دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

بهینه‌سازی پارامترهای مدل KINEROS2 با استفاده از الگوریتم PSO برای شبیه‌سازی رخداد سیلاب (مطالعه موردی: حوزه تمر استان گلستان)

هادی معماریان[۱]، محسن پوررضا بیلندی[۲] و زینت کومه[۳]

۱- استادیار، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند، (نویسنده مسوول: hadi_memarian@birjand.ac.ir)
۲- استادیار، دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند
۳- کارشناس ارشد GIS، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند

تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۶/۴/۱۲

چکیده

شبیه‌سازی بارش- رواناب به‌منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در حوزه‌های آبخیز نیازمند استفاده از مدل‌های مفهومی هیدرولوژیکی بهینه‌شده است. در این تحقیق از بسته بهینه‌سازی hydroPSO به‌منظور واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل بارش-رواناب KINEROS2 (K2) در حوزه آبخیز تمر در استان گلستان استفاده شد. بدین منظور از ٤ واقعه رگباری در تاریخ‌های مختلف استفاده شد. نتایج حاکی از کارایی بهتر مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیک واقعه رگباری شماره ۲ می‌باشد که در این شبیه‌سازی، ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش (NSE) به ترتیب برابر با ۰/۹۰۸٤ و ۰/۹۲ به دست آمد. شبیه‌سازی بر اساس وقایع رگباری شماره ۳ و ٤ با ضرایب NSE برابر با ۰/۸۹ و ۰/۸٦ توانست منجر به برازش به ترتیب عالی و خوب رکوردهای شبیه‌سازی‌شده بر رکوردهای مشاهداتی شود. تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای Ks_p، Ks_c، n_p، n_c، CV_p و Sat به ترتیب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی مدل K2 به شمار می‌روند. توزیع فراوانی برخی از پارامترها مانند Ks_p و n_c دارای شکل زنگوله‌ای با اوج تیزتر می‌باشد که این خود نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر تحمیل‌شده از جانب این پارامترها بر مدل است. اما برخی از پارامترها مانند In، COV، Por_p و Dist_p توزیع فراوانی یکنواختی را نشان می‌دهند. تفسیر بصری نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد که در ٦ پارامتر Ks_c، n_c، G_c، Rock، Dist_c و Smax ارزش بهینه پارامتر به‌دست‌آمده در فرآیند واسنجی منطبق بر میانه ارزش‌های نمونه‌برداری شده است که این مطلب مؤید این است که اکثر ذرات به سمت یک منطقه کوچک از فضای پاسخ هدایت شده‌اند. نمودارهای نقطه‌ای نیز نشان می‌دهند که ارزش‌های بهینه پارامترهای Ks_p، Ks_c و n_c دامنه محدودی از فضای پارامتری را که راندمان بالای مدل K2 را ایجاد می‌کند، اشغال می‌نمایند. به‌عبارت‌دیگر کارآیی مدل بیشتر تحت تأثیر اندرکنش پارامترهای Ks و n می‌باشد. تحلیل همبستگی نیز نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی NSE در درجه اول با پارامترهای Ks_p، Ks_c و n_p و سپس با پارامترهای CV_p، G_c، Por_p، Dist_p و Smax به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که بسته بهینه‌سازی hydroPSO می‌تواند با موفقیت با مدل K2 تلفیق‌شده و با سرعت و کارآیی بالایی پارامترهای مدل را واسنجی و بهینه‌سازی نماید.

واژه‌های کلیدی: hydroPSO، KINEROS2، بهینه‌سازی انبوه ذرات، بارش-رواناب، شبیه‌سازی

مقدمه

شبیه‌سازی بارش-رواناب در حوزه‌های آبخیز به‌منظور داشتن درکی بهتر از مسائل هیدرولوژیک، مدیریت منابع آب، مهندسی رودخانه و سازه‌های کنترل و ذخیره‌سازی سیلاب ضروری است (۳۸). در سال‌های اخیر کاربرد مدل‌ها به‌عنوان یک ابزار ضروری در درک فرآیندهای طبیعی حوزه آبخیز مطرح‌شده است (۵۱). شبیه‌سازی این فرآیندها نیازمند داشتن اطلاعات کافی از تغییرات مکانی این فاکتورهاست (۳). بنابراین مدل‌سازی فرآیندهای حوزه آبخیز با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به‌عنوان یک ابزار مهم در تدوین استراتژی‌های حفاظت آب و خاک در مقیاس حوزه آبخیز محسوب می‌شود (۲۷).

مدل KINEROS2 (KINematic runoff and EROSion) یا K2 در آغاز توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات‌متحده (USDA-ARS) در اواخر دهه ۶۰ میلادی به‌عنوان مدلی برای روند یابی رواناب حاصل از دامنه پایه‌گذاری شد. در KINEROS هر دامنه یا شیب به‌وسیله آبشاری از صفحات جریان بالادستی (۴۰) مدل شده و سپس این جریان به درون کانال روند می‌شود (۵۶). پس از تصحیحات و تغییرات زیادی که بر روی نسخه اولیه مدل KINEROS انجام شد نسخه بهبودیافته آن در سال ۱۹۹۰ توسط وول هایزر و همکاران (۵۷) ارائه شد.

کالین و هانتوش (۱۸) کارایی دو مدل GSSHA (Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis) و KINEROS2 را در شبیه‌سازی فرآیند رواناب و رسوب‌دهی بررسی نمودند. نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل K2 بود که دلیل آن را به فرمولاسیون بهتر الگوریتم K2 نسبت به GSSHA به‌منظور روند یابی رسوب نسبت دادند. در

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

مطالعه دیگری اسمیت و همکاران (۴۸) توانایی مدل KINEROS2 در شبیه‌سازی رواناب و رسوب بر اساس وقایع رگباری انتخاب‌شده در حوزه آبخیز Catsop در هلند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که به دلیل نقص داده‌ها، شبیه‌سازی هیدرولوژیک دقیق‌تری به‌منظور تخمین صحیح‌تر فرسایش موردنیاز است. شافنر و همکاران (۴۴) نیز با استفاده از داده‌های راداری بارش در مدل K2، سیلاب‌های ناگهانی را مدل‌سازی و پیش‌بینی نمودند. مشابه این کار توسط میچاد و سروشیان (۲۹) با استفاده از داده‌های ALERT[1] انجام شد. پیش‌بینی خطر سیلاب تحت تأثیر سناریوی تغییر کاربری اراضی نیز با استفاده از مدل KINEROS2 توسط نیکولوا و همکاران (۳۹) انجام شد. کاربرد K2 برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب نیز در یک حوزه آبخیز توسعه‌یافته در مالزی مورد ارزیابی قرار گرفت که در آن از سه رگبار با شدت و تداوم‌های مختلف برای واسنجی مدل K2 و از دو رگبار دیگر برای اعتبار سنجی مدل استفاده شد (۲۶). نتایج نشان داد که مدل K2 توانایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب داشته ولی راندمان مدل در شبیه‌سازی رسوب به علت محدودیت در داده‌های ورودی به‌ویژه نقشه خاک و کاربری اراضی پایین می‌باشد.

نام‌آور (۳۵) نیز توانایی KINEROS2 را در تخمین و شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز کامه در ایران با استفاده جعبه‌ابزار AGWA[2] در محیط ArcGIS مورد آزمون قراردادند. نتایج حاکی از شبیه‌سازی مطلوب شکل کلی هیدروگراف و دبی پیک حوزه بود ولی توانایی مدل در شبیه‌سازی رسوب به علت فقدان داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی دقیق قرار نگرفت. مشابه این نتایج نیز توسط ملایی‌فر (۳۱) در حوزه آبخیز زیارت در استان گلستان با استفاده از مدل KINEROS2 به دست آمد. البته مدل K2 در مقیاس کوچک نیز در تحقیقات مختلفی مورداستفاده، واسنجی، اعتبار سنجی و تحلیل عدم قطعیت قرارگرفته است (۳۰،۹). واسنجی دستی مدل‌های هیدرولوژیک از اوایل دهه ۶۰ میلادی مورد توجه قرار گرفت ولی به دلیل پیچیدگی و زمان‌بر بودن این نوع از واسنجی، از اواخر دهه ۶۰ واسنجی خودکار مدل‌های هیدرولوژیک مطرح شد و توسعه پیدا کرد. هر نوع واسنجی خودکار نیاز به تعریف تابع هدف، الگوریتم جستجو و یک معیار جهت اختتام الگوریتم دارد. اما در سال‌های اولیه توسعه، این الگوریتم‌ها چندان موفق نبودند (۱۴). ازیک‌طرف ارزش پارامترهای واسنجی شده واقعی نبودند و از طرف دیگر کارآیی مدل با استفاده از مجموعه دیگری از داده‌ها متفاوت می‌شد و نتایج بشدت تحت تأثیر داده‌های انتخابی، حدس اولیه برای پارامترها، تابع هدف و فرآیند جستجو قرار می‌گرفت (۵۰).

در حال حاضر چند مسئله شناخته‌شده وجود دارد که تحقیقات مرتبط با تعیین بهینه پارامترها[3] را با مشکل جدی روبرو کرده است. به‌عنوان‌مثال مشکل وجود چندین بهینه محلی[4]، بی‌نظمی عددی[5] و سطح پاسخ غیر محدب[6]، وابستگی غیرخطی پارامترها، اثرمتقابل حدود پارامترها روی یکدیگر، ایجاد نقاط زینی[7] جایی که مشتق اول به‌سمت صفر میل کند، داده‌های نامرتبط و پرت و انحراف، خودهمبستگی، ناهمسانی و واریانس متغیر در خطای باقیمانده (۵۸،۵). در این زمینه و به‌منظور حل مشکلات ذکرشده در بالا، الگوریتم‌ها و تکنیک‌های واسنجی و بهینه‌سازی پیشرفته‌ای ارائه‌شده که الگوریتم PSO[8] (۲۰) یکی از آن‌هاست. الگوریتم PSO به علت قابلیت انعطاف، اجرای آسان و کارایی بالا در سالیان اخیر موردتوجه بسیاری از محققین قرارگرفته است. این روش دارای سرعت همگرایی بالا و درنتیجه هزینه محاسباتی مناسب می‌باشد (۴۱).

مهم‌ترین نرم‌افزاری که تاکنون توانسته است از الگوریتم PSO جهت بهینه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کند بسته نرم‌افزاری R است که با کمک ابزار hydroPSO که یک بسته مستقل است می‌تواند آنالیز حساسیت، واسنجی مدل‌ها و تحلیل نتایج را انجام دهد. این بسته قابلیت اتصال به مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی را دارد. تاکنون اتصال بسته hydroPSO با مدل‌های SWAT[9] (۵۷) و ModFlow (۱) انجام‌شده است. کاربردهای الگوریتم PSO در منابع آب نیز بسیار زیاد و چشمگیر می‌باشد و در سال‌های اخیر استفاده از این الگوریتم در تخمین پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی افزایش‌یافته است (۱۶،۱۱،۴). عبدالعزیز و زامبرانوبیگارینی (۱) قابلیت و تطبیق‌پذیری hydroPSO جهت بهینه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی در نرم‌افزار R در TU Bergakademie Freiberg آلمان در حوزه آبخیز Geneiss را مورد مطالعه قراردادند. نتایج نشان داد که علاوه بر مفید بودن روش PSO در بهینه‌سازی مدل‌سازی با MODFLOW، استفاده از بسته hydroPSO می‌تواند با کاهش تعداد تکرارهای موردنیاز برای رسیدن به مقدار بهینه به دلیل استفاده از سیستم پردازش موازی، زمان محاسبه مدل‌سازی را تا یک‌هشتم کل زمان موردنیاز کاهش دهد. زامبرانوبیگارینی و رژاس (۵۸) به‌منظور کالیبراسیون مدل‌های هیدرولوژیکی از بسته hydroPSO به‌عنوان یک بسته مجزا در نرم‌افزار R استفاده کردند و hydroPSO را با الگوریتم‌های استاندارد (SCE_UA, DE, DREAM, SPSO-2011, and GML) با استفاده از یک‌سری توابع خاص مقایسه نمودند. همچنین به‌منظور مقایسه بهتر، از این بسته برای واسنجی دو مدل مختلف در دو حوزه آبخیز متفاوت استفاده نمودند: الف) مدل هیدرولوژیکی برای حوزه رودخانه اگا[10] در اسپانیا ب) مدل جریان آب زیرزمینی در حوزه آبخیز پامپا[11] در شیلی. نتایج نشان داد که hydroPSO روشی مناسب و کارآمد در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی متداول می‌باشد.

1- Automated Local Evaluation in Real-Time
2- Automated Geospatial Watershed Assessment
3- Optimum parameter set
4- Local optima
5- Numerical granularity
6- Non-convex response surface
7- Saddle points
8- Particle Swarm Optimization
9- Soil and Water Assessment Tools
10- Ega River Basin
11- Pampa

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

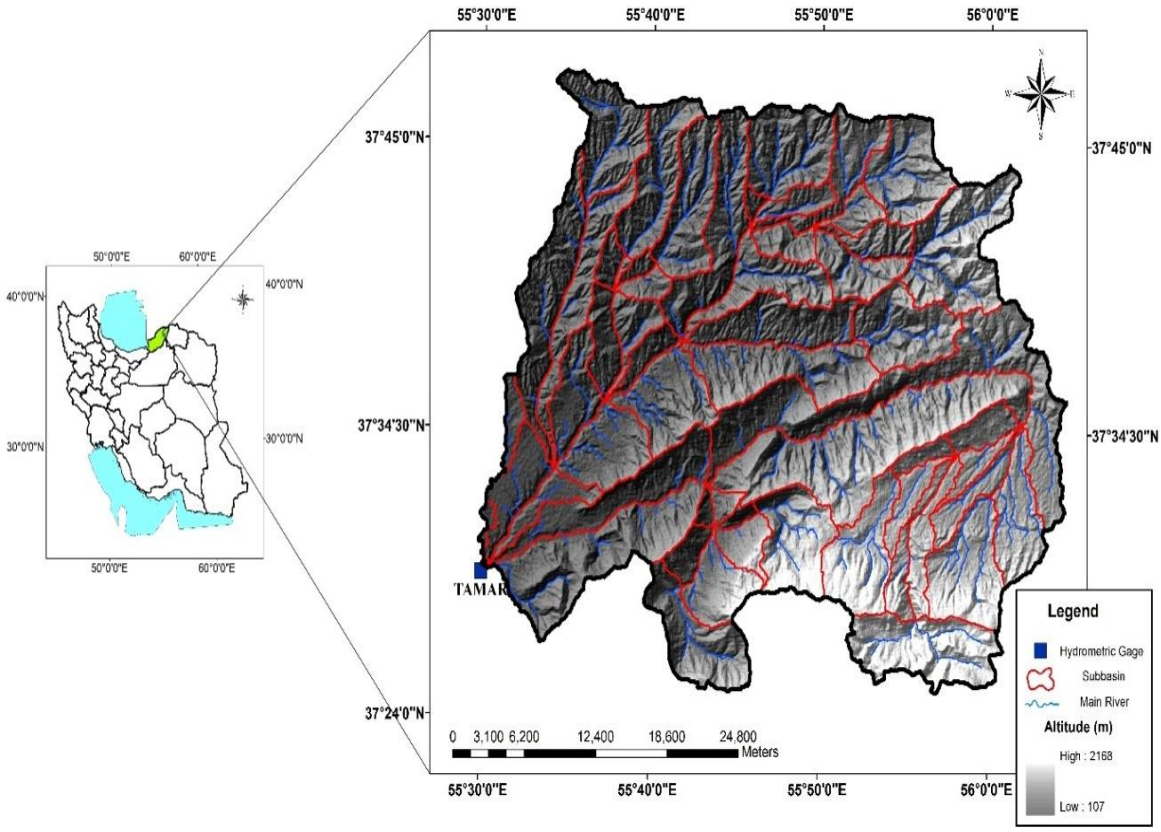
همچنین این بسته نرم‌افزاری مقیاس‌پذیر می‌باشد؛ یعنی کارایی مدل با بالا رفتن ابعاد مسئله حفظ می‌شود و در مسائل مختلف قابل انطباق می‌باشد.

با توجه به موارد گفته‌شده در بالا، هدف از این مطالعه تلفیق مدل هیدرولوژیکی K2 با بسته بهینه‌سازی hydroPSO جهت واسنجی پارامترهای مدل K2 در حوزه آبخیز تمر در استان گلستان می‌باشد تا بتوان بر مشکلات ناشی از واسنجی با الگوریتم‌های معمول فائق آمد. در این مطالعه مدل‌سازی هیدرولوژیک حوزه بر مبنای وقایع رگباری جداگانه خواهد بود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

حوزه آبخیز تمر یکی از زیرحوزه‌های گرگان رود است که در استان گلستان واقع‌شده است. مساحت حوزه مورد بررسی ۱۵۲۵/۳ کیلومترمربع و ازنظر جغرافیایی در محدوده ′۲۴ °۳۷ تا ′۴۹ °۳۷ عرض شمالی و ′۲۹ °۵۵ تا ′۴ °۵۶ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). مرتفع‌ترین نقطه در منطقه خوش ییلاق در جنوب حوزه با ارتفاع ۲۱۶۸ متر و پست‌ترین نقطه محل سد گلستان ۲ با ارتفاع ۱۰۷ متر از سطح دریا است. متوسط ارتفاع این حوزه ۷۵۴/۳۵ متر می‌باشد. در حوزه آبخیز تمر تعداد محدودی ایستگاه تبخیرسنجی و باران‌سنجی وجود دارد. بیشتر این ایستگاه‌ها دارای طول آماربرداری کوتاه‌مدت می‌باشند (حداکثر ۱۵ سال برای بارش و ۸ سال برای دما)، به‌جز ایستگاه تمر که دارای آمار ۴۰ ساله شامل داده‌های بارش و دمای روزانه می‌باشد. اقلیم این حوزه نیمه مرطوب بوده و دامنه بارندگی آن بین ۴۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است (۱۰).



شکل ۱- موقعیت حوزه آبخیز مطالعاتی تمر در استان گلستان و کشور

Figure 1. Geographic location of study area Tamar Watershed, Golestan, Iran

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

داده‌های مورداستفاده

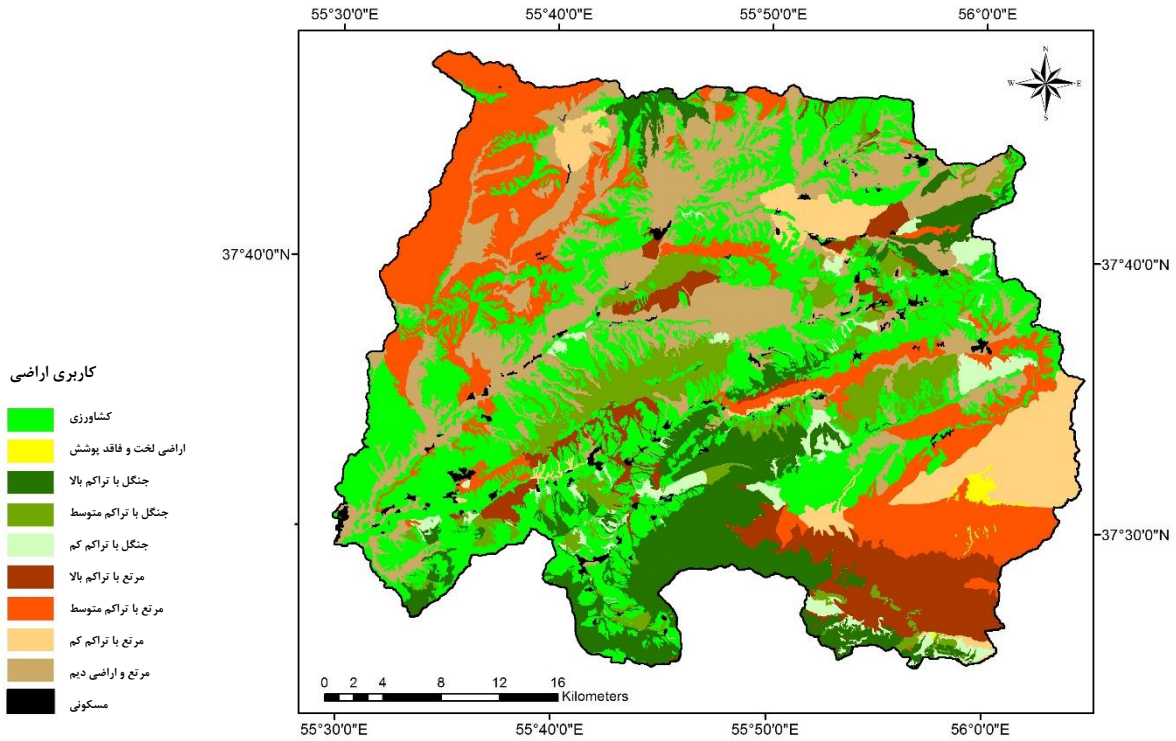
مجموعه داده‌های هیدرولوژیکی دبی آب و بار رسوب، داده‌های بارش در ۴ رگبار مختلف شامل: سپتامبر ۲۰۰۴، می ۲۰۰۵، اکتبر ۲۰۰۵ و آگوست ۲۰۰۵، از ایستگاه باران‌سنجی تمر در حوزه موردمطالعه جمع‌آوری گردید (جدول ۱). نقشه کاربری اراضی بر اساس مشاهدات میدانی و تفسیر بصری تصاویر ماهواره‌ای SPOT بکار گرفته‌شده در نرم‌افزار گوگل ارث تهیه شد (شکل ۲). در تهیه نقشه سری‌های خاک از اطلاعات موجود و نقشه‌های رقومی فائو در قالب نرم‌افزار Harmonized World Soil Database (HWSD) (۳۴) کمک گرفته شد. مدل رقومی ارتفاع نیز از مجموعه داده‌های ماهواره Aster با توان تفکیک ۳۰ متر استخراج شد (منبع تهیه داده: http://gdex.cr.usgs.gov/gdex).

جدول ۱- ویژگی‌های رگبارهای انتخاب‌شده جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیک

Table 1. Properties of selected storm events

شماره رگبار	تاریخ وقوع	زمان تداوم (h)	عمق بارش (mm)	حجم بارش (MCM)	I_{60}_max (mm/h)
۱	19 SEP 2004	۱۷	۵۰/۲۸	۷۶/۷	۱۳/۱۳
۲	06 MAY 2005	۳۴	۵۷/۴۳	۸۷/۶	۸/۱۴
۳	08 OCT 2005	۱۴	۴۱/۱۷	۶۲/۸	۷/۶۷
۴	09 AUG 2005	۲۰	۵۹/۶	۹۰/۹	۹/۹۳

۱۶۰_ max: حداکثر شدت بارش ۶۰ دقیقه‌ای



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز تمر

Figure 2. Land use map of Tamar watershed

توصیف مدل KINEROS

Kineros یک مدل فیزیکی در بررسی میزان فرسایش و روندیابی رواناب سطحی است. این مدل، در هیدرولوژی سطحی به منظور پیش‌بینی و برآورد دبی رواناب سطحی و بار رسوبات حاصل از فرسایش در حوزه‌های آبریز مفید و مناسب می‌باشد. در این مدل حرکت آب با استفاده از تقریب موج سینماتیکی معادلات سنت و نانت[1] بررسی می‌شود و رواناب حاصله نیز بر اساس معادله هورتن[2] محاسبه می‌باشد. براساس این معادله رواناب زمانی رخ می‌دهد که بارندگی بیشتر از سرعت نفوذ باشد. معادلات نفوذ مورد بررسی در این مدل نیز معادلات مدل نفوذ اسمیت و پارلانژ (۴۹) می‌باشد (۲۷). در مدل Kineros حوزه آبریز به زیر حوزه‌هایی تقسیم می‌شود و هرکدام از این زیر حوزه‌ها به سطوح جریان سطحی متشابه و قطعات کانال شبیه‌سازی می‌شوند. سطوح جریان سطحی به

1- Saint-Venant equations

2- Horton

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

شکل مستطیل و به صورت سطوح صاف و منظم با پارامترهای ورودی یکنواخت انتخاب می‌شوند. پارامترهای مدل ممکن است از جزئی به جزئی تغییر کنند، اما در هر جزء خصوصیات یکنواخت فرض می‌شود. این خصوصیات شامل: مشخصات هیدرولیکی خاک، نوع بارندگی، توپوگرافی، شکل ژئومتریک زمین و... می‌باشند. در این مدل با انتخاب ارتفاع بیشینه و کمینه منطقه، سطوح جریان سطحی با توجه به شیب عمومی زمین ایجاد می‌شوند. کانال‌ها نیز با شیب مشخص به سمت خروجی حوزه گسترده شده‌اند. مقطع این کانال‌ها به شکل ذوزنقه‌ای در نظر گرفته می‌شود (۲۷).

Kineros2 (K2)، نسخه بروزرسانی شده مدل Kineros است (۵۷) که تحت یک رابط کاربر گرافیکی (AGWA) در محیط نرم‌افزار ArcGIS اجرا می‌گردد. K2 به‌عنوان یک مدل توزیعی و پویا، مبتنی بر رخدادهای بارشی، به پیش‌بینی رواناب سطحی، تلفات فرسایش، میزان نفوذ و عمق نگهداشت حوزه آبخیز پرداخته و هر حوزه آبخیز را به‌وسیله مجموعه‌ای از صفحات حاوی جریان بالادستی، جریان کانالی و چالاب‌ها مدل‌سازی می‌نماید. در این مدل، صفحات حاوی جریان بالادستی خود می‌تواند به بخش‌هایی با شیب‌ها، ناهمواری‌ها، خاک‌ها و کاربری‌های متفاوت تقسیم‌بندی شود (۴۵). در مدل مفهومی جریان بالادستی، تغییرات کوچک‌مقیاس نفوذ پارامتری شده و میکرو توپوگرافی نیز در شبیه‌سازی لحاظ می‌گردد (۲۷). مدل‌سازی در بخش شهری مبتنی بر محاسبه رواناب از بخش‌های نفوذپذیر و غیرقابل نفوذ است. در مدل K2، نفوذ پویا و در ارتباط با بارش و رواناب است. مدل مفهومی نفوذ قادر به درج دولایه در پروفیل خاک است و توزیع مجدد رطوبت خاک را در زمان توقف رگبار انجام می‌دهد (۴۵). در این مدل، جریان سطحی به‌عنوان یک جریان یک‌بعدی لحاظ شده، که جریان سطحی بر اساس معادله ۱ بررسی می‌شود:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \qquad \text{رابطه (۱)}$$

که در این معادله Q برابر دبی جریان در واحد عرض، h برابر ارتفاع رواناب سطحی و q برابر اختلاف شدت بارندگی و نفوذپذیری می‌باشد (۲۶).

در این مطالعه از روش حداقل محلی (۲۴) برای جداسازی جریان پایه استفاده شد و درنهایت ۵۸ پلان با سطح متوسط ۲۷/۶۵ کیلومترمربع و ۲۲ کانال با میانگین طول ۱۰ کیلومتر در محیط AGWA جهت مدل‌سازی در سطح حوزه آبخیز تمر جدا شد.

الگوریتم بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی مورداستفاده در این تحقیق به‌منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای مدل K2، الگوریتم PSO می‌باشد. الگویتم در ابتدا با یک مجموعه[1] جواب‌های تصادفی شروع می‌شود. هر عضو این مجموعه، ذره[2] نامیده می‌شود. هدایت ذرات به این صورت انجام می‌گیرد که تمامی ذرات بهترین موقعیتی را که در طی فرآیند جستجو کسب کرده‌اند در حافظه خود ذخیره می‌کنند. از طرفی بهترین موقعیتی که تا هر مرحله توسط تمامی ذرات به‌دست‌آمده است نیز حفظ می‌شود (۲۰،۴۲). در این الگوریتم تمامی ذرات بر اساس یک میانگین وزنی با مؤلفه‌های تصادفی به سمت جواب‌های بهتر حرکت می‌کنند تا درنهایت به نقطه واحدی همگرا شوند. در الگوریتم مورداستفاده در این مطالعه δ_{norm}^{t} به‌عنوان شاخصی برای تعیین میزان همگرایی الگوریتم استفاده می‌شود (۱).

به‌منظور اجرای الگوریتم بهینه‌سازی PSO از بسته hydroPSO در محیط نرم‌افزاری R استفاده شد. بسته hydroPSO دربردارنده توابع کلیدی زیر است (۵۸):

تابع lhoat: این تابع آنالیز حساسیت را بر اساس تکنیک LH-OAT[3] اجرا می‌کند (۵۲). در این تکنیک مؤثرترین پارامتر بر روی خروجی مدل رتبه ۱ و کم تاثیرترین پارامتر رتبه‌ای برابر با تعداد پارامترها (D) را دارد.

تابع hydromod: نقش این تابع اتصال مدل با بسته hydroPSO و کنترل کردن اجرای مدل است. این تابع ابتدا مجموعه‌ای از ارزش‌های پارامترها را که به‌وسیله کاربر در یک فایل بنام Paramfiles.txt نوشته‌شده می‌خواند. سپس تابع hydromod فایل اجرایی مدل را فراخوانی کرده تا بتواند خروجی‌ها را تولید کند. این خروجی‌ها از طریق تابع out.FUN خوانده می‌شوند. درنهایت خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده با خروجی‌های واقعی (مشاهداتی) از طریق تابع gof.FUN (تابع نیکویی برازش) مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

در این مطالعه تابع هدف مورد استفاده Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) می‌باشد.

تابع hydroPSO: که موتور اصلی واسنجی مدل هیدرولوژیک است. در تکرار اول الگوریتم پارامترها در دامنه‌ای ممکن که توسط کاربر در فایل ParamRanges.txt تعریف‌شده است نمونه‌برداری می‌شوند. سپس hydromod فراخوانی می‌شود تا نیکویی برازش را برای هر ذره محاسبه کرده و سرعت و مکان هر ذره بر اساس تنظیمات تعریف‌شده توسط کاربر بهبود و تکامل‌یافته تا معیار نهایی برازش و بهینه‌سازی برآورده شود. در نهایت hydroPSO مجموعه پارامترهای بهینه، پارامترهای نمونه‌برداری شده، نیکویی برازش منطبق بر پارامترها، سرعت ذرات و سنجه‌های همگرایی را جمع‌آوری و ذخیره می‌کند.

تابع plot_results: که پس پردازش نتایج را انجام داده و نمودارهایی باکیفیت بالا در اختیار کاربر جهت ارزیابی نتایج واسنجی قرار می‌دهد.

1- Swarm 2- Particle 3- Latin Hypercube One factor At a Time

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

تابع verification: به‌منظور اعتبارسنجی مجموعه پارامترهای تعریف‌شده توسط کاربر با استفاده از محاسبه نیکویی برازش.

ارزیابی مدل

معیارهای آماری مورداستفاده در این مطالعه، اریبی یا انحراف مدل (MB)، ضریب همبستگی اصلاح‌شده (r_{mod}) و ضریب کارایی Nash-Sutlcliffe (NSE) می‌باشند (۳۶،۴۳). معادلات زیر توصیف‌کننده این معیارها به‌صورت عددی است:

$$MB = [\sum_{i=1}^{n}(Q_{si} - Q_{oi}) / \sum_{i=1}^{n} Q_{oi}] \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$r_{mod} = \left[\frac{(\min(\sigma_O,\sigma_S)}{\max(\sigma_O,\sigma_S)} * r\right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_{o_i} - \bar{Q}_O)^2}\right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این معادلات، Q_{si} و Q_{oi} به ترتیب دبی‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی آب در گام زمانی i، $\overline{Q_o}$ متوسط دبی مشاهده‌ای در دوره شبیه‌سازی، σ_o و σ_s به ترتیب میزان انحراف معیار دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده، r ضریب همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی و n تعداد مشاهدات در دوره شبیه‌سازی است. ارزش ایده آل برای سنجه MB صفر است در حالیکه برای دیگر سنجه‌ها ۱ می‌باشد. برای ارزیابی صحت اندازه، شکل و مقدار هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده، از سنجه جمعی (AM) به شرح زیر استفاده شد:

$$AM = \frac{r_{mod} + NS + (1 + |MB|)}{3} \quad \text{رابطه (۵)}$$

میزان ایده آل این سنجه نیز ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده تطابق ۱۰۰٪ داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده است (۲۷). جدول (۲) نشان‌دهنده طبقات مختلف کار آیی مدل بر اساس سنجه AM می‌باشد.

جدول ۲- طبقات مختلف کار آیی مدل بر اساس سنجه AM (۲۷،۴۳)

Table 2. Model performance categories based on the AM measure

Aggregated Measure (AM)	نیکویی برازش
>۰/۸۵	عالی
۰/۷۰-۰/۸۵	خیلی خوب
۰/۵۵-۰/۷۰	خوب
۰/۴۰-۰/۵۵	ضعیف
<۰/۴۰	خیلی ضعیف

پارامترهای مدل در فرآیند بهینه‌سازی

هدف اصلی این تحقیق واسنجی پارامترهای مدل K2 با کمک ابزار hydroPSO می‌باشد که در محیط R توسعه داده‌شده و تاکنون نیز موارد معدودی از استفاده از این ابزار در مدل‌سازی‌های مرتبط با منابع آب گزارش‌شده است. به دلیل سرعت بالاتر اجرای الگوریتم PSO در محیط R نسبت به محیط نرم‌افزاری MATLAB و همچنین دسترسی و استفاده آسان از قابلیت پردازش موازی آن از hydroPSO به‌عنوان رابط بهینه‌ساز پارامترهای مدل K2 استفاده گردید.

تعداد ۱۶ پارامتر لیست شده در جدول ۳ به‌عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر هیدروگراف سیلاب به مدل معرفی و وارد شدند. پارامترهای معمول در واسنجی که در کد اصلی نرم‌افزار نیز از آن‌ها استفاده می‌شود شامل Ks، n، CV، G و In می‌باشند. در این مطالعه با تغییر برخی کدهای مدل K2 در زبان فرترن تعداد پارامترهای قابل واسنجی به ۱۶ پارامتر (جدول ۳) افزایش یافت. بدین ترتیب پاسخ حوزه به تغییر مقادیر این پارامترها که برای کانال و دامنه تفکیک‌شده‌اند به‌خوبی قابل ارزیابی می‌باشد. همان‌طور که از جدول مشخص می‌باشد روش تغییر مقدار برای هر پارامتر با توجه به نیمه توزیعی بودن مدل شبیه‌سازی از طریق "تغییر نسبی" در مقدار اولیه با مقدار پیش‌فرض و با استفاده از روش ضرب‌کننده یا Multiplier انجام شد.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

جدول ۳- پارامترهای مدل K2 جهت ورود در فرآیند بهینه‌سازی توسط hydroPSO

Table 3. K2 optimization parameters used by hydroPSO

شماره	نشانه	پارامتر	دامنه عددی توصیه‌شده در منابع	منبع	ارزش اولیه پارامتر	دامنه عددی ضرب کننده مورداستفاده در این مطالعه	
						دامنه پایینی	دامنه بالایی
۱	Ks_p	Saturated hydraulic conductivity (mm.h^{-1})_planes هدایت هیدرولیکی اشباع–دامنه	۰/۶ – ۲۱۰ ۰/۲۲ – ۲۶۶/۳ ۰/۳ – ۷۳/۳ ۱۷/۲ – ۴۸/۳ ۰ – ۱۰ ۱/۴۶ – ۶۳/۲۷	Woolhiser et al. (1990) Meyer et al. (1997) Guber et al. (2009) Guber et al. (2011) Al-Qurashi et al. (2008) Memarian et al. (2012)	۵ – ۲۴/۲۱	۰/۲	۲
۲	Ks_c	Saturated hydraulic conductivity (mm.h^{-1})_channels هدایت هیدرولیکی اشباع–کانال			۲۱۰	۰/۲	۲
۳	n_p	Manning's roughness coefficient_planes ضریب زبری مانینگ–دامنه	۰/۱ – ۰/۶۳ ۰/۰۵۳– ۰/۸ ۰/۰۱ – ۰/۱ ۰/۰۹– ۰/۶۴	Woolhiser et al. (1990) Al-Qurashi et al. (2008) Memarian et al. (2012)	۰/۱۰۲ – ۰/۱۴۹	۰/۳	۴
۴	n_c	Manning's roughness coefficient_channels ضریب زبری مانینگ–کانال			۰/۰۳۵	۰/۵	۵
۵	CV_p	Coefficient of variations of Ks_planes ضریب تغییرات Ks–دامنه	۰/۱ – ۲ ۰/۰۲ – ۲۷/۳ ۱/۶– ۷/۶ ۰/۵۷ – ۰/۹۵	http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/ Guber et al. (2011) Memarian et al. (2012) Wagener and Franks (2005)	۰/۷۵ – ۱/۴	۰	۲
۶	G_p	Mean capillary drive (mm)_ planes	۵۰ –۴۱۰ ۴۶ – ۴۰۷	http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/ Woolhiser et al. (1990) Guber et al. (2009) Guber et al. (2011) Memarian et al. (2012)	– ۲۴۰/۸۷ ۱۲۰/۶۷	۰/۳	۳
۷	G_c	Mean capillary drive (mm)_ channels میانگین نیروی کاپیلاری–کانال	۱ – ۲۶۳ ۱۰۰ – ۳۰۶ ۱ –۱۰		۱۰۱	۰/۳	۳
۸	In	Interception depth (mm) عمق گیرش	۰/۵ – ۴/۱ ۴/۷۷ – ۱۰۱ /۳	Woolhiser et al. (1990) Wagener and Franks (2005)	۰/۵ – ۱/۲۷	۰/۱	۲
۹	Cov	Percent of surface covered by intercepting cover درصد پوشش گیرنده	۱ ۳۴/۵ – ۴۶/۵ ۵ – ۹۰	Kasmaei et al. (2015) Vatseva et al. (2008) Koster (2013)	۰/۲۲۹ – ۰/۶۶	۰/۵	۲
۱۰	Rock	Volumetric rock fraction ضریب حجمی سنگ و سنگریزه	۰/۵۷ – ۰/۶۲ ۰/۱ ۰/۰۱۱ – ۰/۱۹۳	Wagener and Franks (2005) Kennedy et al. (2012) Koster (2013)	۰ – ۰/۳۲	۰/۵	۲
۱۱	Por_p	Porosity_planes تخلخل–دامنه	۰/۴۴ – ۰/۴۶ ۰/۲۵ – ۰/۳۵ ۰/۴۲ – ۰/۵۶	Wagener and Franks (2005) Kasmaei et al. (2015) Koster (2013)	۰/۴۵۶ – ۰/۴۶۸	۰/۵	۲
۱۲	Por_c	Porosity_channels تخلخل–کانال			۰/۴۴	۰/۵	۲
۱۳	Dist_p	Pore size distribution index_planes شاخص توزیع اندازه ذرات–دامنه	۰/۱۵ – ۰/۶۹۴ ۰/۱۴ – ۱/۴۳ ۰/۲۵ – ۰/۵۴ ۰/۱۶ – ۰/۴۰	Meyer et al. (1997) Wagener and Franks (2005) Koster (2013)	۰/۲۶ – ۰/۳۴	۰/۵	۲
۱۴	Dist_c	Pore size distribution index_channels شاخص توزیع اندازه ذرات–دامنه			۰/۵۴۵	۰/۵	۲
۱۵	Smax	Maximum soil saturation حداکثر اشباع خاک	۰ –۱۰ ۰/۸۵ ۰/۴ – ۰/۵۸	Al-Qurashi et al. (2008) Memarian et al. (2012) Koster (2013)	۰/۸۸ – ۰/۹۲	۰/۱	۱
۱۶	Sat	Initial soil saturation اشباع اولیه خاک	۰ – ۰/۵ ۰/۴ ۰/۱۹ – ۰/۳۲	Al-Qurashi et al. (2008) Wagener and Franks (2005) Koster (2013)	۰/۲	۰/۵	۵

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

نتایج و بحث

یکی از معمول‌ترین روش‌های ارزیابی کارایی یک مدل ترسیم ارزش‌های شبیه‌سازی‌شده در برابر ارزش‌های واقعی یک متغیر بر روی نمودار است. شکل (۳) دبی آب (Qw) مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده حاصل از تلفیق K2 با بسته hydroPSO را همراه با هیتوگراف بارش (PCP) بر روی یک نمودار نشان می‌دهد. در این مطالعه غیر از NSE به‌عنوان تابع هدف، از ضریب تبیین (R^2) نیز برای مقایسه تطبیق بین دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده استفاده شد. ضریب تبیین درجه همبستگی خطی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد که بین صفر تا یک بوده و ضریب R^2 بالاتر از ۰/۵ عموماً نشان‌دهنده مدل‌سازی قابل قبولی است (۳۲،۳۳). با توجه به سنجه R^2، نتایج (شکل ۳) نشان‌دهنده تطبیق بهتر دبی آب شبیه‌سازی‌شده با دبی آب مشاهداتی برای واقعه شماره ۳ می‌باشد.

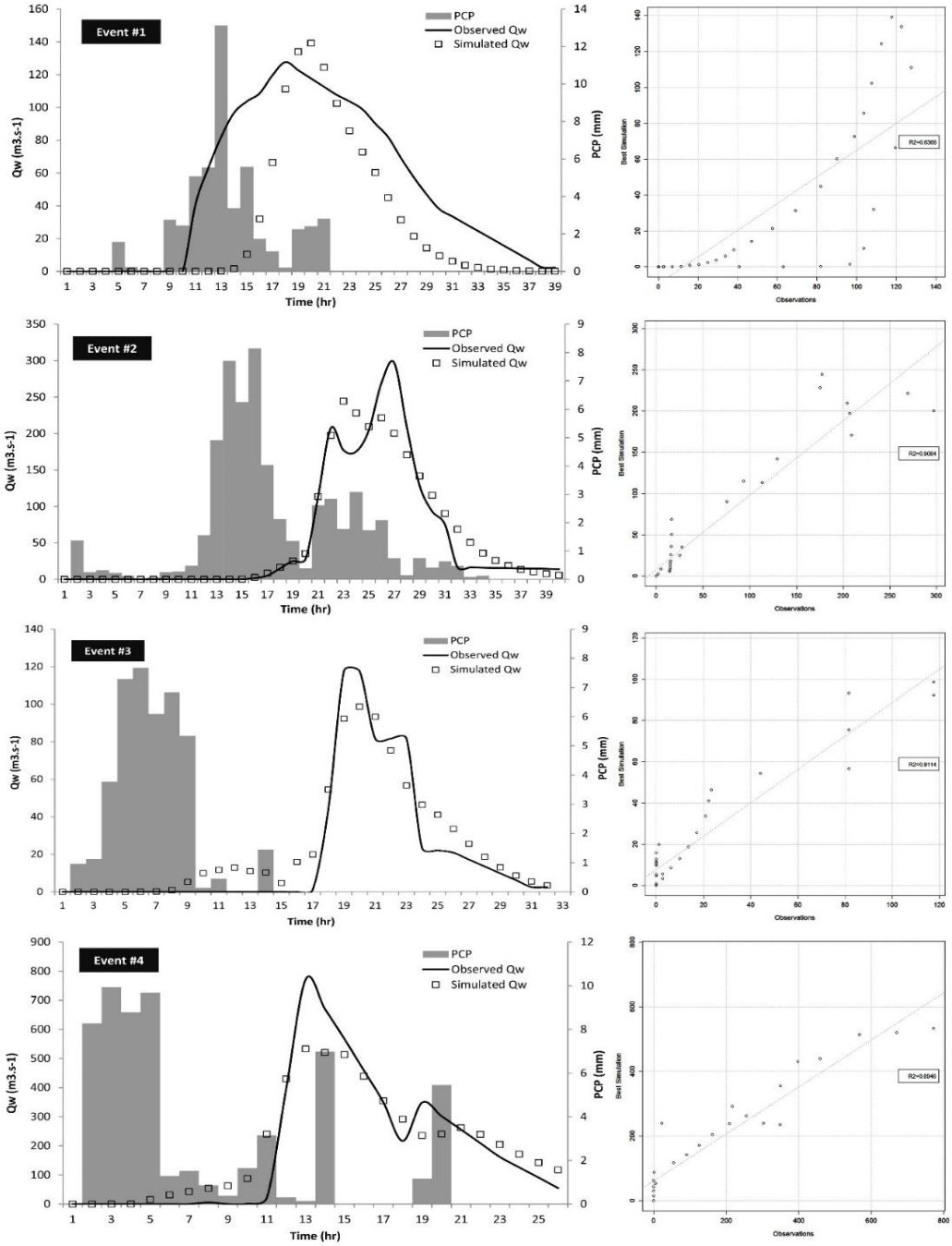
ضریب تبیین حاصل از مقایسه دبی شبیه‌سازی‌شده با اندازه‌گیری شده این واقعه برابر با ۰/۹۱۱۴ می‌باشد و نشان‌دهنده این است که بخش زیادی از واریانس متغیر پاسخ یعنی دبی آب به‌وسیله مدل توصیف و توجیه می‌شود. پس‌از این واقعه، بهترین ضریب تبیین (R^2 = ۰/۹۰۸۴) برای واقعه شماره ۲ به دست آمد. واقعه شماره ۴ با ضریب تبیین ۰/۸۹۴۶ بعد از وقایع شماره ۲ و ۳ قرار می‌گیرد. اما ضعیف‌ترین نتیجه شبیه‌سازی مدل بهینه‌سازی hydroPSO برای واقعه شماره ۱ با ضریب تبیین ۰/۶۳۶۸ ثبت شد. با توجه به بالاتر بودن R^2 در همه وقایع شبیه‌سازی‌شده از آستانه ۰/۵، نتیجه شبیه‌سازی hydroPSO را برای کلیه وقایع از منظر هم خطی (collinearity) می‌توان قابل‌قبول دانست (۳۲،۳۳). اما همان‌طور که در شکل شماره ۳ دیده می‌شود دبی پیک محاسبه‌شده نسبت به دبی پیک شبیه‌سازی‌شده برای وقایع مختلف دارای مقداری اختلاف است. این تفاوت در واقعه اول ۹٪ است که بدین معنی است که پیک محاسبه‌شده ۹٪ نسبت به پیک واقعی بیشتر است. اما در واقعه دوم، سوم و چهارم پیک شبیه‌سازی‌شده به ترتیب ۱۷٪، ۱۶٪ و ۳۰٪ کمتر از پیک هیدروگراف مشاهده‌ای است. بنابراین بیشترین اختلاف در وقایع دوم و چهارم و کمترین اختلاف در واقعه اول مشاهده می‌شود. در مجموع می‌توان گفت که مدل جهت تطبیق بیشتر هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده با هیدروگراف مشاهده‌ای تمایل بیشتری به تخمین کمتر دبی پیک دارد.

همان‌طور که در جدول ۴ نشان داده‌شده است، وقایع شماره ۲ و ۴ با NSE برابر با ۰/۹۲ و ۰/۸۵ بهترین نیکویی برازش دبی‌های شبیه‌سازی‌شده با دبی‌های مشاهداتی را دارا می‌باشند. واقعه شماره ۳ با NSE برابر با ۰/۸۳ در ردیف بعدی و درحالی‌که در واقعه شماره ۱ با NSE برابر با ۰/۳۹ ضعیف‌ترین نیکویی برازش در میان وقایع شبیه‌سازی‌شده به‌دست‌آمده است. اما به‌طورکلی با توجه به سنجه AM می‌توان گفت که بهترین نیکویی برازش برای واقعه شماره ۲ (AM = ۰/۹۲) به‌دست‌آمده که پس‌ازآن به ترتیب وقایع شماره ۴، ۳ و ۱ (به ترتیب با AM برابر با ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۵۶) قرار می‌گیرند. با توجه به سنجه MB، مدل بهینه‌سازی hydroPSO برای شبیه‌سازی سیلاب در مورد وقایع شماره ۲ تا ۴ دچار تخمین بیش‌ازحد (overestimation) شده اما در مورد واقعه شماره ۱ مجبور به تخمین کمتر از حد (underestimation) سیلاب شده است. برخی انحراف‌ها نیز در شاخه بالارونده و پایین‌رونده هیدروگراف نسبت به جریان واقعی دیده می‌شود که در مورد رگبار شماره ۱ این موضوع شدیدتر است. این مشکل می‌تواند ناشی از استفاده از یک ایستگاه و اعمال یک رگبار ایزوله بر کل سطح حوزه باشد (۱۵،۲۶،۲۷). تحلیل حساسیت پارامترهای مدل K2 بروش بررسی تکامل همگرایی ارزش‌های پارامترها، بهینه عمومی و شعاع انبوه ذرات نرمال شده (NSR) انجام شد. شکل (۴) نشان‌دهنده تکامل ۱۶ پارامتر مورداستفاده در فرآیند واسنجی واقعه شماره ۲ در طی تکرارهای مختلف است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است پارامترهای Ks_p، Ks_c، n_p، n_c، CV_p و Sat به ترتیب مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی می‌باشند که این یافته در تحقیقات مختلف دیگری نیز مانند نیرینگ و همکاران (۳۷)، کانفیلد و گودریچ (۷)، مارتینزکارراس و همکاران (۲۳)، القریشی و همکاران (۲) و معماریان و همکاران (۲۶) به‌دست‌آمده و پشتیبانی می‌شود. شکل (۵-الف) نشان‌دهنده هیستوگرام فراوانی ۱۶ پارامتر واردشده در فرآیند واسنجی است. شکل تخت و مسطح هیستوگرام نشان‌دهنده عدم قطعیت محتمل در ارزش‌های بهینه پارامترهاست (۳۳). در این مطالعه غیر از پارامترهای In، COV، Por_p و Dist_p در سایر پارامترها توزیع فراوانی ارزش‌ها در اطراف مقدار بهینه شکل زنگوله‌ای داشته و نشان‌دهنده تعریف و شناسایی نسبتاً مناسب پارامتر و ارزش بهینه آن است. تابع توزیع تجمعی تجربی (ECDF)[1] هر پارامتر نیز در شکل (۵-ب) نمایش داده‌شده است. شکل‌های (۵-الف) و (۵-ب) نشان می‌دهند که توزیع پارامترهای n_p، n_c، CV_p، G_c، Rock، Por_c، Dist_c، Smax و Sat از الگوی نرمال و نزدیک نرمال تبعیت می‌کند درحالی‌که پارامترهای Ks_p و Ks_c توزیع چوله داری را به سمت ارزش‌های کمتر در فرآیند واسنجی K2 نشان می‌دهند. توزیع فراوانی و هیستوگرام منطبق بر این توزیع در برخی از پارامترها مانند Ks_p و n_c کاملاً زنگوله‌ای و باریک است که نشان‌دهنده عدم قطعیت پایین آن‌ها در فرآیند واسنجی است. اما برخی از پارامترها مانند In، COV، Por_p و Dist_p توزیع یکنواختی را در فرآیند نمونه‌برداری و واسنجی

1- Empirical Cumulative Distribution Function

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

نشان می‌دهند که این می‌تواند معرف دو نوع خطا باشد که اولی از خطاهای ساختاری موجود در داده‌های ورودی و دومی از عملکرد جبرانی مدل در رفع ضعف‌های ساختاری الگوریتم منشأ می‌گیرد (۴۶،۵۴).



شکل ۳- دبی شبیه‌سازی‌شده (Simulated Qw) در برابر دبی مشاهده‌ای (Observed Qw) همراه با هیتوگراف بارش (PCP) بر اساس وقایع مختلف رگباری

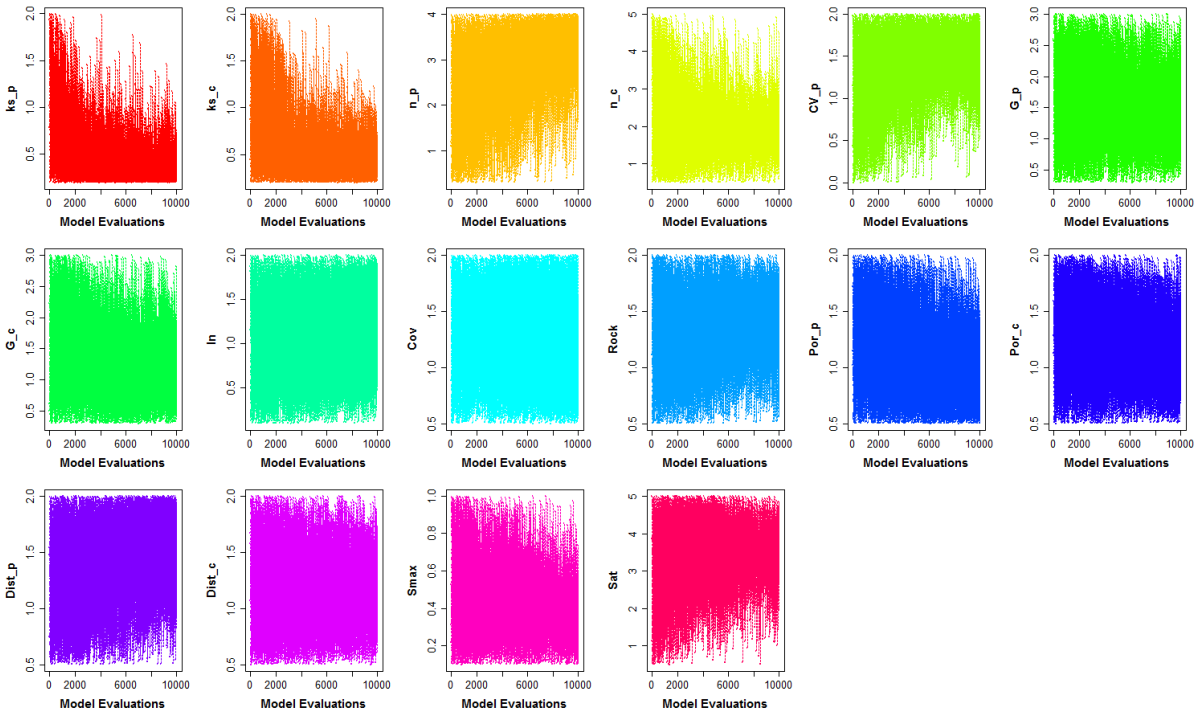
Figure 3. Observed vs. simulated water discharge with the hyetographs of selected storm events

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

جدول ۴- سنجه‌های ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی مبتنی بر وقایع بارشی ۱ تا ۴

Table 4. Fitting metrics of selected storm events (the events #1- #4) for runoff modeling

سنجه ارزیابی مدل	واقعه ۱	واقعه ۲	واقعه ۳	واقعه ۴
MB	- ۰/۴۴	۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۰۵
r_{mod}	۰/۷۴	۰/۹۰	۰/۸۱	۰/۷۳
NSE	۰/۳۹	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۶
AM	۰/۵۶	۰/۹۲	۰/۸۳	۰/۸۵
نیکویی برازش	خوب	عالی	خیلی خوب	عالی

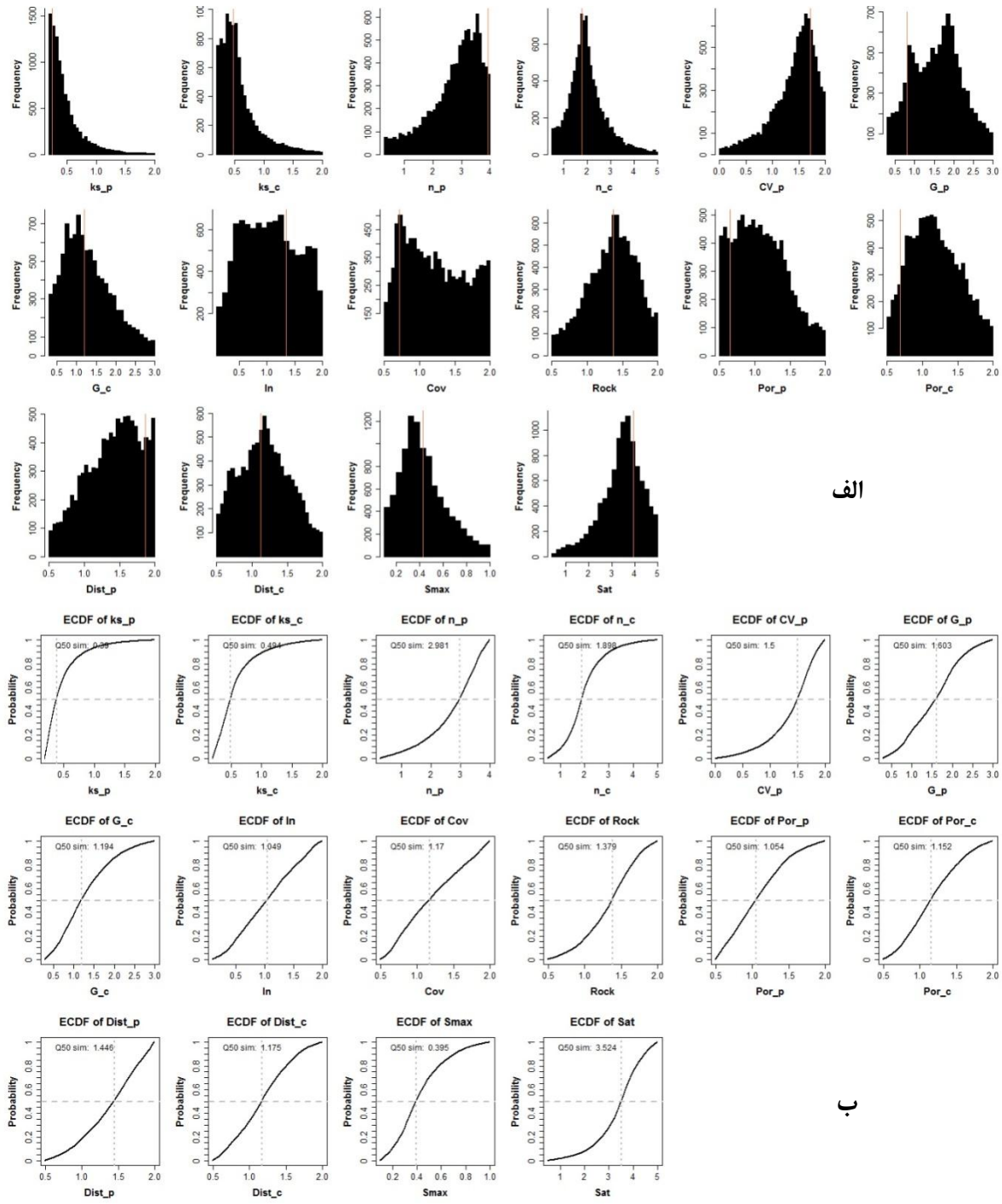


شکل ۴- ارزش پارامترها در هر اجرای مدل در طی فرآیند واسنجی بر اساس شبیه‌سازی هیدرولوژیک مبتنی بر واقعه شماره ۲

Figure 4. Parameters values per run in model calibration based on the event #2

نمودارهای جعبه‌ای در شکل (۶-الف)، توزیع آماری ارزش‌های نمونه‌برداری شده را به روش دیگری برای واقعه شماره ۲ نمایش می‌دهند. در هر جعبه خطوط بالایی و پایینی به ترتیب اولین و سومین چارک را نشان می‌دهند. خط افقی درون جعبه نیز معرف چارک دوم به‌عنوان میانه است. حدود بالا و پایین نمودار نیز برابر با $IQR/\sqrt{(n)} \cdot ۱/۵۸ +/-$ محاسبه می‌شود که IQR دامنه میان چارکی و n تعداد نقاط نمونه‌گیری شده است. نمودارهای نقطه‌ای در شکل (۶-ب) نشان‌دهنده ارزش پارامتر در برابر نیکویی برازش (NSE) منطبق بر آن در طی فرآیند بهینه‌سازی است که بهترین اجرای مدل منطبق بر بهترین ارزش پارامتر را مشخص می‌کند (۱،۵). با کنترل بصری (شکل ۶-الف) مشخص می‌شود که در ۶ پارامتر از ۱۶ پارامتر مدل یعنی Ks_c، n_c، G_c، Rock، Dist_c و Smax عدد بهینه تقریباً منطبق بر میانه ارزش‌های نمونه‌گیری شده است. این وضعیت ثابت می‌کند که بخش زیادی از ذرات (particles) الگوریتم PSO در ناحیه کوچکی از فضای پاسخ تجمع می‌یابند. ارزش‌های بهینه پارامترهای In و Sat در چارک دوم واقع می‌شوند. شکل (۶-ب) نشان می‌دهد که ارزش‌های بهینه پارامترهای Ks_p، Ks_c، n_c، CV_p و Sat نسبتاً درست تعریف شده‌اند اما در مورد سایر پارامترها مقداری عدم قطعیت وجود دارد چراکه ناحیه اطراف ارزش بهینه گسترده‌تر و پراکنش ارزش‌های نمونه‌گیری شده بیشتر است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]



شکل ۵- نمایش گرافیکی ارزش‌های نمونه‌برداری شده پارامترها در طی فرآیند بهینه‌سازی بر اساس واقعه شماره ۲. (الف) هیستوگرام فراوانی ارزش‌های نمونه‌برداری شده پارامترها. خط قرمز عمودی نشان‌دهنده بهترین ارزش به‌دست‌آمده پارامتر است. (ب) تابع توزیع تجمعی تجربی پارامترها. خط خاکستری نقطه‌چین افقی و عمودی نشان‌دهنده احتمال تجمعی ۰/۵ به‌عنوان میانه توزیع است.

Figure 5. Graphical summary of parameter values sampled during the optimization. (a) Histograms showing the frequencies of the parameter values. Vertical red line indicates the optimum value found for each parameter. (b) ECDFs of parameter values. Horizontal gray dotted lines represent a cumulative probability equal to 0.5 (median of the distribution). Vertical gray dotted lines represent a cumulative probability of 0.5.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

در شکل (۷) تکامل بهینه عمومی (بهترین اجرای مدل در هر تکرار یعنی بالاترین NSE) و شعاع انبوه ذرات نرمال شده (که کمیتی است از دامنه یا میدان انبوه ذرات بر روی ناحیه جستجو) در برابر تعداد تکرارها تصویر شده است. همان‌طور که در نمودار مشخص است هم بهینه عمومی و هم شعاع انبوه ذرات نرمال شده با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابند. این وضعیت نشان‌دهنده این است که بخش زیادی از ذرات در محدوده کوچکی از فضای پاسخ نوسان می‌کنند (۵۸). علاوه بر این شکل (۷) نشان می‌دهد که فقط ۸ تکرار (یعنی ۸×۲۰۰=۱۶۰۰ اجرای مدل) برای یافتن منطقه بهینه عمومی کافی است و سایر تکرارها فقط برای بهبود و تصحیح جزئی جستجو بکار می‌روند.

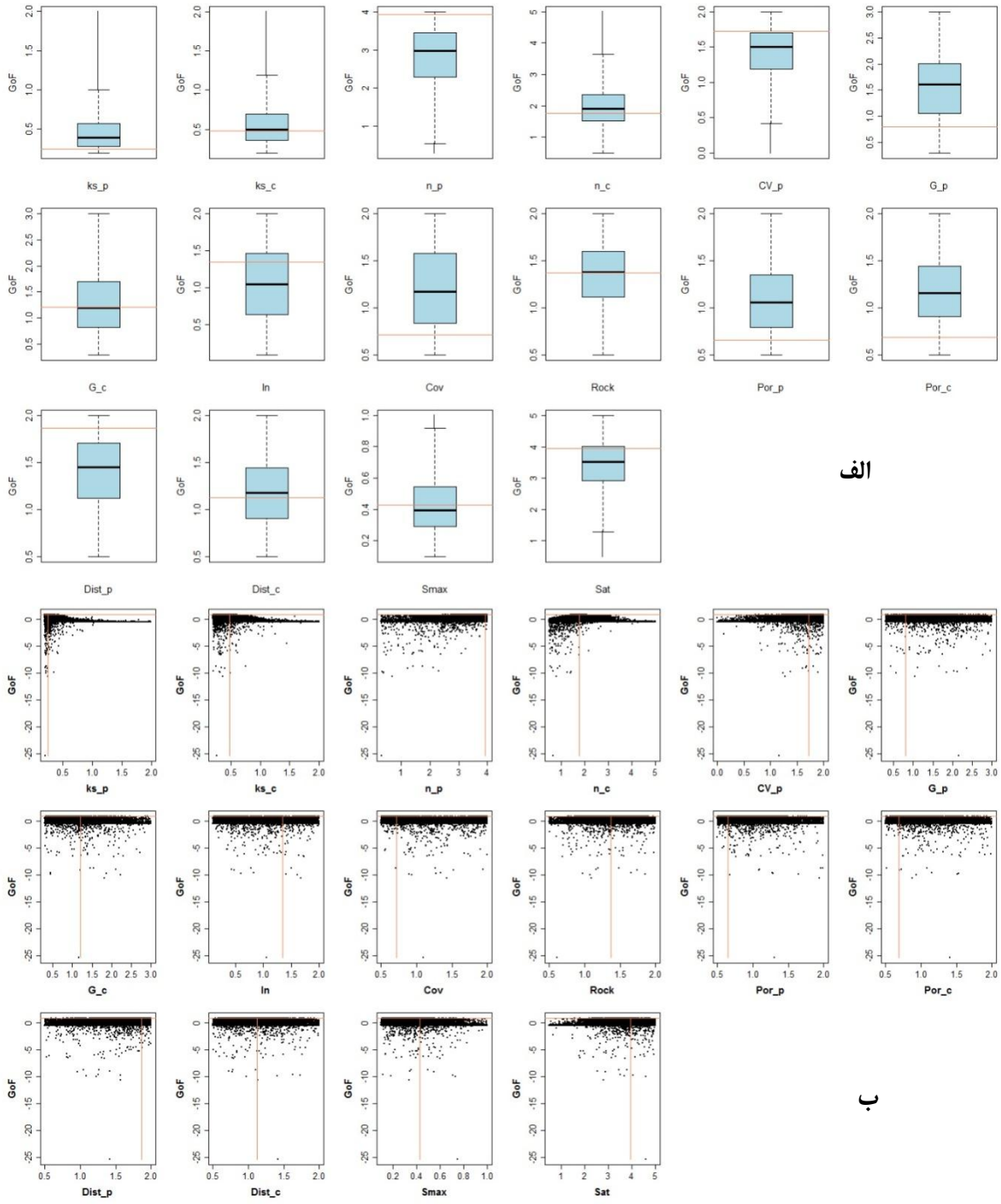
شکل (۸) نمودار نقطه‌ای سه‌بعدی است که اندرکنش پارامترها را (برای هر زوج پارامتر) به‌وسیله پلات کردن سطح پاسخ NSE بر روی فضای پارامتری برای واقعه شماره ۲ نشان می‌دهد. بر اساس شکل (۸)، به‌طورکلی می‌توان گفت که ذرات در نقاط مختلف فضای پارامتر پراکنده‌شده‌اند که این نشان از قدرت اکتشافی PSO برای یافتن پاسخ مطلوب دارد. در این نمودارها محدوده‌هایی که تمرکز کمتری از نقاط را دارند نشان‌دهنده عملکرد ضعیف‌تر مدل و محدوده‌هایی که دارای نقاط متمرکزتری هستند نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل می‌باشند که درمجموع توان اکتشافی مدل را نشان می‌دهد (۵۸). همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است ارزش‌های بهینه اکتشاف شده برای پارامترهای Ks_p، Ks_c و n_c منطقه محدودی از فضای جستجوی پارامتر را اشغال کرده که این محدوده همان منطقه پاسخ با سطح کارایی بالای مدل K2 است. همچنین بر اساس شکل ۸ می‌توان استنباط کرد که کارایی مدل بیشتر تحت تأثیر اندرکنش پارامترهای Ks و n است. پارامترهای CV_p و n_p محدوده گسترده‌تری را از سطوح بهینه به خود اختصاص می‌دهند. در مورد سایر پارامترها با توجه به سطح جستجوی بهینه گسترده‌تر می‌توان گفت که تغییرات این پارامترها میزانی از عدم قطعیت را بر نتایج مدل تحمیل خواهد کرد (۴۷).

ماتریس همبستگی بین ارزش‌های پارامترها و راندمان مدل (NSE) در شکل شماره (۹) برای واقعه شماره ۲ نمایش داده‌شده است. بخش بالای قطر ماتریس نشان‌دهنده ضریب همبستگی پیرسون بین جفت پارامترها و درجه معنی‌داری آماری آن‌هاست. در بخش پایینی نیز نمودارهای پراکنش دومتغیره بین هر ستون و ردیف از ماتریس تصویر شده است. همچنین در این نمودارها یک خط با استفاده از تکنیک رگرسیون چندجمله‌ای موضعی وزن‌دار[1] (۱،۸) بر داده‌ها برازش یافته است. هیستوگرام هر فاکتور که طی فرآیند بهینه‌سازی نمونه‌گیری شده بر روی قطر ماتریس نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین ضریب همبستگی به ترتیب بین NSE و فاکتورهای Ks_p، Ks_c، n_p، CV_p، G_c، Por_p، Dist_p و Smax به‌دست‌آمده است. همچنین همبستگی‌های معنی‌دار خطی بین زوج پارامترهای In و COV، Ks_p و Ks_c، Ks_p و n_p، Ks_c و n_p مشاهده می‌شود. روابط غیرخطی نیز بین برخی از جفت پارامترها مانند G_p و COV، Por_c و Dist_c، G_c و n_c مشهود است.

با مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج مطالعه کمالی و همکاران (۱۷) که از الگوریتم PSO چند هدفه برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوزه آبخیز تمر با استفاده از مدل HEC-HMS استفاده کردند مشخص می‌شود که استفاده از بسته بهینه‌سازی hydroPSO منجر به تغییر و بهبود معنی‌داری در صحت دبی آب شبیه‌سازی‌شده بر اساس وقایع شماره ۲، ۳ و ۴ می‌شود. اما HMS-PSO توانسته شبیه‌سازی بهتری از دبی آب نسبت به K2-PSO ارائه دهد. در این رابطه ذکر این نکته ضروری است که نتایج این تحقیق بشدت تحت تأثیر کمبود داده‌های تفصیلی و دقیق از وقایع رگباری و دبی‌های متناظر با آن و همچنین داده‌های خاکشناسی است. بنابراین نتایج به‌دست‌آمده محدود بوده و قابلیت تعمیم کمی دارند. اما به‌هرحال حتی با توجه به این کمبودها نمی‌توان از مفید بودن نتایج چشم‌پوشی کرد و باید با اطلاعات دقیق‌تر از حوزه مطالعاتی مدل را بروز کرده و نتایج بهتری به دست آورد. ضمن اینکه تحلیل دقیق‌تر عدم قطعیت مدل به‌عنوان یک گزینه پیشنهادی برای مطالعات آینده مطرح می‌باشد.

1- Locally-weighted polynomial regression

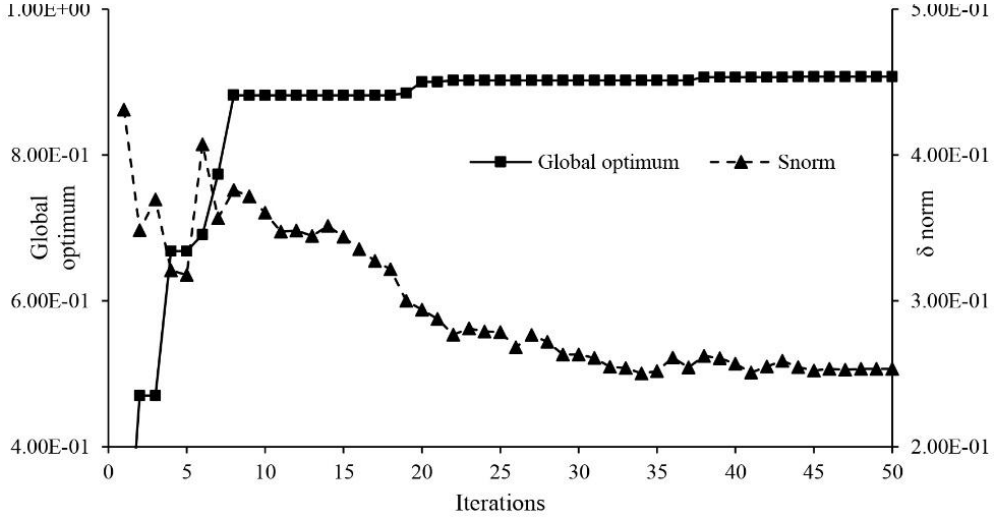
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]



شکل ۶- نمایش گرافیکی ارزش‌های پارامترهای نمونه‌برداری شده در طی فرآیند بهینه‌سازی بر اساس واقعه رگباری شماره ۲. (الف) نمودارهای جعبه‌ای. (ب) ارزش پارامترها در برابر تابع هدف NSE. خطوط افقی و عمودی تعریف‌کننده ارزش بهینه به‌دست‌آمده برای هر پارامتر است.

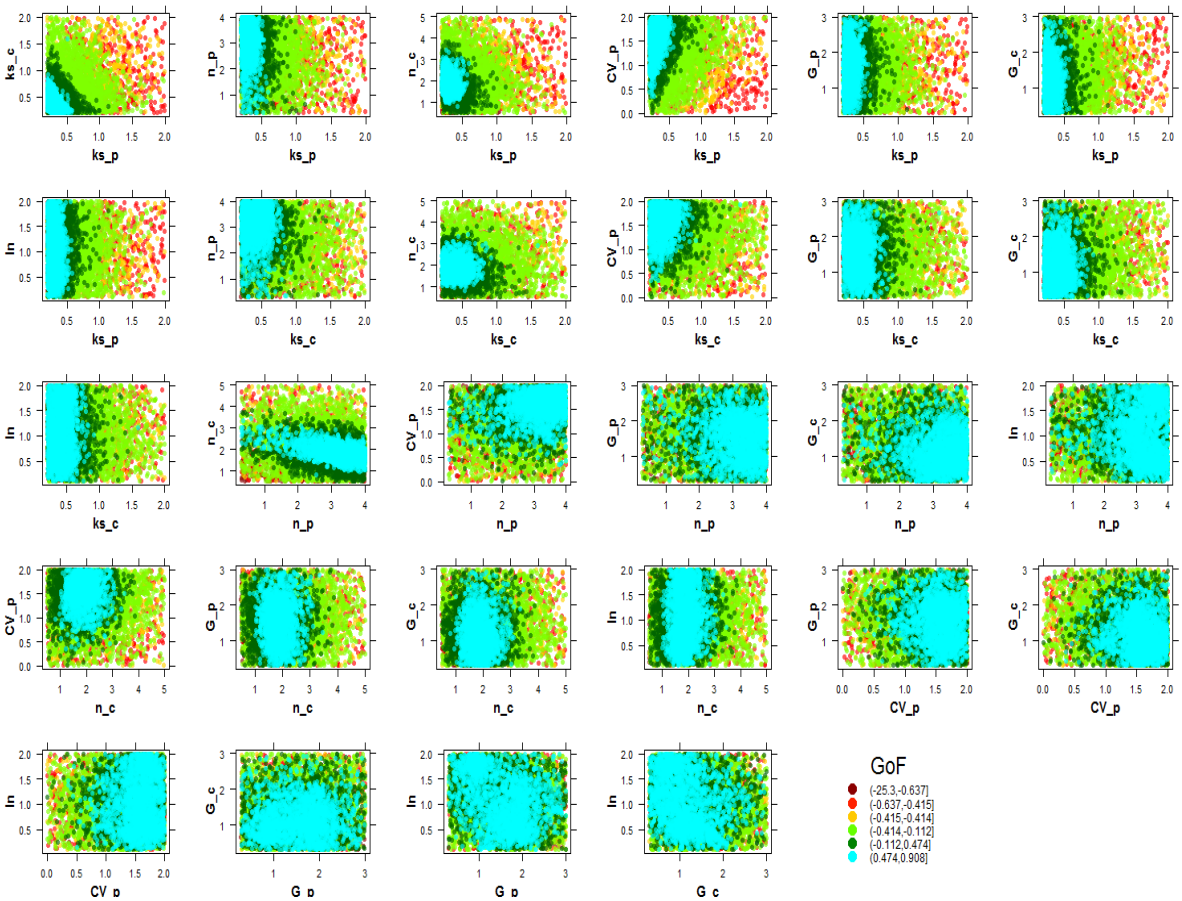
Figure 6. Graphical representation of parameters' values sampled during the optimization based on the event #2. (a) Box-and-whisker plots (or boxplots). (b) Parameter values versus its equivalent NSE. Horizontal and vertical red line specifies the optimal value obtained for each parameter.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]



شکل ۷- تکامل بهینه عمومی (Global optimum) و شعاع انبوه ذرات نرمال شده (δnorm) در طی ۵۰ تکرار مدل بر اساس واقعه شبیه‌سازی شماره ۲

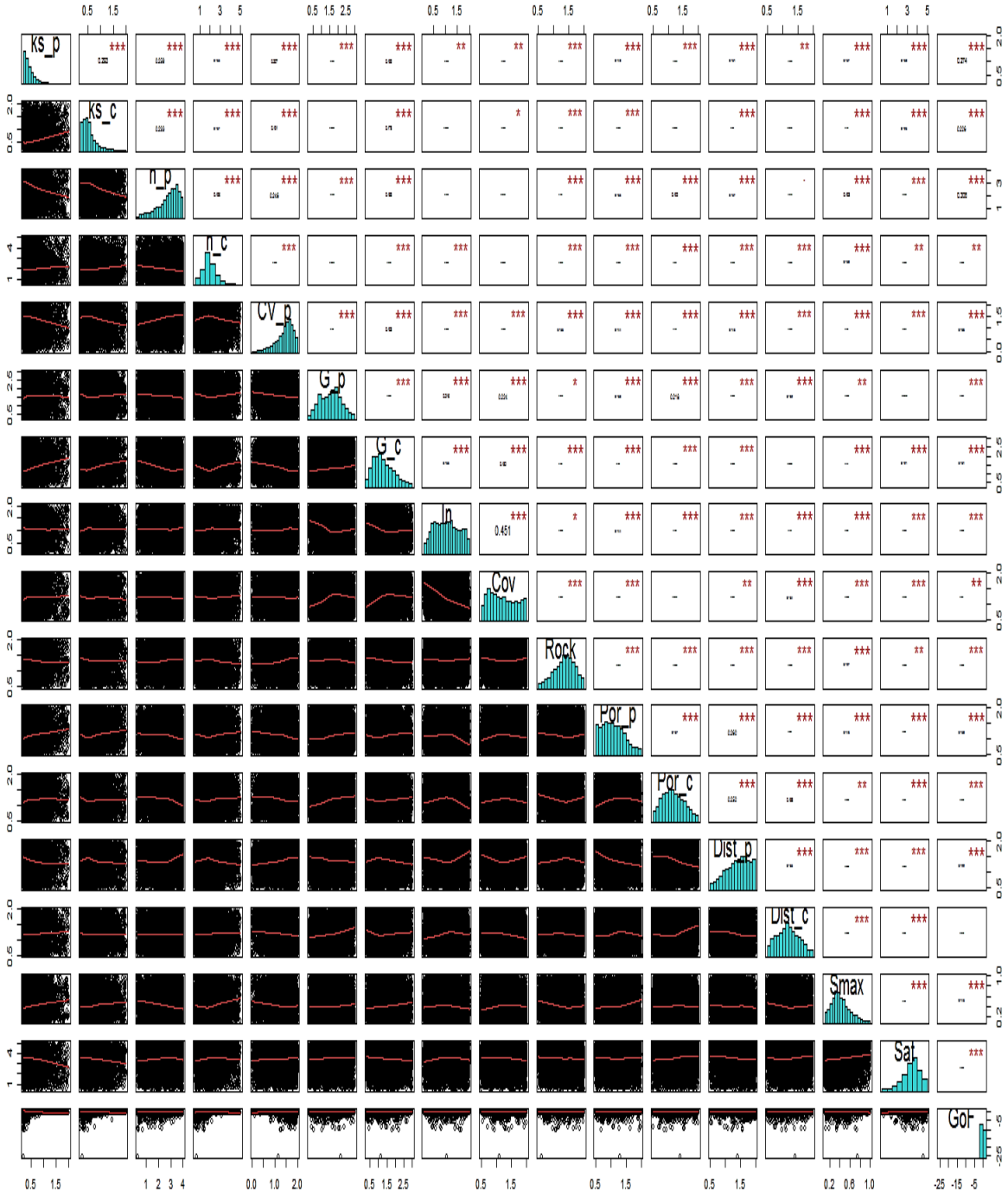
Figure 7. Evolution of the Global Optimum and the Normalized Swarm Radius (δ norm) over the 50 model iterations



شکل ۸- عملکرد مدل (NSE) در فضای پارامتری برای هر جفت از پارامترهای ورودی مدل در فرآیند واسنجی بر اساس واقعه رگباری شماره ۲

Figure 8. Model performance (NSE) projected onto the parameter space for different pairs of parameters based on the event #2

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]



شکل ۹- ماتریس همبستگی بین پارامترها و تابع هدف NSE بر اساس شبیه‌سازی مبتنی بر واقعه شماره ۲

Figure 9. Correlation matrix between parameters and model performance (NSE), based on the event #2.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]

[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

در این مقاله بسته بهینه‌سازی hydroPSO به‌منظور واسنجی مدل بارش–رواناب KINEROS2 بر اساس ۱۶ پارامتر ورودی به مدل و چهار رگبار انتخابی در حوزه آبخیز تمر در استان گلستان مورداستفاده قرار گرفت و نتایج کلیدی زیر به دست آمد:

– مدل K2 با توجه به سه معیار ارزیابی مورداستفاده در این تحقیق توانست در شبیه‌سازی دبی آب موفق عمل کند. نتایج حاکی از کارایی بهتر مدل در شبیه‌سازی هیدرولوژیک واقعه رگباری شماره ۲ می‌باشد که در این شبیه‌سازی ضریب تبیین (R^2) و ضریب نش (NSE) به ترتیب برابر با ۰/۹۰۸۴ و ۰/۹۲ به دست آمد. شبیه‌سازی بر اساس وقایع رگباری شماره ۳ و ۴ با ضرایب NSE برابر با ۰/۸۹ و ۰/۸۶ توانست منجر به برازش به ترتیب عالی و خوب رکوردهای شبیه‌سازی‌شده بر رکوردهای مشاهداتی شود. اما مدل تمایل بیشتری به تخمین کمتر از حد واقعی دبی پیک در واقعه شماره ۱ نشان داد. بر اساس سنجه انحراف مدل (MB)، hydroPSO در شبیه‌سازی دبی آب وقایع رگباری ۲، ۳ و ۴ مجبور به تخمین بیش‌ازحد واقعی شده است. این‌گونه انحرافات یا تخمین‌های کمتر یا بیشتر از حد می‌تواند از این واقعیت نشأت بگیرد که در این مطالعه فقط یک رگبار ایزوله از یک ایستگاه باران‌سنجی بر کل حوزه تعمیم‌یافته است.

– تحلیل حساسیت نشان داد که پارامترهای Ks_p، Ks_c، n_p، n_c، CV_p و Sat به ترتیب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی مدل K2 بشمار می‌روند. توزیع فراوانی برخی از پارامترها مانند Ks_p و n_c دارای شکل زنگوله‌ای با اوج تیزتر می‌باشد که این خود نشان‌دهنده عدم قطعیت کمتر تحمیل‌شده از جانب این پارامترها بر مدل است. اما برخی از پارامترها مانند In، COV، Por_p و Dist_p توزیع فراوانی یکنواختی را نشان می‌دهند. این رفتار می‌تواند معرف دو نوع خطا باشد که اولی خطای سیستماتیک داده‌های وردی است و دومی خطای ناشی از عملکرد مدل برای جبران ضعف‌های ساختاری است. تفسیر بصری نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد که در ۶ پارامتر Ks_c، n_c، G_c، Rock، Dist_c و Smax ارزش بهینه پارامتر به‌دست‌آمده در فرآیند واسنجی منطبق بر میانه ارزش‌های نمونه‌برداری شده است که این مطلب مؤید این است که اکثر ذرات به سمت یک منطقه کوچک از فضای پاسخ هدایت‌شده‌اند. نمودارهای نقطه‌ای نیز نشان می‌دهند که ارزش‌های بهینه پارامترهای Ks_p، Ks_c و n_c دامنه محدودی از فضای پارامتری را که راندمان بالای مدل K2 را ایجاد می‌کند، اشغال می‌نمایند. به‌عبارت‌دیگر کار آیی مدل بیشتر تحت تأثیر اندرکنش پارامترهای Ks و n می‌باشد. پارامترهای CV_p و n_p دامنه گسترده‌تری از سطوح بهینه را به خود اختصاص می‌دهند. در طی فرآیند بهینه‌سازی متغیرهای بهینه عمومی و شعاع انبوه ذرات نرمال شده روند کاهشی را هم‌زمان با افزایش تکرارهای الگوریتم نشان می‌دهند که این نیز نشان‌دهنده این است که اکثر ذرات به درون یک منطقه کوچک از فضای پاسخ همگرا شده‌اند. تحلیل همبستگی نیز نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی NSE با پارامترهای Ks_p، Ks_c و n_p به دست آمد و بعد با پارامترهای CV_p، G_c، Por_p، Dist_p و Smax.

– نتایج این تحقیق نشان‌دهنده تلفیق موفق بسته بهینه‌سازی hydroPSO با مدل K2 است که می‌تواند به‌طور هم‌زمان از مزایای مدل توزیعی هیدرولوژیک و مزیت محاسبات نرم و پردازش موازی بسته R بهره بگیرد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر با حمایت مالی دانشگاه بیرجند تحت قرارداد شماره ۱۳۹۵/د/۱۲۰۹ انجام‌شده است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

منابع

1. Abdelaziz, R. and M. Zambrano-Bigiarini. 2014. Particle swarm optimization for inverse modeling of solute transport in fractured gneiss aquifer. Journal of contaminant hydrology, 164: 285-298.
2. Al-Qurashi, A., N. McIntyre, H. Wheater and C. Unkrich. 2008. Application of the Kineros2 rainfall–runoff model to an arid catchment in Oman. Journal of Hydrology, 355(1): 91-105.
3. Azizian, A. and A.Shokoohi. 2014. DEM resolution and stream delineation threshold effects on the results of geomorphologic-based rainfall runoff models. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 38(1): 64-78.
4. Baltar, A. and D.G. Fontane. 2004. A multiobjective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning. Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colo. 10 pp.
5. Beven, K. and A. Binley.1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological processes, 6(3): 279-298.
6. Bloomfield, V.A. 2014. Using R for Numerical Analysis in Science and Engineering. CRC Press, 359 pp.
7. Canfield, H. and D. Goodrich. 2006. Differentiating the impact of parameter lumping from the impact of geometric simplification in modeling runoff and erosion 1584. Hydrological Processes, 20(1): 17-35.
8. Cleveland, W.S. 1979. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. Journal of the American statistical association, 74(368): 829-836.
9. Doherty, J., L. Brebber and P. Whyte. 1994. PEST: Model-independent parameter estimation. Watermark Computing, Corinda, Australia, 122 pp.
10. Gholami, V. and M. Mohseni Saravi. 2010. Effects of impervious surfaces and urban development on runoff generation and flood hazard in the Hajighoshan watershed. Caspian Journal of Environmental Sciences, 8(1): 1-12.
11. Gill, M.K., Y.H. Kaheil, A. Khalil, M. McKee and L. Bastidas. 2006. Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology. Water Resources Research, 42(7).
12. Guber, A.K., A.M. Yakirevich, AM. Sadeghi, Y.A. Pachepsky and D.R. Shelton. 2009. Uncertainty evaluation of coliform bacteria removal from vegetated filter strip under overland flow condition. Journal of environmental quality, 38(4): 1636-1644.
13. Guber, A.K., Y.A. Pachepsky, A.M. Yakirevich, D.R. Shelton, A.M. Sadeghi, D.C. Goodrich and C.L. Unkrich. 2011. Uncertainty in modelling of faecal coliform overland transport associated with manure application in Maryland. Hydrological processes, 25(15): 2393-2404.
14. Gupta, H.V., S. Sorooshian and P.O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. Journal of Hydrologic Engineering, 4(2): 135-143.
15. Hernandez, M., S.N. Miller, D.C. Goodrich, B.F. Goff, W.G. Kepner, C.M. Edmonds and K.B. Jones. 2000. Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. In Monitoring Ecological Condition in the Western United States (pp: 285-298). Springer Netherlands.
16. Jiang, Y., C. Liu, C. Huang and X. Wu. 2010. Improved particle swarm algorithm for hydrological parameter optimization. Applied Mathematics and Computation, 217(7): 3207-3215.
17. Kamali, B., S.J. Mousavi and K.C. Abbaspour. 2013. Automatic calibration of HEC-HMS using single-objective and multi-objective PSO algorithms. Hydrological Processes, 27(26): 4028-4042.
18. Kalin, L. and M.M. Hantush. 2003. Evaluation of sediment transport models and comparative application of two watershed models. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, 81 pp.
19. Kasmaei, L.P., R. Van Der Sant, P.J. Lane and G. Sheriadan. 2015. Modelling overland flow on burned hillslopes using the KINEROS2 model. 21st International Congress on Modelling and Simulation, Gold Coast, Australia, 29 Nov t0 4 Dec 2015. 222-228.
20. Kennedy, J. and R. Eberhart. 1995. Particle swarm optimization. In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, pp: 1942-1948.
21. Kennedy, J.R., D.C. Goodrich and C.L. Unkrich. 2012. Using the KINEROS2 modeling framework to evaluate the increase in storm runoff from residential development in a semiarid environment. Journal of Hydrologic Engineering, 18(6): 698-706.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

22. Koster, G. 2013. Mapping runoff and erosion to reduce urban flooding and sediment flow towards sea, A case study on the Playa catchment, Bonaire. MSc. Thesis. Water Resources Management Group, WAGENINGEN University, 81 pp.
23. Martínez-Carreras, N., M. Soler, E. Hernández and F. Gallart. 2007. Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). Catena, 71(1): 145-154.
24. McCuen, R.H. 1989. Hydrologic analysis and design (pp: 143-147). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
25. McCuen, R.H. and W.M. Snyder. 1975. A proposed index for comparing hydrographs. Water Resources Research, 11(6): 1021-1024.
26. Memarian, H., S.K. Balasundram, J. Talib, C.B.S. Teh, M.S. Alias, K.C. Abbaspour and A. Haghizadeh. 2012. Hydrologic Analysis of a Tropical Watershed using KINEROS2. Environment Asia, 5(1): 84-93
27. Memarian, H., S.K. Balasundram, J.B. Talib, C. Teh Boon Sung, A. Mohd Sood and K.C. Abbaspour. 2013. KINEROS2 application for land use/cover change impact analysis at the Hulu Langat Basin, Malaysia. Water and Environment Journal, 27(4): 549-560.
28. Meyer, P.D., M.L. Rockhold and G.W. Gee. 1997. Uncertainty analyses of infiltration and subsurface flow and transport for SDMP sites (No. NUREG/CR--6565; PNNL--11705). Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div. of Regulatory Applications; Pacific Northwest National Lab., Richland, WA (United States).
29. Michaud, J.D. and S. Sorooshian. 1994. Effect of rainfall-sampling errors on simulations of desert flash floods. Water Resources Research, 30(10): 2765-2775.
30. Mirzaei, M., Y.F. Huang, A. El-Shafie, T. Chimeh, J. Lee, N. Vaizadeh and J. Adamowski. 2015. Uncertainty analysis for extreme flood events in a semi-arid region. Natural Hazards, 78(3): 1947-1960.
31. Molaeifar, A. 2013. KINEROS2 evaluation for hydrograph simulation of Ziarat watershed. M.Sc. Thesis, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources, 95 pp (In Persian).
32. Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel and T.L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3): 885-900.
33. Musau, J., J. Sang, J. Gathenya, E. Luedeling and P. Home. 2015. SWAT model parameter calibration and uncertainty analysis using the HydroPSO R package in Nzoia Basin, Kenya. Journal of Sustainable Research in Engineering, 1(3): 17-29.
34. Nachtergaele, F., H. Van Velthuizen, L. Verelst, N. Batjes, K. Dijkshoorn, V. Van Engelen and S. Prieler. 2008. Harmonized world soil database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
35. Namavar, B. 2011. Runoff simulation in Kameh watershed using Kineros2 and AGWA-GIS. M.Sc. thesis, Ferdowsi University of Mashhad, 85 pp (In Persian).
36. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. Journal of hydrology, 10(3): 282-290.
37. Nearing, M.A., V. Jetten, C. Baffaut, O. Cerdan, A. Couturier, M. Hernandez and V. Souchère. 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. Catena, 61(2): 131-154.
38. Neitsch, S.L., J.R. Williams, J.G. Arnold and J.R. Kiniry. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
39. Nikolova, M., S. Nedkov, V. Nikolov, I. Zuzdrov, M. Genev, T. Kotsev and Y. Krumova. 2009. Implementation of the" KINEROS" model for estimation of the flood prone territories in the Malki Iskar River basin. Information and Security, 24, 76.
40. Onstad, C.A. and D.L. Brakensiek. 1968. Watershed simulation by stream path analogy. Water Resources Research, 4(5): 965-971.
41. Parsopoulos, K.E. and M.N. Vrahatis. 2002. Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization. Natural computing, 1(2-3): 235-306.
42. Poli, R., J. Kennedy and T. Blackwell. 2007. Particle swarm optimization. Swarm intelligence, 1(1): 33-57.Rovey, E.W. 1977. A distributed kinematic model of upland watersheds. Hydrology papers (Colorado State University); no. 93.
43. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2012. WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP2). Journal of Hydrology, 418: 78-89.
44. Schaffner, M., C.L. Unkrich and D.C. Goodrich. 2010. Application of the KINEROS2 site specific model to south-central NY and northeast PA: forecasting gaged and ungaged fast responding watersheds. NWS Eastern Region Technical Attatchment, 1, 2010.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

45. Semmens, D.J., D.C. Goodrich, C.L. Unkrich, R.E. Smith, D.A. Woolhiser and S.N. Miller. 2008. KINEROS2 and the AGWA modelling framework. In Hydrological modelling in arid and semi-arid areas, Wheater, H., Sorooshian, S. and Sharma, K.D. (eds.). Cambridge University Press, New York. 49-69.
46. Shafiei, M., B. Ghahraman, B. Saghafian, K. Davary, S. Pande and M. Vazifedoust. 2014. Uncertainty assessment of the agro-hydrological SWAP model application at field scale: A case study in a dry region. Agricultural Water Management, 146: 324-334.
47. Shen, Z.Y., L. Chen and T. Chen. 2012. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. Hydrology and Earth System Sciences, 16(1): 121-132.
48. Smith, R.E., D.C. Goodrich and C.L. Unkrich.1999. Simulation of selected events on the Catsop catchment by KINEROS2: a report for the GCTE conference on catchment scale erosion models. Catena, 37(3): 457-475.
49. Smith, R.E. and J.Y. Parlange.1978. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. Water Resources Research, 14(3): 533-538.
50. Sorooshian, S. and V.K. Gupta. 1983. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: The question of parameter observability and uniqueness. Water Resources Research, 19(1): 260-268.
51. Sorooshian, S. and V.K. Gupta. 1995. Model calibration. Computer models of watershed hydrology, 23-68.
52. Van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio and R. Srinivasan. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. Journal of hydrology, 324(1): 10-23.
53. Vatseva, R., S. Nedkov, M. Nikolova and T. Kotsev. 2008. Modeling land cover changes for flood hazard assessment using Remote Sensing data. In Geospatial crossroads@ GI Forum'08—Proceedings of the Geoinformatics Forum Salzburg, pp: 262-267.
54. Vrugt, J.A. and B.A. Robinson. 2007. Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. Proceedings of the National Academy of Sciences, 104(3): 708-711.
55. Wagener, T. and S.W. Franks. 2005. Regional Hydrological Impacts of Climatic Change: Hydroclimatic variability (Vol. 2). International Assn of Hydrological Sciences.
56. Woolhiser, D.A., C.L. Hanson and A.R. Kuhlman. 1970. Overland flow on rangeland watersheds. Journal of Hydrology (NZ), 9(2): 336-356.
57. Woolhiser, D.A., R.E. Smith and D.C. Goodrich. 1990. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 139 pp.
58. Zambrano-Bigiarini, M. and R. Rojas. 2013. A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. Environmental Modelling and Software, 43: 5-25.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]

Parameters Optimization of KINEROS2 using Particle Swarm Optimization Algorithm for Single Event Rainfall-Runoff Simulation (Case Study: Tamar Watershed, Golestan, Iran)

Hadi Memarian[1], Mohsen Pourreza Bilondi[2] and Zinat Komeh[3]

1- Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Department of Watershed Management, University of Birjand, Birjand, Iran (Corresponding author: hadi_memarian@birjand.ac.ir)
2- Assistant Professor, Faculty of Agriculture, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
3- GIS Senior Expert, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand, Birjand, Iran
Received: January 12, 2017 Accepted: July 3, 2017

Abstract

Simulation of rainfall-runoff process for planning and management of water resources and watersheds requires the use of a conceptual optimized hydrological model. In this study, the hydroPSO package was employed to optimize KINEROS2 (K2) parameters applied in the Tamar watershed, Iran. Four storm events were utilized in hydrograph simulation. Results indicated better efficiency of K2 based on the event #2 with the coefficient of determination and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.9084 and 0.92, respectively. The events #3 and #4 with NSE of 0.89 and 0.86 showed the excellent and very good fitness of simulated flow compared to observed flow, respectively. Sensitivity analysis established that the parameters Ks_p, Ks_c, n_p, n_c, CV_p and Sat were the most effective parameters in K2 calibration, respectively. The posterior distributions of some parameters such as Ks_p and n_c appeared to be more sharply peaked than other parameters which established less uncertainty in hydrological modeling. Visual inspection of boxplots showed that for 6 out of 16 parameters (Ks_c, n_c, G_c, Rock, Dist_c and Smax) the optimum value found during the optimization coincided with the median of all the sampled values confirming that most of the particles converged into a small region of the solution space. Dotty plots showed that the optimum values found for Ks_p, Ks_c, and n_c define a narrow range of the parameter space with high model performance. On the other hand, the model performance was more impacted by the interaction of Ks and n parameters. The parameters CV_p and n_p showed a wider range of the optimized levels. Correlation analysis revealed that the highest linear correlation between the NSE and K2 parameters was obtained for the Ks_p, Ks_c and n_p, followed by CV_p, G_c, Por_p, Dist_p and Smax. Conclusively, this work demonstrated the capability of hydroPSO in optimization of the K2 as an event-based hydrological model.

Keywords: HydroPSO, KINEROS2, Particle Swarm Optimization (PSO), Rainfall-runoff, Simulation

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22516174.1397.9.18.9.3]
[DOI: 10.29252/jwmr.9.18.91]