) Strategy for deriving Sacramento model parameters using soil properties to improve its runoff simulation performances. *Agronomy* 13(6):1473

- Wang J, Bao Z, Zhang J, Wang G, Liu C, Wu H, Xie M (2024) Time-varying hydrological simulation based on a SWD-SSC method. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 53:101808
- Wang, B., Sun, H., Guo, S., Huang, J., Wang, Z., Bai, X., ... & Jin, X. (2023). Strategy for deriving Sacramento model parameters using soil properties to improve its runoff simulation performances. *Agronomy*, 13(6), 1473.
- Wei EC, McGuinness JL (1973) Reciprocal distance squared method: a computer technique for estimating areal precipitation. Report ARS-NC-8, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, North-Central Region, Illinois
- Wijayarathne DB, Coulibaly P (2020) Identification of hydrological models for operational flood forecasting in St. John's, Newfoundland, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 27
- Wrzesien ML, Pavelsky TM (2020) Projected changes to extreme runoff and precipitation events from a downscaled simulation over the western United States. *Frontiers in Earth Science* 7:355
- Xu C (2002) Hydrologic models. Textbooks of Uppsala University, Department of Earth Sciences Hydrology
- Yang H, Yang D (2011) Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research* 47(7)
- Yilmaz KK, Gupta HV, Wagener T (2008) A process-based diagnostic approach to model evaluation: application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research* 44(9)
- Younesazadeh S, Salajegheh A, Mesbahzadeh T, Tajrishi M, Khalighi Sigaroodi S, Taheri Shahraeini H (2021) Investigating the ability of Dyna-CLUE model in analyzing and predicting future land use patterns in Simineh River basin. *Journal of Ecohydrology* 8(1):73-87 (In Persian)
- Yousefzadeh A, Zeinali B, Valizadeh Kamran K, Asghari Sar Eskinrood S (2019) The extraction of flood potential of Simineh River basin applying satellite images, topographic wetness index and morphological features. *Geography and Environmental Sustainability* 9(3):49-61 (In Persian)
- Yudianto, D., Kent, S., Sanjaya, S., Wijaya, O. T., & Tandiono, F. (2026). Comparative study of rainfall-runoff models with varying parameter complexity, case study: Waluh Catchment. *Water Science*, 40(1), 10.
- Zhang Y, Zhang Z, Reed S, Koren V (2011) An enhanced and automated approach for deriving a priori SAC-SMA parameters from the soil survey geographic database. *Computers and Geosciences* 37(2):219-231

Enhancing the SAC-SMA Model with Dynamic Parameterization and Hydrological Signatures for Reconstructing Extreme Runoff in Selected Sub-Basins of Lake Urmia (SiminehRoud and NazluChay)

Roghaye Alipour¹ | Vahid Moosavi^{2*} | Hiran Abghari³

1. Master's student in Watershed Management Engineering, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
2. Associate Professor (Corresponding Author), Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran.
3. Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.

Correspond E-mail: v.moosavi@modares.ac.ir

Accurate estimation of runoff generated by extreme precipitation events at the watershed scale is essential for the reliable design of hydraulic structures and effective flood management. Despite the widespread application of the Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC-SMA) conceptual model, the assumption of parameter stationarity and the reliance on conventional volume-based calibration criteria limit its capability to reproduce extreme flows under non-stationary climatic conditions. In this study, an integrated framework based on dynamic parameterization and multi-objective calibration was developed to enhance the process realism and predictive performance of the SAC-SMA model for extreme hydrological events. Within this framework, the key model parameters were reformulated as functions of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and climatic anomalies, while the calibration procedure was conducted using the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, hydrological signatures, and a weighted emphasis on extreme flow conditions. The performance of the proposed framework was evaluated in the Nazluchay and Siminehroud watersheds located within the Urmia Lake basin over the period 2002–2022. The results demonstrated that the enhanced model structure provided greater stability and higher accuracy than the classical SAC-SMA model in reproducing hydrographs, baseflow conditions, and peak discharges. The average improvement in model performance reached 32.04% and 31.19% for the Nazluchay and Siminehroud watersheds, respectively. Furthermore, the Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) associated with extreme flows improved by more than 101% in the Nazluchay watershed and approximately 53% in the Siminehroud watershed. Simultaneous reductions in RMSE alongside increases in KGE and R^2 indicate a substantial decrease in systematic errors and an enhanced capability of the model to represent the nonlinear hydrological behavior of the watersheds under varying climatic condition. The findings of this study indicate that dynamic parameterization of the SAC-SMA model, combined with hydrological signature-guided calibration, can substantially overcome the limitations of classical conceptual models in simulating extreme hydrological events and provide an effective framework for hydrological analysis in semi-arid watersheds affected by climate change.

Keywords: *Dynamic parameterization, Extreme flows, Urmia Lake, Moving-window calibration, Multi objective calibration*

ویراستاری نشده، غیر قابل استناد