

استفاده از HydroPSO در واسنجی مدل هیدرولوژی KINEROS2 جهت شبیه‌سازی رواناب

در حوزه‌های آبخیز مناطق نیمه خشک (مطالعه موردی: حوزه آبخیز بار نیشابور)

فاطمه پورحق‌وردي*: دانشجوی دکتری گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

هادی معماریان: دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی

محسن پوررضا بیلنندی: دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی

سید محمد تاجبخش: دانشیار گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی

میثم مجیدی: استادیار، گروه مهندسی آب، مرکز آموزش عالی کاشمر، خراسان رضوی
نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۷ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۹/۶

چکیده

شبیه‌سازی بارش - رواناب به منظور برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبخیز صورت می‌گیرد که نیازمند استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی بهینه است. در این تحقیق از بسته‌ی بهینه‌سازی hydroPSO به منظور واسنجی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل بارش - رواناب (K2) در حوزه آبخیز بار نیشابور در استان خراسان رضوی استفاده شد. به همین منظور، پنج واقعه‌ی رگباری با هیدرولوگراف‌های متناظر انتخاب شد. براساس نتایج، این مدل کارآیی بهتری در شبیه‌سازی هیدرولوژیک حوضه بر اساس واقعه‌ی رگباری تاریخ‌های ۷۱/۰۱/۱۱ نشان داد. در این شبیه‌سازی، ضریب تبیین (R^2) و نش (NSE) مدل در شبیه‌سازی دبی آب برابر با ۰/۹۶ و ۰/۹۶ به دست آمد. مدل سازی براساس وقایع رگباری تاریخ‌های ۰۹/۱۲/۱۶، ۰۹/۱۲/۲۱، ۰۹/۱۲/۲۶ و ۰۹/۱۳ به ترتیب با ضرایب NSE برابر با ۰/۹۰، ۰/۹۰، ۰/۸۹ و ۰/۴۳، توانست به نیکویی برازش عالی، عالی و خوب هیدرولوگراف شبیه‌سازی شده بر هیدرولوگراف مشاهداتی منجر شود. تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع - کanal (ks_c)، ضریب زبری مانینگ - کanal (n_c)، ضریب حجمی سنگ و سنگ-ریزه (Rock)، میانگین نیروی کاپیلاری - دامنه (G_p)، هدایت هیدرولیکی اشباع - دامنه (ks_p) و تخلخل - دامنه (Por_p)، به ترتیب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی مدل K2 به شمار می‌رود. توزیع فراوانی برخی از پارامترها مانند n_c و S_{max} ، دارای شکل زنگوله‌ای با اوج تیزتر است که این خود فقدان قطعیت کمتر تحمیل شده از جانب این پارامترها را بر مدل نشان می‌دهند؛ اما برخی از پارامترها مانند Por_c و Dist، توزیع فراوانی یکنواختی را نشان می‌دهند. تفسیر بصری نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد که در پارامترهایی مثل Por_p، Rock، In، G_p، n_c، Ks_p، Por_c، ارزش بهینه‌ی پارامتر تحت آمده در فرآیند واسنجی تقریباً منطبق بر میانه ارزش‌های نمونه‌برداری شده است و بیشتر ذرات به سمت یک منطقه‌ی کوچک از فضای پاسخ هدایت شده‌اند. نمودار نقطه‌ای نشان می‌دهد که کارآیی مدل پارامترهای Sat، ارزش بهینه‌ی پارامتر کنترل کننده در فرآیند واسنجی تقریباً منطبق بر میانه ارزش‌های نمونه‌برداری شده است و مقایسه‌ی نتایج این تحقیق با یافته‌های حاصل از واسنجی دستی نشان داد که بسته‌ی بهینه‌سازی hydroPSO می‌تواند با موفقیت با مدل K2 تلفیق شود و با سرعت و کارآیی بالایی پارامترهای مدل را واسنجی و بهینه‌سازی کند.

واژگان کلیدی: hydroPSO، KINEROS2، رواناب - بارش، بهینه‌سازی انبوه ذرات، دبی آب، شبیه‌سازی.

۱- مقدمه

به منظور داشتن در کی بهتر از مسائل هیدرولوژیک، شبیه‌سازی بارش – رواناب در حوضه‌های آبخیز امری ضروری است (Neitsch et al, 2011). در این میان، مدل‌های فیزیکی در بستر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به عنوان ابزاری ضروری در درک فرآیندهای طبیعی حوزه آبخیز عمل می‌کنند (Sorooshian and Gupta, 1995 & Memarian et al, 2013).

مدل هیدرولوژیک KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion) یا K2 - که در این تحقیق از آن استفاده شده است – توسط سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده (USDA-ARS) در اواخر دهه ۶۰ میلادی به عنوان مدلی برای روندیابی رواناب حاصل از دامنه پایه‌گذاری شد (Tajbakhsh et al, 2018). در KINEROS، هر دامنه یا شیب به وسیله‌ی آبشاری از صفحات جریان بالادستی (Onstand and Brakensiek, 1968) مدل شد، سپس این جریان به درون کanal روانه شد (Woolhiser et al, 1970). پس از تصحیحات و تغییرات زیادی که بر روی نسخه‌ی اولیه‌ی مدل KINEROS انجام شد، نسخه‌ی بهبود یافته‌ی آن در سال ۱۹۹۰ توسط وولهایزر و همکاران (۱۹۹۰) ارائه شد.

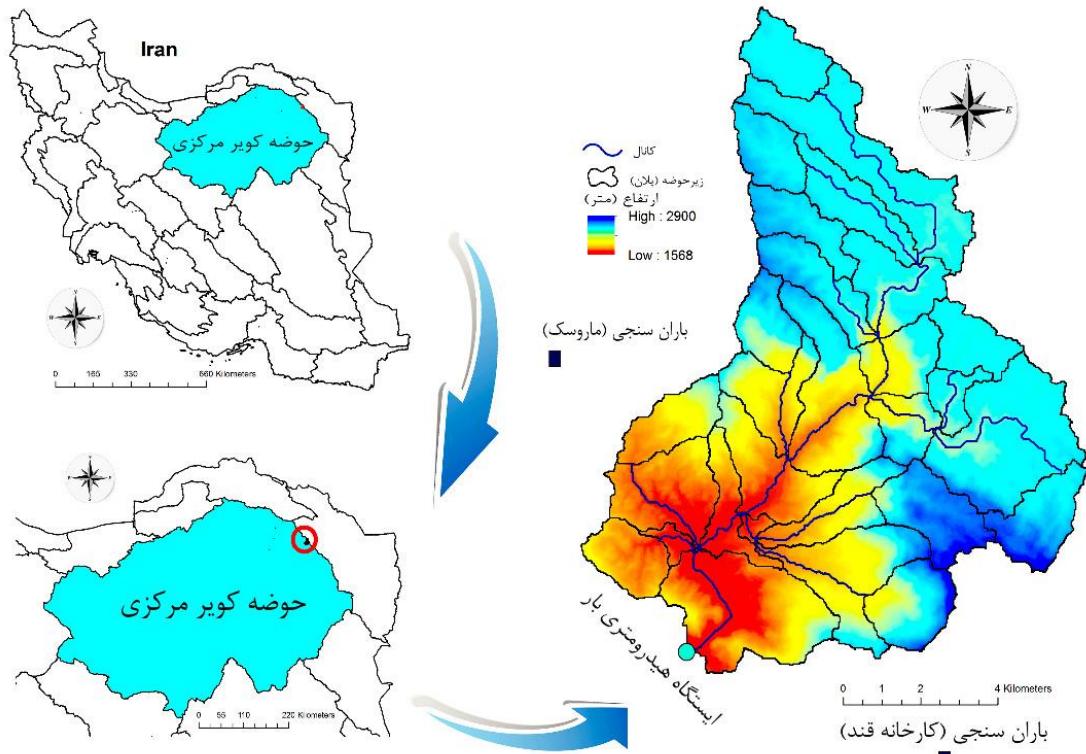
اینک تحقیقات مرتبط با تعیین بهینه پارامترها در مدل‌های عددی و فیزیکی با چند چالش جدی روبروست؛ از جمله مشکل وجود چندین بهینه محلی، بی‌نظمی عددی و سطح پاسخ غیرمحدب، و استگی غیرخطی پارامترها، اثر متقابل حدود پارامترها بر یکدیگر، ایجاد نقاط زینی جایی که مشتق اول به سمت صفر متمايل می‌شود، داده‌های نامرتبط و پرت و انحراف، خودهمبستگی، ناهمسانی و واریانس متغیر در خطای باقیمانده (Zambrano-Bigiarini and Rojas, 2013 & Beven and Binley, 1992). به منظور حل مشکلات ذکر شده در بالا، الگوریتم‌ها و روش‌های واسنجی و بهینه‌سازی فراابتکاری ارائه شده است که Partical Swarm Optimization (PSO) (Kennedy and Eberhart, 1995) یکی از آنهاست. الگوریتم PSO به علت انعطاف‌پذیری، اجرای آسان و کارآیی بالا از سوی بسیاری از محققان قابل توجه بوده است. این روش، سرعت همگرایی بالا و در نتیجه هزینه محاسباتی مناسبی دارد (Parsopoulos and Vrahatis, 2002). کاربردهای الگوریتم PSO در منابع آب زیاد بوده و در سال‌های اخیر، استفاده از این الگوریتم در تخمین پارامترهای مدل‌های هیدرولوژیکی افزایش یافته است (Baltar and Fontane, 2004 & Gill et al, 2006 & Jiang et al, 2010 & Memarian et al, 2019). در همین راستا، عبدالعزیز و زامبرانویگیارینی (۲۰۱۴)، قابلیت و کارآیی بسته‌ی نرم‌افزاری hydroPSO برای بهینه‌سازی مدل‌های هیدرولوژیکی را در محیط نرم‌افزار R در حوزه آبخیز Geneiss آلمان مطالعه کردند و نشان دادند که علاوه بر مفید بودن روش PSO در بهینه‌سازی مدل‌سازی با MODFLOW، استفاده از بسته‌ی hydroPSO می‌تواند با کاهش تعداد تکرارهای مورد نیاز برای رسیدن به مقدار بهینه، زمان محاسبه‌ی مدل‌سازی را تا یک هشتاد کل زمان مورد نیاز کاهش دهد که این امر به دلیل استفاده از سیستم پردازش موازی در این بسته است. زامبرانویگیارینی و رجاس (۲۰۱۳) به منظور واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی، از بسته‌ی hydroPSO به عنوان بسته‌ای مجزا در نرم‌افزار R استفاده کردند و hydroPSO را با الگوریتم‌های استاندارد (SCE_UA, DE, DREAM, SPSO-, and GML) با کاربرد یکسری از توابع ارزیابی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که HydroPSO، روشی مناسب و کارآمد در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی متداول است. هدف از این مطالعه

نیز تلفیق مدل هیدرولوژیکی K2 با بسته‌ی بهینه‌سازی hydroPSO برای تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل در حوزه آبخیز بار نیشابور (یکی از حوضه‌های سیل خیز و کوهستانی در استان خراسان رضوی) است تا بتوان با غلبه بر مشکلات ناشی از واسنجی با الگوریتم‌های معمول، مدل K2 را به عنوان یک ابزار معتبر پشتیبان تصمیم‌گیری معرفی کرد.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد مطالعه‌ی حوزه آبخیز بار نیشابور به مساحت ۱۱۳۸۸ هکتار، در جنوب غربی رشته‌کوه‌های بینالود قرار دارد. از شمال به حوزه آبخیز بازه سرحدار و منطقه‌ی هفت‌چاه، از جنوب به حوزه آبخیز طاغان، از شرق به حوزه آبخیز فریزی و از غرب به حوزه آبخیز بقیع محدود می‌شود. در دوره‌ی ۳۰ ساله (۱۳۶۵ تا ۱۳۹۵)، متوسط درجه حرارت سالانه $5/4$ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه $330/4$ میلی‌متر است. این حوزه آبخیز در بخش‌های جنوبی و جنوب‌شرقی شبیه زیادی دارد و شبیه متوسط آن $32/6$ درصد محاسبه شده است. در حوضه‌ی موردنظر، رودخانه‌ی فصلی بار با طول آبراهه اصلی $22/5$ کیلومتر و شبیه متوسط $4/2$ درصد جریان دارد که به دشت نیشابور منتهی می‌شود

.(Tavasoli et al, 2010)



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز بار در حوزه‌ی کویر مرکزی، استان خراسان رضوی و کشور

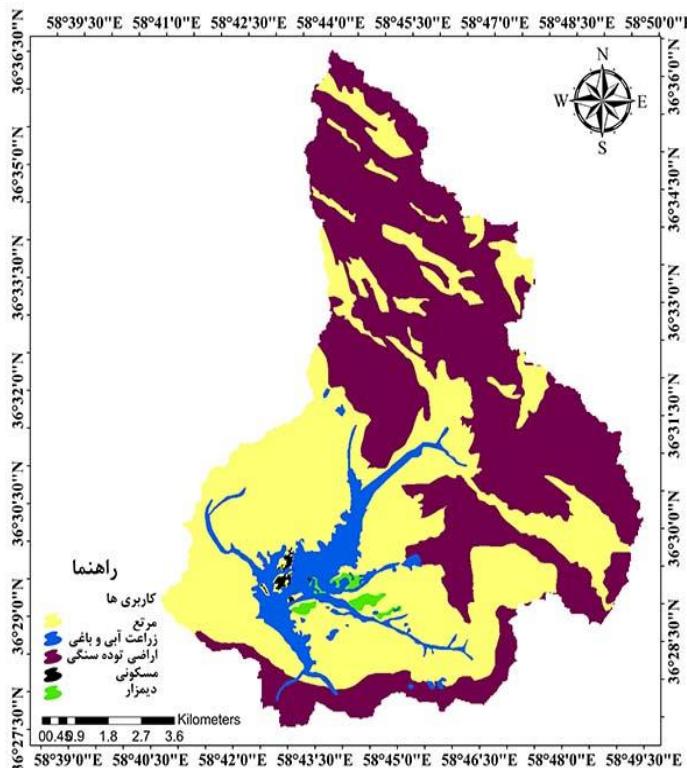
۳- مواد و روش

مجموعه داده‌های هیدرولوژیکی دبی آب و بار رسوب و داده‌های بارش در رگبارهای مختلف، از ایستگاه باران‌سنجی ماروسک، کارخانه قند نیشابور، ایستگاه هیدرومتری بار در حوزه مورد مطالعه و از بانک اطلاعاتی آب منطقه‌ای خراسان رضوی جمع‌آوری شد (جدول ۱).

جدول ۱: ویژگی‌های رگبارهای انتخاب شده برای شبیه‌سازی هیدرولوژیک

شماره رگبار	تاریخ	بارش متر مکعب	مدت (دقیقه)	بارش	
				میلی متر	متر مکعب
۱	۱۳۶۹/۱۲/۱۶	۱۲۸۶۸۴۴	۱۱/۳	۵۴۰	
۲	۱۳۷۰/۰۲/۲۱	۲۰۹۵۳۹۲	۱۸/۴	۴۶۵	
۳	۱۳۷۰/۱۲/۲۶	۱۰۹۳۲۴۸	۹/۶	۶۷۵	
۴	۱۳۷۱/۰۱/۱۱	۱۵۸۲۹۳۲	۱۳/۹	۳۰۰	
۵	۱۳۷۳/۰۹/۱۳	۱۰۲۴۹۲۰	۹	۷۶۵	

نقشه‌ی کاربری اراضی نیز بر اساس مطالعات آبخیزداری انجام شده در حوضه، توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی استخراج و بهره‌برداری شد (شکل ۲).



شکل ۲: نقشه‌ی کاربری اراضی حوزه آبخیز بار نیشابور (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۲۰۰۳)

مدل KINEROS

KINEROS یک مدل فیزیکی در زمینه برسی میزان فرسایش و روندیابی رواناب سطحی است. KINEROS^۲ (K2)، نسخه بروزرسانی شده این مدل است (Woolhiser et al, 1990) که در یک رابط کاربر گرافیکی (AGWA) در محیط نرم‌افزار ArcGIS اجرا می‌شود. K2 به عنوان یک مدل توزیعی و پویا – که مبتنی بر رخدادهای بارشی است – به پیش‌بینی رواناب سطحی، تلفات فرسایش، میزان نفوذ و عمق نگهداشت حوزه آبخیز می‌پردازد و هر حوزه را به‌وسیله‌ی مجموعه‌ای از صفحات حاوی جریان بالادستی، جریان کانالی و چالاب‌ها مدل‌سازی می‌کند (Semmens et al, 2008 & Tajbakhsh et al, 2018). در این مدل، صفحات حاوی جریان بالادستی خود می‌تواند به بخش‌هایی با شیب‌ها، ناهمواری‌ها، خاک‌ها و کاربری‌های متفاوت تقسیم‌بندی شود. همچنین سطوح پیوسته می‌توانند عرض‌های متفاوتی داشته باشند (Semmens et al, 2008). در مدل مفهومی جریان بالادستی، تغییرات کوچک مقیاس نفوذ پارامتری می‌شود و میکروتوپوگرافی نیز در شبیه‌سازی قابل توجه قرار می‌گیرد. مدل‌سازی در بخش شهری، مبتنی بر محاسبه‌ی رواناب از بخش‌های نفوذپذیر و نفوذناپذیر است (همان). در مدل K2، نفوذ پویا بوده و در ارتباط با بارش و رواناب است. مدل مفهومی نفوذ می‌تواند دو لایه را در پروفیل خاک درج کند و توزیع مجدد رطوبت خاک را در زمان توقف رگبار انجام دهد (Memarian et al, 2012). در این مدل، داده‌های بارندگی به صورت سری عمق تجمعی در زمان یا شدت در زمان وارد می‌شود. عمق برگاب در بارش نیز قبل از محاسبه نفوذ مشارکت بیان می‌شود. نفوذ نیز با رابطه‌ی پارالانژ (۱۹۸۲) در مدل K2 وارد می‌شود. در این مدل، جریان سطحی به عنوان جریانی یک بعدی لحاظ شده است که با تقریب موج سینماتیک و روش عددی اختلاف محدود حل می‌شود. رابطه‌ی جریان در کانال‌های شبیه‌سازی شده، توسط مدل KINEROS^۲ از طریق رابطه‌ی سنت ونانت در کanal بررسی می‌شود (همان).

الگوریتم بهینه‌سازی hydroPSO

این الگوریتم در ابتدا با یک مجموعه (Swarm) جواب‌های تصادفی شروع می‌شود. هر عضو این مجموعه، ذره نامیده می‌شود. هدایت ذرات به این صورت انجام می‌شود که تمامی ذرات بهترین موقعیتی را که در طی فرآیند جستجو کسب کرده‌اند، تحت عنوان Pbest در حافظه‌ی خود ذخیره می‌کنند. از طرفی، بهترین موقعیتی که تا هر مرحله توسط تمامی ذرات به دست آمده است نیز تحت عنوان Gbest حفظ می‌شود (Kennedy and Eberhart, 1995 & Garmehai et al, 2014). در این الگوریتم، تمامی ذرات براساس یک میانگین وزنی با مؤلفه‌های تصادفی به سمت جواب‌های بهتر یعنی Pbest و Gbest حرکت می‌کنند تا در نهایت، به نقطه‌ی واحدی همگرا شوند. در الگوریتم مورد استفاده در این مطالعه، δ_{norm}^t شاخصی برای تعیین میزان همگرایی الگوریتم است (Abdelaziz and Zambrano-Bigiarini, 2014). به منظور اجرای الگوریتم بهینه‌سازی PSO، از بسته‌ی hydroPSO در محیط نرم‌افزاری R استفاده شد (Zambrano and Rojas, 2013 & Memarian et al, 2019).

ارزیابی مدل

معیارهای آماری مورد استفاده در این مطالعه، اریبی یا انحراف مدل (MB)، ضریب همبستگی اصلاح شده (r_{mod}) و ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) است (Safari et al, 2009 & Nash and Sutcliffe, 1970).

برای سنجه MB صفر است؛ در حالی که برای دیگر سنجه‌ها ۱ است. برای ارزیابی صحت اندازه، شکل و مقدار هیدروگراف شبیه‌سازی شده، از معیار AM^۱ یا سنجه‌ی تجمعی استفاده می‌شود که میزان ایده‌آل این سنجه نیز ۱ است که تطابق ۱۰۰٪ داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد (Memarian et al, 2013). جداول ۲، طبقات مختلف کارآیی مدل بر اساس سنجه AM را نشان می‌دهد.

جدول ۲: طبقات مختلف کارآیی مدل بر اساس سنجه AM (صفری و همکاران، ۲۰۰۹)

نیکویی برازش	Aggregated Measure (AM)
عالی	>0/85
خیلی خوب	0/70-0/85
خوب	0/55-0/70
ضعیف	0/40-0/55
خیلی ضعیف	<0/4

پارامترهای مدل در فرایند بهینه‌سازی

در این مطالعه با تغییر برخی کدهای مدل k2 در زبان فرترن، تعداد پارامترهای قابل واسنجی به ۱۶ پارامتر (جدول ۳) افزایش یافت و به عنوان پارامترهای تأثیرگذار بر هیدروگراف سیلان، به مدل معرفی و وارد شد. بدین ترتیب، پاسخ حوضه به تغییر مقادیر این پارامترها – که برای کanal و دامنه تفکیک شده‌اند – به خوبی قابل ارزیابی است. روش تغییر مقدار برای هر پارامتر با توجه به نیمه توزیعی بودن مدل شبیه‌سازی، از طریق «تغییر نسبی» در مقدار اولیه با مقدار پیش فرض و با استفاده از روش ضرب کننده یا Multiplier (Memarian et al, 2013) انجام شد.

^۱ Aggregated Measure

جدول ۳: پارامترهای مدل k_2 برای ورود در فرآیند بهینهسازی توسط hydroPSO

شماره	نامه	پارامتر	دامنه عددی توصیه شده در منابع	منبع	دامنه عددی ضرب کننده موردن استفاده در این مطالعه	
					دامنه باپیش	دامنه بالای
۱	Ks_p	Saturated hydraulic conductivity (mm.h^{-1})_planes هدایت هیدرولیکی اشباع - دامنه	0.6-210. 0.22- 266.3 0.3-73.3	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)	۰/۲	۲
۲	Ks_c	Saturated hydraulic conductivity (mm.h^{-1})_channels هدایت هیدرولیکی اشباع - کanal	17.2- 48.3 0-10 1.46- 63.27		۰/۰.۵	۲
۳	n_p	Manning's roughness coefficient_planes ضریب زبری مانینگ - دامنه	0.1-0.63 0.053- 0.8 0.01-0.1	Woolhiser et al. (1990) Al-Qurashi et al. (2008) Memarian et al. (2012)	۱	۶
۴	n_c	Manning's roughness coefficient_channels ضریب زبری مانینگ - کanal	0.09- 0.64		۱	۶
۵	CV_p	Coefficient of variations of Ks_planes ضریب تغییرات Ks - دامنه	0.1-2.0 0.02- 27.3 1.6-7.6 0.57- 0.95	http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/ Guber et al. (2011) Memarian et al. (2012) Wagener and Franks (2005)	۰/۱	۳
۶	G_p	Mean capillary drive (mm)_planes	50.0- 410	http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/	۰/۱	۲
۷	G_c	Mean capillary drive (mm)_channels میانگین نیروی کاپیلاری - کanal	46.0- 407 1.0-263 100-306 1.0-10.0	Woolhiser et al. (1990) Guber et al. (2009) Guber et al. (2011) Memarian et al. (2012)	۰/۱	۲
۸	In	Interception depth (mm) عمق گیرش	0.5-4.1 4.77- 101.3	Woolhiser et al. (1990) Wagener and Franks (2005)	۰/۵	۳
۹	Cov	Percent of surface covered by intercepting cover درصد پوشش گیرنده	1.0 34.5- 46.5 5.0-90	Kasmaei et al. (2015) Vatseva et al. (2008) Koster (2013)	۰/۳	۳
۱۰	Rock	Volumetric rock fraction ضریب حجمی سنگ و سنگ- ریزه	0.57- 0.62 0.1 0.011- 0.193	Wagener and Franks (2005) Kennedy et al. (2012) Koster (2013)	۰/۵	۳
۱۱	Por_p	Porosity_planes تخلخل - دامنه	0.44- 0.46 0.25-	Wagener and Franks (2005) Kasmaei et al. (2015) Koster (2013)	۰/۲	۳

۱۲	Por_c	Porosity_channels تخلخل - کanal	0.35 0.42- 0.56		۰/۱	۲
۱۳	Dist_p	Pore size distribution index_planes شاخص توزیع اندازه ذرات - دامنه	0.15- 0.694 0.14- 1.43 0.25- 0.54 0.16- 0.40	Meyer et al. (1997) Wagener and Franks (2005) Koster (2013)	۰/۲	۲
۱۴	Dist_c	Pore size distribution index_channels شاخص توزیع اندازه ذرات-دامنه			۰/۵	۲
۱۵	Smax	Maximum soil saturation حداکثر اشباع خاک	0-10 0.85 0.4-0.58	Al-Qurashi et al. (2008) Memarian et al. (2012) Koster (2013)	۰/۲	۱
۱۶	Sat	Initial soil saturation اشباع اولیه‌ی خاک	0-0.5 0.4 0.19- 0.32	Al-Qurashi et al. (2008) Wagener and Franks (2005) Koster (2013)	۰/۱	۲

۴- یافته‌ها (نتایج)

مقادیر دبی شبیه‌سازی شده برای وقایع مختلف و میزان تغییرات آن، در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که بهترین شبیه‌سازی در خصوص دبی میانگین و دبی اوج، به واقعه‌ی ۷۱/۰۱/۱۱ بازمی‌گردد.

جدول ۴: مقایسه‌ی دبی میانگین و دبی اوج شبیه‌سازی شده نسبت به میزان مشاهده شده در وقایع رگباری مختلف

واقعه‌ی بارشی					دبی (مترمکعب بر ثانیه)
۱۳۷۳/۹/۱۳	۱۳۷۱/۱/۱۱	۱۳۷۰/۱۲/۲۶	۱۳۷۰/۲/۲۱	۱۳۶۹/۱۲/۱۶	
۱/۵۲	۲/۵۲	۰/۸۵	۰/۷۱	۰/۶۳	میانگین دبی شبیه‌سازی شده
۱/۴۲	۲/۵۶	۱/۰۰	۰/۸۱	۰/۶۲	میانگین دبی مشاهده شده
۷/۰۴	۰/۳۹	-۱۵/۰۰	-۱۲/۳۵	۰/۸۱	درصد اختلاف نسبت به مشاهده‌ای
۳/۵۴	۱۱/۹۰	۴/۵۸	۲/۶۵	۲/۵۲	دبی اوج شبیه‌سازی شده
۷/۶۰	۱۱/۶۰	۵/۰۰	۲/۸۷	۳/۳۶	دبی اوج مشاهده شده
-۵۳/۴۲	۲/۵۹	-۸/۴۰	-۷/۶۷	-۲۵/۰۰	درصد اختلاف نسبت به مشاهده‌ای

در ادامه، نتایج ارزیابی مدل در جدول ۵ ارائه شده است. به‌طور کلی، با توجه به سنجه AM (۰/۹۷) می‌توان گفت که بهترین نیکویی برآش، برای واقعه‌ی رگباری ۷۱/۰۱/۱۱ به‌دست آمده است که پس از آن به ترتیب وقایع ۶۹/۱۲/۱۶، ۷۰/۱۲/۲۶ و ۷۰/۱۲/۲۱ (به ترتیب با AM برابر با ۰/۹۴، ۰/۹۰ و ۰/۸۷) قرار دارد. با توجه به سنجه MB، مدل بهینه‌سازی hydroPSO برای شبیه‌سازی سیلاب در وقایع ۱۲/۱۶، ۶۹/۱۲/۱۱ و ۷۱/۰۹/۱۳ دچار تخمین بیش از حد^۱ شده، اما در مورد وقایع رگباری ۷۰/۰۲/۲۱ و ۷۰/۱۲/۲۶ مجبور به تخمین کمتر از حد^۲ شده است. در شاخه‌ی بالارونده و پایین رونده‌ی

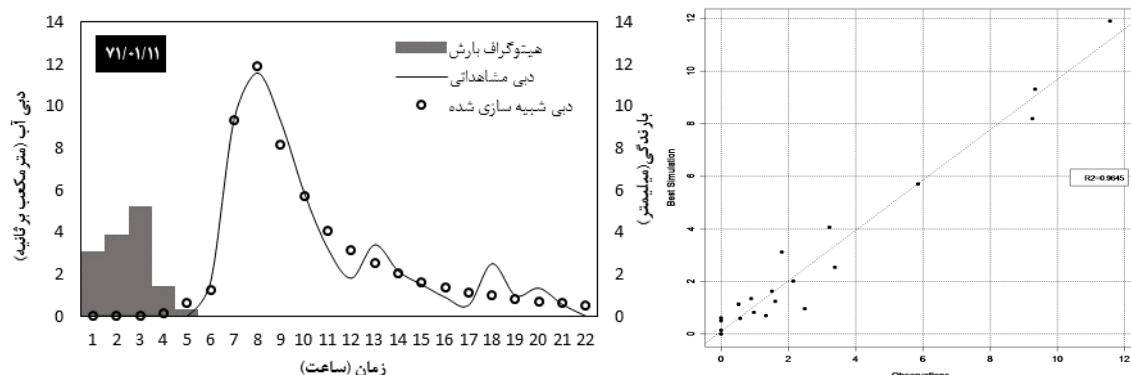
¹ overestimation² underestimation

هیدروگراف نسبت به جریان واقعی، برخی انحرافات دیده می‌شود که در مورد رگبار ۷۳/۰۹/۱۳ این موضوع شدیدتر است. این مشکل می‌تواند از استفاده از یک ایستگاه و اعمال یک رگبار ایزووله بر کل سطح حوضه برگرفته باشد (Tajbakhsh et al, 2018 & Memarian et al, 2012 & Hernandez et al, 2000).

جدول ۵: سنجه‌های ارزیابی مدل برای شبیه‌سازی مبتنی بر واقعی بارشی

واقعی رگباری					سنجه‌های مورد ارزیابی
۷۳/۰۹/۱۳	۷۱/۰۱/۱۱	۷۰/۱۲/۲۶	۷۰/۰۲/۲۱	۶۹/۱۲/۱۶	
۰/۰۷	۰/۰۰۳	-۰/۱۵	-۰/۱۱	۰/۰۰۳	MB
۰/۴۰	۰/۹۵	۰/۸۹	۰/۹۳	۰/۹۳	r_{mod}
۰/۴۳	۰/۹۶	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۰	NSE
۰/۵۹	۰/۹۷	۰/۸۷	۰/۹۰	۰/۹۴	AM
خوب	عالی	عالی	عالی	عالی	نیکویی برازش

با توجه به معیارهای مورد ارزیابی در این پژوهش و بر اساس واقعه‌ی رگباری ۷۱/۰۱/۱۱ مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی سیلان در این واقعه ضمن کارآیی بیشتر و خطای کمتر، با داده‌های واقعی همبستگی بیشتری داشته است (شکل ۳). همچنین با توجه به سنجه R^2 ، نتایج بیانگر تطبیق بهتر دبی شبیه‌سازی شده با دبی مشاهداتی برای واقعه‌ی رگباری ۷۱/۰۱/۱۱ است. ضریب تبیین حاصل از مقایسه‌ی دبی شبیه‌سازی شده با دبی اندازه‌گیری شده‌ی این واقعه، برابر با ۰/۹۶۴۵ است (شکل ۳) که نشان می‌دهد بخش زیادی از واریانس متغیر پاسخ یعنی دبی آب، به وسیله‌ی مدل توصیف و توجیه می‌شود. پس از این واقعه، بهترین ضریب تبیین ($R^2 = 0/۹۱۹۲$) برای واقعه‌ی ۷۰/۰۲/۲۱ به دست آمد. برای وقایع ۷۰/۱۲/۲۶ و ۶۹/۱۲/۱۶ نیز به ترتیب ضرایب تبیین ۰/۹۱۸۳ و ۰/۹۱۰۸ به دست آمد. اما ضعیف‌ترین نتیجه‌ی شبیه‌سازی مدل بهینه‌سازی hydroPSO، برای واقعه‌ی رگباری ۷۳/۰۹/۱۳ با ضریب تبیین ۰/۴۴۱۶ ثبت شد. نتایج نشان داد دبی پیک محاسبه شده نسبت به دبی پیک شبیه‌سازی شده برای وقایع مختلف، مقداری اختلاف دارد؛ این تفاوت در واقعه‌ی بارشی ۷۱/۰۱/۱۱، ۷۱/۱۲/۱۶، ۶۹/۱۲/۲۱، ۷۰/۰۲/۲۶، ۷۰/۱۲/۲۶، ۷۰/۰۹/۱۳ و ۷۳/۰۹/۱۳ پیک شبیه‌سازی شده به پیک واقعی ۰/۲٪ بیشتر است، اما در رگبارهای هیدروگراف مشاهداتی است. بنابراین بیشترین اختلاف، در وقایع رگباری ۷۳/۰۹/۱۳ و ۶۹/۱۲/۱۶ و کمترین اختلاف، در واقعه‌ی ۷۱/۰۱/۱۱ مشاهده می‌شود. در مجموع، می‌توان گفت که این مدل برای تطبیق بیشتر هیدروگراف شبیه‌سازی شده با هیدروگراف مشاهداتی، تمایل بیشتری به تخمین کمتر دبی پیک دارد.



شکل ۳: دبی شبیه‌سازی شده در برابر مشاهداتی همراه با هیتوگراف بارش بر اساس واقعه‌ی رگباری ۱۳۷۱/۱۰/۱۱

تحلیل حساسیت پارامترهای مدل K2 نیز به روش بررسی تکامل همگرایی ارزش پارامترها، بهینه عمومی و شعاع انبوه ذرات نرمال شده NSR^۱) انجام شد. تکامل ۱۶ پارامتر مورداستفاده در فرآیند واسنجی در طی تکرارهای مختلف (۳۰۰ تکرار که در هر تکرار ۱۰۰ دسته پارتیکل یا ذره توسطتابع ارزیابی شده و در مجموع ۳۰۰۰۰)، در شکل ۴ ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشخص است، پارامترهای Por_p, ks_p, G_p, Rock, ks_c, n_c به ترتیب مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی است (با توجه به همگرا شدن ارزش‌ها به سمت یک عدد بهینه در طی ۳۰۰۰۰ ارزیابی توسط مدل) که این یافته در تحقیقات مختلف دیگری مانند مطالعات نیرینگ^۲ و همکاران (۲۰۰۵)، کانفیلد و گودربیج^۳ (۲۰۰۶)، مارتینز کارراس^۴ و همکاران (۲۰۰۷)، القریشی^۵ و همکاران (۲۰۰۸) و معماریان و همکاران (۲۰۱۳) به دست آمده و پشتیبانی می‌شود.

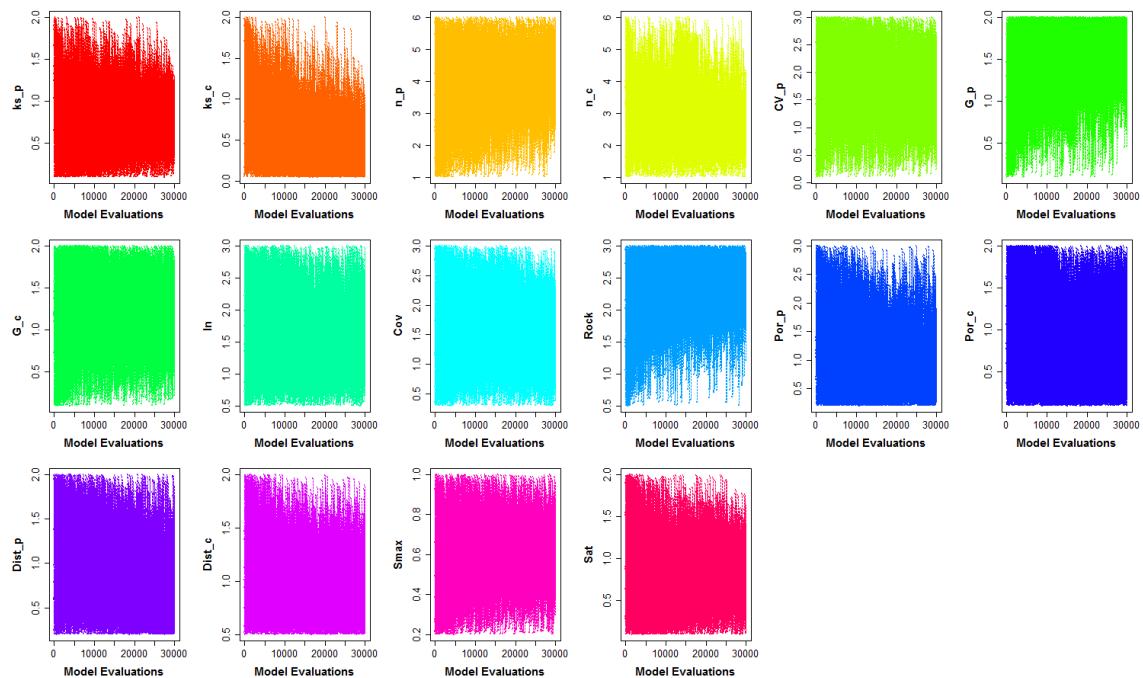
¹ Normalized Swarm Radius

² Nearing

³ Canfield and Goodrich

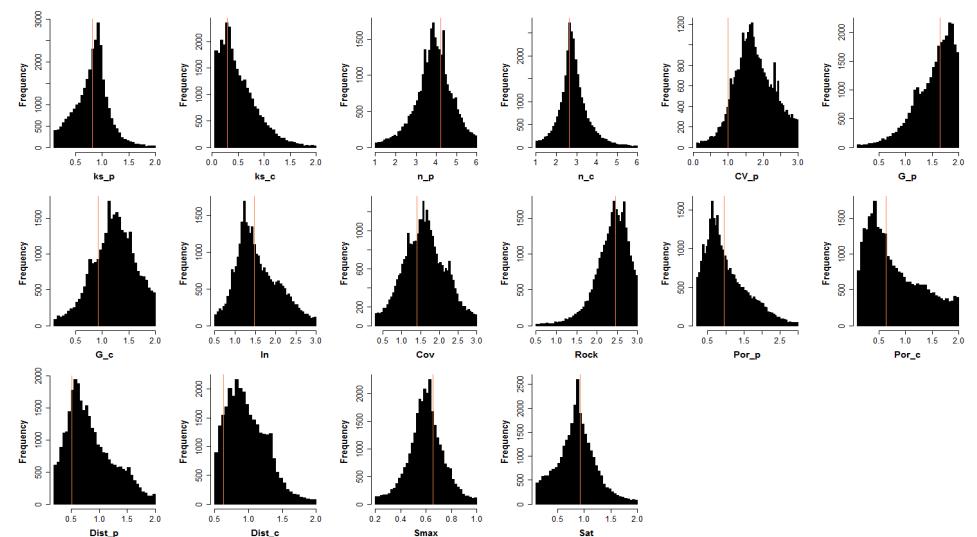
⁴ Martinez-Carreras

⁵ Al-Qurashi

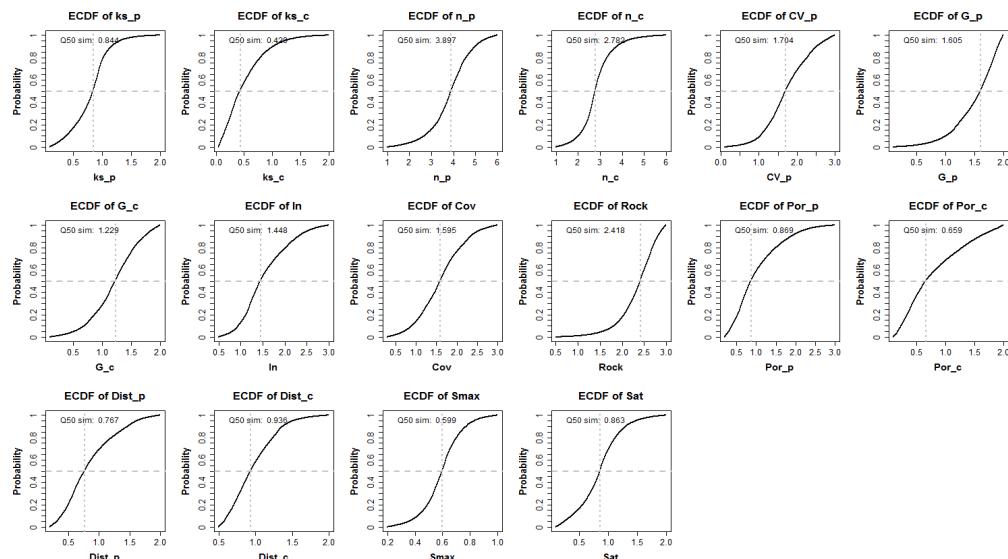


شکل ۴: ارزش پارامترها در طی فرآیند واسنجی در تکرارهای مختلف مبتنی بر واقعه‌ی بارشی ۱۳۷۱/۰۱/۱۱

در این مطالعه غیر از پارامترهای $Dist_c$ و por_c ، توزیع فراوانی ارزش‌ها در سایر پارامترها در اطراف مقدار بهینه، شکل زنگوله‌ای دارد و بیانگر تعریف و شناسایی نسبتاً مناسب پارامتر و ارزش بهینه‌ی آن است. شکل ۵-الف، هیستوگرام فراوانی ۱۶ پارامتر واردشده در فرآیند واسنجی را نشان می‌دهد. شکل تخت و مسطح هیستوگرام نیز بیانگر فقدان قطعیت محتمل در تعیین ارزش بهینه‌ی پارامترها است (Musau et al, 2015). تابع توزیع تجمعی تجربی (ECDF) هر پارامتر نیز در شکل ۵-ب نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که توزیع پارامترهای n_p , ks_p , G_c , ln , cov , $Rock$, por_c , $Dist_c$, $smax$, Sat از الگوی نرمال و نزدیک نرمال تبعیت می‌کند؛ در حالی که پارامترهای ks_c و por_c توزیع چوله‌داری به سمت ارزش‌های کمتر و $Rock$ توزیع چوله‌داری به سمت ارزش‌های بیشتر را در فرآیند واسنجی K2 نشان می‌دهد. توزیع فراوانی و هیستوگرام منطبق بر این توزیع در برخی از پارامترها مانند n_c و $Smax$ کاملاً زنگوله‌ای و باریک است که بیانگر فقدان قطعیت پایین آنها در فرآیند واسنجی است (Vrugt et al, 2008)، اما برخی از پارامترها مانند por_c و $Dist_c$ توزیع یکنواختی را در فرآیند نمونه‌برداری و واسنجی نشان می‌دهند که این می‌تواند معرف دو نوع خطا باشد که اولی از خطاهای ساختاری موجود در داده‌های ورودی سرچشمه می‌گیرد و دومی از عملکرد جبرانی مدل در رفع ضعف‌های ساختاری الگوریتم (Shafiei et al, 2004).



الف



ب

شکل ۵: ارزش‌های نمونه‌برداری شده‌ی پارامترها در فرآیند بهینه‌سازی بر اساس واقعه‌ی ۱۳۷۱/۰۱/۱۱. الف: هیستوگرام فراوانی ارزش‌های

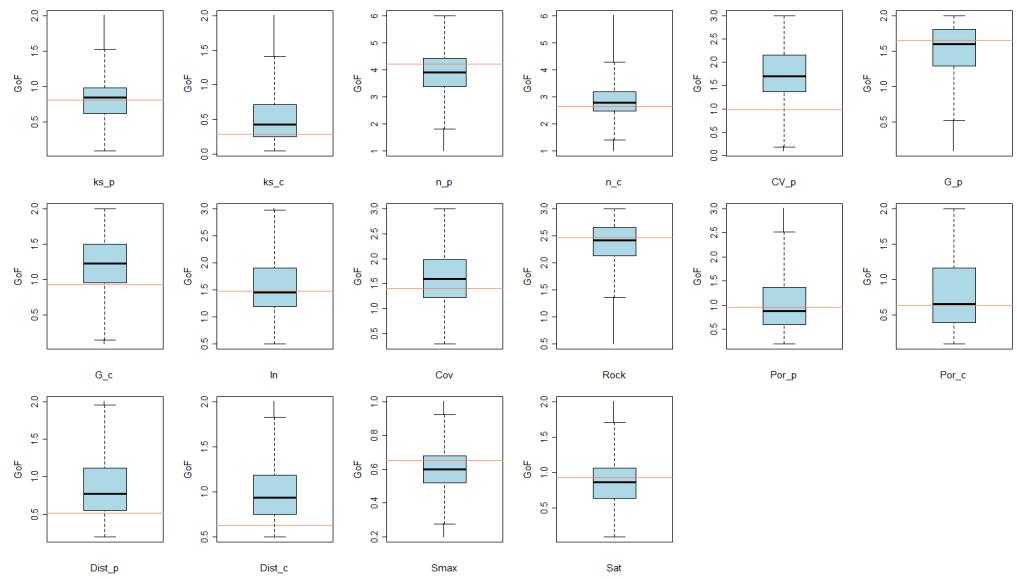
نمونه‌برداری شده‌ی پارامترها (خط قرمز عمودی بیانگر بهترین ارزش به دست آمده‌ی پارامتر است). ب: تابع توزیع تجمعی تجربی پارامترها (خط خاکستری نقطه‌چین افقی و عمودی بیانگر احتمال تجمعی ۵٪ به عنوان میانه توزیع است).

توزیع آماری ارزش‌های نمونه‌برداری شده توسط نمودارهای جعبه‌ای، در شکل ۶-الف نیز نشان داده شده است.

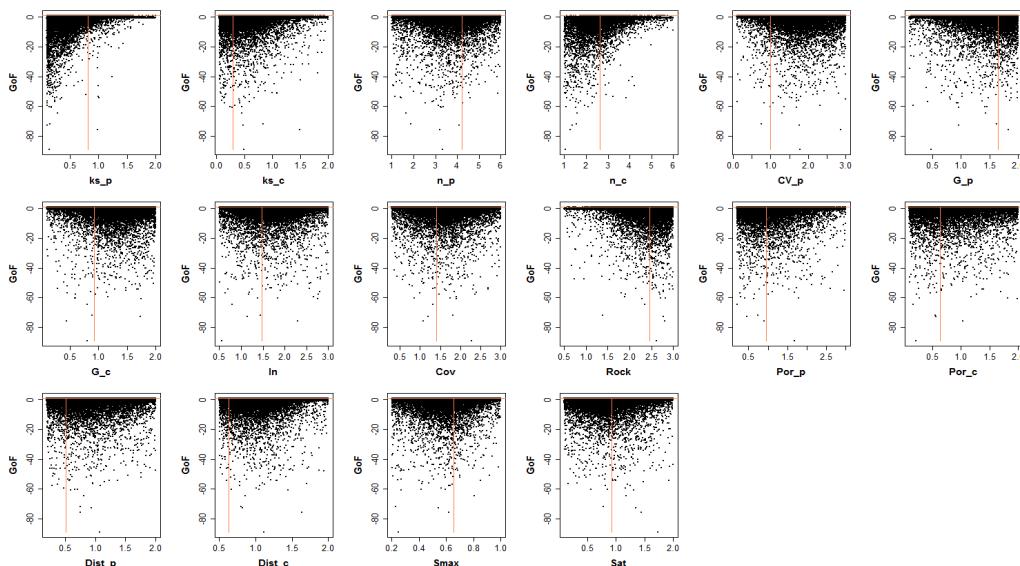
خطوط بالایی و پایینی در هر جعبه، به ترتیب اولین و سومین چارک را نشان می‌دهند. خط افقی درون جعبه نیز معرف چارک دوم به عنوان میانه است. حدود بالا و پایین نمودار نیز برابر با \sqrt{n}/IQR محسوبه می‌شود که دامنه‌ی میان چارکی و n ، تعداد نقاط نمونه‌گیری شده است. نمودارهای نقطه‌ای در شکل ۶-ب بیانگر ارزش پارامتر در برابر نیکویی برازش (NSE) منطبق بر آن در طی فرآیند بهینه‌سازی است که بهترین اجرای مدل منطبق بر بهترین Beven and Binley, 1992 & Abdelaziz and Zambrano-Bigiarini, 2014 را مشخص می‌کند ().

بررسی نمودارها نشان می‌دهد که عدد بهینه در پارامترهای n_c و n_p منطبق بر خط میانه است و دامنه‌ی

گسترش ارزش‌ها در چارک‌های مختلف نیز زیاد نیست. همچنین عدد بهینه در نمودار پارامتر Por_c , منطبق بر خط میانه است، ولی دامنه‌ی گسترش داده‌ها در چارک‌های دوم و سوم زیاد و بدترین حالت برای Dist_c و CV_p است که عدد بهینه بر خط میانه منطبق نیست و دامنه‌ی گسترش ارزش‌ها بالا است. شکل ۶-ب نشان می‌دهد که ارزش‌های بهینه‌ی پارامترهای Por_c و n_c نسبتاً درست تعریف شده‌اند، اما در مورد سایر پارامترها مقداری فقدان قطعیت وجود دارد؛ چرا که ناحیه‌ی اطراف ارزش بهینه، گستره‌تر و پراکنش ارزش‌های نمونه‌گیری شده بیشتر است.



الف



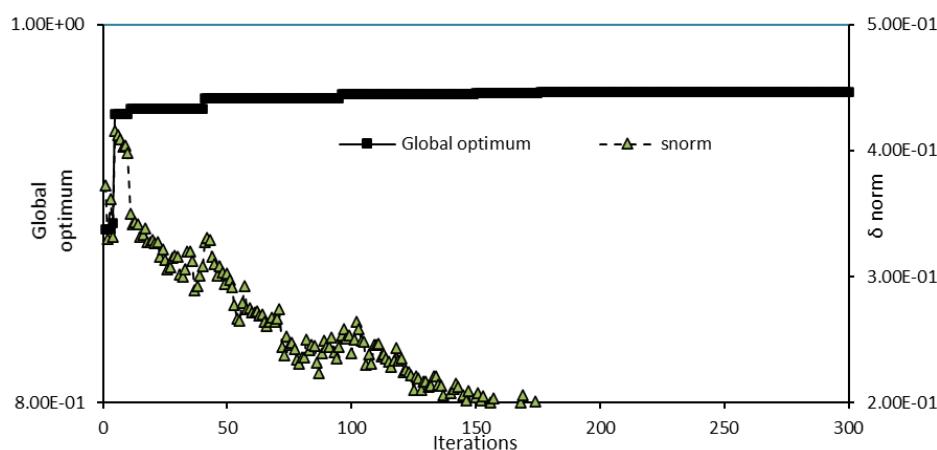
ب

شکل ۶: نمایش گرافیکی ارزش‌های پارامترهای نمونه برداری شده در طی فرآیند بهینه‌سازی بر اساس واقعه رگباری مورخ ۷۱/۰۱/۱۱ (الف) نمودار جعبه‌ای. (ب) ارزش پارامترها در برابر تابع هدف NSE، خطوط افقی و عمودی تعریف کننده ارزش بهینه به دست آمده برای هر پارامتر است.

در شکل ۷، تصویر 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 ناحیه‌ی جستجو - در برابر تعداد تکرارها بیان

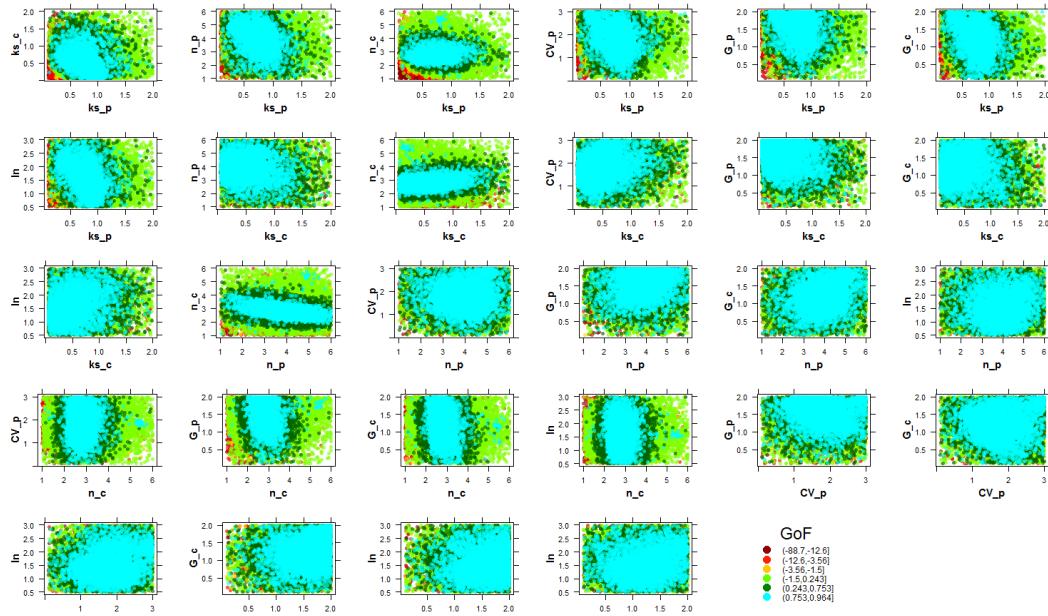
شده است. همان طور که در نمودار مشخص است، هم بهینه عمومی و هم شعاع انبوه ذرات نرمال شده، با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابد. خط بهینه عمومی – که همان میزان ارزش تابع هدف است – با افزایش تعداد تکرارها به سمت ارزش‌های بالاتری از تابع هدف متمایل می‌شود.

این وضعیت نشان می‌دهد که بخش زیادی از ذرات در محدوده کوچکی از فضای پاسخ، نوسان دارند (Zambrano-Bigiarini and Rojas, 2013); علاوه بر این، فقط ۵ تکرار (یعنی $5 \times 100 = 500$ اجرای مدل) برای یافتن منطقه‌ی بهینه عمومی کافی است و سایر تکرارها فقط برای بهبود و تصحیح جزئی جستجو به کار می‌روند.



شکل ۷: تکامل بهینه عمومی (Global optimum) و شعاع انبوه ذرات نرمال شده (δ) در طی ۳۰۰ تکرار مدل براساس واقعی بارشی شبیه‌سازی شده‌ی ۷۱/۱۰/۱۱

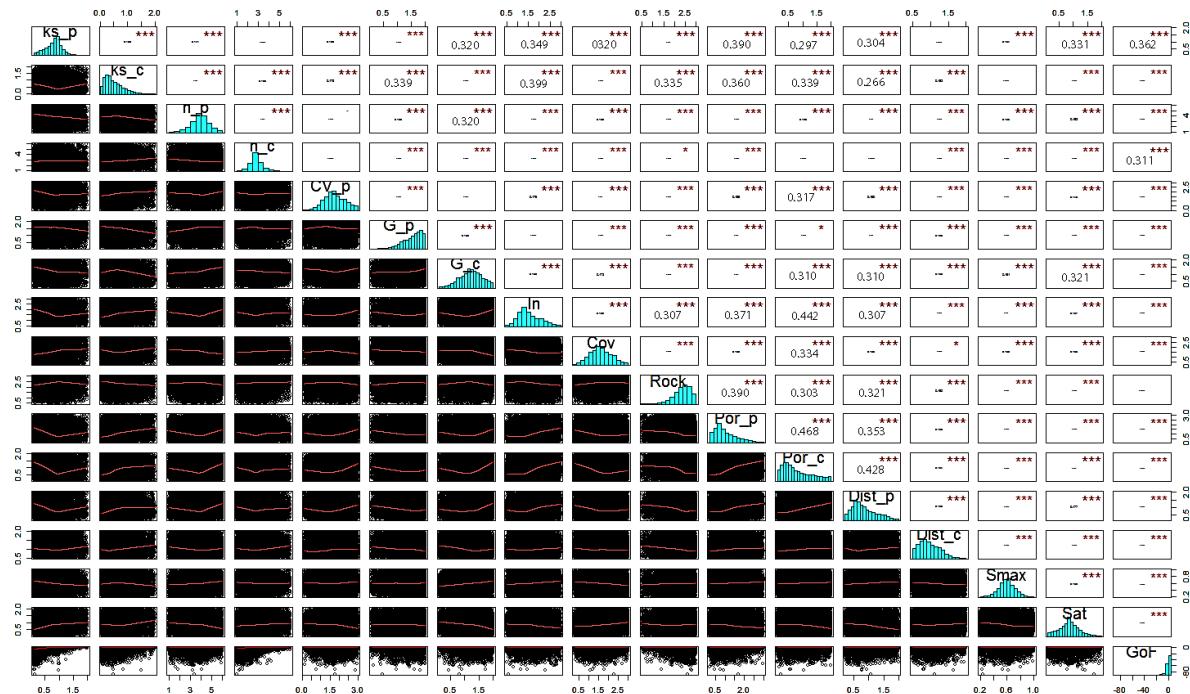
شکل ۸ نمودار نقطه‌ای سه بعدی است که اندرکنش پارامترها را (برای هر زوج پارامتر) به وسیله‌ی پلات کردن سطح پاسخ NSE بر روی فضای پارامتری نشان می‌دهد. به طور کلی، می‌توان گفت ذرات در نقاط مختلف فضای پارامتر پراکنده شده‌اند که این امر از قدرت اکتشاف PSO برای یافتن پاسخ مطلوب حکایت دارد. در این نمودار، محدوده‌هایی که دارای نقاط متقارن‌تری هستند، عملکرد ضعیف‌تر مدل در آن محدوده‌ها را نشان می‌دهند و محدوده‌هایی که نقاط متقارن‌تری دارند، بیانگر عملکرد بهتر مدل هستند که در مجموع، توان اکتشافی مدل را نشان می‌دهند (همان). همان طور که در شکل مشخص است، ارزش‌های بهینه کشف شده برای پارامتر n_c ، منطقه‌ی محدودی از فضای جستجوی پارامتر را اشغال کرده که این منطقه همان منطقه‌ی پاسخ با سطح کارآیی بالای مدل K2 است. همچنین می‌توان استنباط کرد که کارآیی مدل، بیشتر تحت تأثیر اندرکنش پارامترهای K_s و n است. پارامترهای G_p ، n_p و CV_p محدوده‌ی گسترده‌تری از سطوح بهینه را به خود اختصاص می‌دهند. در مورد سایر پارامترها با توجه به سطح جستجوی بهینه گسترده‌تر، می‌توان گفت که تغییرات این پارامترها میزانی از فقدان قطعیت را بر نتایج مدل تحمیل خواهد کرد (Shen et al, 2012).



شکل ۸: عملکرد مدل (NSE) در فضای پارامتری برای هر جفت از پارامترهای ورودی مدل در فرایند واسنجی براساس واقعی رگباری
۷۱/۰۱/۱۱

ماتریس همبستگی بین ارزش‌های پارامترها و راندمان مدل (NSE)، در شکل شماره‌ی ۹ نشان داده شده است. بخش بالای قطر ماتریس، ضریب همبستگی پیرسون بین جفت پارامترها و درجه‌ی معنی‌داری آماری آنها را نشان می‌دهد. در بخش پایینی نیز نمودارهای پراکنش دو متغیره بین هر ستون و ردیف از ماتریس تصویر شده است. همچنین در این نمودارها، یک خط با استفاده از تکنیک رگرسیون چند جمله‌ای موضعی وزن‌دار^۱ (Cleveland, 1979) بهترین نمودارها، یک خط با استفاده از تکنیک رگرسیون چند جمله‌ای موضعی وزن‌دار^۱ (Cleveland, 1979) همبستگی به ترتیب بین NSE و فاکتورهای Dist_p, Por_p, cov, In, G_c, CV_p, n_p, Ks_c, Ks_p, CV_d, G_d, G_c, Sat, Smax, Dist_c.

^۱ Locally-weighted polynomial regression



شکل ۹: ماتریس همبستگی بین پارامترها وتابع هدف NSE بر اساس شبیه‌سازی مبتنی بر وقایع ۱۳۷۱/۱/۱۱

مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با پژوهش سبحانی و همکاران (۲۰۱۸) – که واسنجی رگبارهای مورد نظر را به روش دستی انجام دادند – نشان می‌دهد که در پژوهش آنها بهترین واسنجی بر اساس معیارهای NSE و AM مربوط به رگبار ۷۰/۱۲/۲۶ است. ضریب NSE و AM برای دوره‌ی واسنجی این رگبار به ترتیب ۰/۷۸ و ۰/۷۷ بود. این در حالی - است که در پژوهش حاضر، مقادیر NSE و AM برای این رگبار ۰/۸۹ و ۰/۸۷ است و بهترین واسنجی انجام شده در این پژوهش به رگبار ۷۱/۰۱/۱۱ بازمی‌گردد؛ به طوری که ضرایب NSE و AM برای این رگبار به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۷ است. اما در پژوهش سبحانی و همکاران (۲۰۱۸)، مقادیر NSE و AM برای رگبار ۷۱/۰۱/۱۱ به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۶۸ بود. با توجه به موارد بیان شده مشخص می‌شود که استفاده از بسته‌ی بهینه‌سازی HydroPSO نسبت به استفاده از نتایج واسنجی دستی، به تغییرات و بهبود معنی‌داری در نتایج منجر شده است. ضمن اینکه سرعت واسنجی مدل با توجه به توان پردازش موازی به شدت افزایش یافته است و نمودارهای متنوع خروجی نیز توانست قابلیت تحلیل فقدان قطعیت، تحلیل حساسیت و بررسی اندرکنش پارامترها را به کار اضافه کند.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

این تحقیق با رویکرد افزودن ابزاری به بدنه‌ی مدل‌های تصمیم‌گیری و به کمک تلفیق مدل هیدرولوژیکی K2 با بسته‌ی بهینه‌سازی hydroPSO برای تحلیل حساسیت و واسنجی پارامترهای مدل در حوزه آبخیز بار نیشابور انجام شد. بدین منظور، از ۱۶ پارامتر ورودی به مدل و پنج رگبار انتخابی در حوزه آبخیز بار نیشابور در استان خراسان رضوی استفاده شد. سپس مدل K2 با توجه به تابع هدف NSE و سنجه‌های R^2_{mod} ، MB و AM در شبیه‌سازی دبی آب، ارزیابی و از نظر عملکردی تحلیل شد. مطابق نتایج، بهترین کارایی مدل در واقعه‌ی رگباری ۷۱/۰۱/۱۱ رخ داد که در این شبیه‌سازی، ضریب تبیین (R^2) حاصل از مقایسه‌ی دبی شبیه‌سازی شده با دبی واقعی برابر با ۰/۹۶۴۵ بود.

تحلیل حساسیت مدل با توجه به بهترین شبیه‌سازی در رگبار ۱۱/۰۱/۷۱ نشان داد که پارامترهای n_c , n_{c_p} , G_p , K_2 به ترتیب مهم‌ترین و مؤثرترین پارامترها در فرآیند واسنجی مدل هیدرولوژی هستند. توزیع فراوانی برخی از پارامترها مانند n_c و S_{max} دارای شکل زنگولهای با اوج تیزتر است که این خود بیانگر فقدان قطعیت کمتر تحمیل شده از جانب این پارامترها بر مدل است؛ اما برخی از پارامترها مانند por_c و $Dist_c$ توزیع فراوانی یکنواختی را نشان می‌دهند. این رفتار می‌تواند ناشی از دو نوع خطا باشد که اولی خطای سامان‌مند داده‌های ورودی است و دومی خطای ناشی از عملکرد مدل برای جبران ضعف‌های ساختاری. تحلیل همبستگی نیز نشان داد که بالاترین ضریب همبستگی NSE با پارامترهای $Dist_p$, Por_p , cov , In , G_c , cv_p , n_p , ks_c , ks_p , $Dist_c$, S_{max} و Sat به دست آمد. تفسیر چشمی نمودارهای جعبه‌ای نیز نشان می‌دهد که در پارامترهای ks_p و n_c , عدد بهینه منطبق بر خط میانه است و دامنه گسترش ارزش‌ها در چارک‌های مختلف زیاد نیست که ثابت می‌کند اکثر ذرات به سمت یک منطقه‌ی کوچک از فضای پاسخ هدایت شده‌اند. در طی فرآیند بهینه‌سازی، متغیرهای بهینه عمومی و شعاع انبوه ذرات نرمال‌شده روند کاهشی را هم‌زمان با افزایش تکرارهای الگوریتم نشان می‌دهند که این نیز دلیلی است بر همگرا شدن ذرات به سمت منطقه‌ی کوچکی از فضای پاسخ. نتایج این تحقیق نشان داد که تلفیق موفقیت‌آمیز بسته‌ی بهینه‌سازی hydroPSO با مدل K_2 , به‌طور هم‌زمان از مزایای مدل توزیعی هیدرولوژیک و مزیت محاسبات نرم و پردازش موازی بسته‌ی R بهره می‌برد.

۶- سپاس گزاری

این مقاله بر اساس نتایج مستخرج از پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی آبخیزداری دانشگاه بیرجند نوشته شده است که بدین وسیله از خدمات معاونت آموزشی و تحصیلات تکمیلی این دانشگاه تقدير و تشکر می‌شود.

منابع

1. Abdelaziz, R., & 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.; McIntyre, N.; Wheater, H.; & C. Unkrich, 2008. Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman, *Journal of Hydrology*, 355 (1), 91-105.
3. Baltar, A., & D. G. Fontane., (2004). A multi-objective particle swarm optimization model for reservoir operations and planning. Department of Civil and Environmental Engineering. Colorado State University. Fort Collins. Colorado.
4. Beven, K., & A. Binley., (1992). The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*. 6(3), 279-298.
5. Canfield, H., & 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.
6. FRWMO (2003). Watershed management studies of Bar watershed.
7. Garmehai, R.; Farid Hosseini, A.; & S. M. Hasheminia, 2014. Automatic calibration of HEC-HMS hydrological model using particle swarm optimization (PSO) algorithm (Case study: Kardeh Dam catchment). Second National Conference on Water Crisis (Climate Change, Water and Environment), Shahrekord. In persian
8. Gill, M. K.; Kaheil, Y. H.; Khalil, A.; McKee, M.; & L. Bastidas, 2006. Multi-objective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology, *Water Resources Research*, 42 (7), 17-35.

9. Hernandez, M.; Miller, S. N.; Goodrich, D. C.; Goff, B. F.; Kepner, W. G.; Edmonds, C. M.; & 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.
10. Jiang, Y.; Liu, C.; Huang, C.; & X. Wu, 2010. Improved particle swarm algorithm for hydrological parameter optimization, *Applied Mathematics and Computation*, 217 (7), 3207-3215.
11. Kennedy, J., & R. Eberhart., (1995). Particle swarm optimization. In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Networks, pp. 1942-1948.
12. Martínez-Carreras, N.; Soler, M.; Hernández, E.; & F. Gallart, 2007. Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees), *Catena*, 71 (1), 145-154.
13. Memarian, H.; Bilondi, M. P.; & Z. Komeh, 2019. Parameter Optimization of KINEROS2 Using Particle Swarm Optimization Algorithm within R Environment for Rainfall–Runoff Simulation, In Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences (pp. 117-146), Elsevier.
14. Memarian, H.; Balasundram, S. K.; Talib, J. B.; Teh Boon Sung, C.; Mohd Sood, A.; & 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.
15. Memarian, H.; Balasundram, S. K.; Talib, J.; Teh, C. B. S.; Alias, M. S.; Abbaspour, K. C.; & A. Haghizadeh, 2012. Hydrologic Analysis of a Tropical Watershed using KINEROS2, *Environment Asia*, 5 (1), 84-93.
16. Musau, J.; Sang, J.; Gathenya, J.; Luedeling, E.; & 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.
17. Nash, J. E., & J. V. Sutcliffe., (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10 (3), 282-290.
18. Neitsch, S. L.; Williams, J. R.; Arnold, J. G.; & J. R. Kiniry, 2011. Soil and water assessment tool, theoretical documentation, version 2009. Texas Water Resources Institute
19. Nearing, M. A.; Jetten, V.; Baffaut, C.; Cerdan, O.; Couturier, A.; Hernandez, M.; & V. Souchère, 2005. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover, *Catena*, 61 (2), 131-154.
20. Onstad, C. A., & D. L. Brakensiek., (1968). Watershed simulation by stream path analogy. *Water Resources Research*. 4 (5), 965-971.
21. Parsopoulos, K. E., & M. N. Vrahatis., (2002). Recent approaches to global optimization problems through particle swarm optimization. *Natural computing*. 1 (2-3), 235-306.
22. Shafiei, M.; Ghahraman, B.; Saghafian, B.; Davary, K.; Pande, S.; & 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.
23. Safari, A.; De Smedt, F.; & F. Moreda, 2009. WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP2), *Journal of Hydrology*, 418, 78-89.
24. Shen, Z. Y.; Chen, L.; & 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.
25. Semmens, D. J.; Goodrich, D. C.; Unkrich, C. L.; Smith, R. E.; Woolhiser, D. A.; & 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.
26. Sorooshian, S., & V. K. Gupta., (1995). Model calibration. *Computer models of watershed hydrology*, 23-68.

27. Tajbakhsh, S. M.; Memarian, H.; Sobhani, M.; & A. H. Aghakhani Afshar, 2018. Kinematic runoff and erosion model efficiency assessment for hydrological simulation of semi-arid watersheds, *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(2), 127-140.
28. Tavasoli, A.; Sadeghi, S. H.; & H. R. Moradi (2010). Simulating Intra-Storm Variation of Runoff Coefficient Using Precipitation Components for Neyshabour Bar Watershed, Iran. *Jwmseir*, 4 (10), 21-33.
29. Vrugt, J. A., & B. A. Robinson., (2007). Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimethod search. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104 (3), 708- 711.
30. Woolhiser, D. A.; Smith, R. E.; & D. C. Goodrich, 1990. KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
31. Woolhiser, D. A.; Hanson, C. L.; & A. R. Kuhlman, 1970. Overland flow on rangeland watersheds, *Journal of Hydrology (NZ)*, 9 (2), 336-356.
32. Zambrano-Bigiarini, M., & R. Rojas., (2013). A model-independent Particle Swarm Optimisation software for model calibration. *Environmental Modelling & Software*. 43, 5-25.

Use of HydroPSO in calibration of KINEROS2 hydrologic model to simulate runoff in semi-arid watersheds (Case study: Bar watershed, Neyshabour, Iran)

Fateme Pourhaghverdi¹: Ph.D Candidate in Watershed Management, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas , Iran

Hadi memarian: Associate professor, Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand , Southern Khorasan, Iran

Mohsen Pourreza Bailondi: Associate professor, WaterEngineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand , southern Khorasan. Iran

Seyed Mohamad Tajbakhsh: Associate professor, Watershed Management Department, Faculty of Natural Resources and Environment, University of Birjand , Southern Khorasan, Iran

Meysam Majidi: Assistant Professor, Water Engineering Department, Kashmar Higher Education Institute, Southern Khorasan, Iran

Article History (Received: 2020/11/26 Accepted: 2021/4/25)

Extended abstract

1- Introduction

Simulation of the rainfall-runoff process for planning and management of water resources and watersheds requires using a conceptual optimized hydrological model. Models of different types provide a means of quantitative extrapolation or prediction that will hopefully be helpful in decision-making. Recently, the application of models has become an essential tool for understanding the natural processes that have occurred in the watershed. KINEROS2 (Kinematic runoff and Erosion), or K2, originated at the USDA Agricultural Research Service (ARS) in the late 1960s as a model that routed runoff from hillslopes is represented by a cascade of overland-flow planes using the stream path analogy proposed by Onstad and Brakensiek (1968), laterally into channels. Manual calibration of hydrological models has been used since the early 1960s, but due to its complexity and being time-consuming, automatic calibration has been available since the end of the 1960s. Auto-calibration needs an appropriate objective function, search algorithm, and a criterion to complete the algorithm. The particle swarm optimization (PSO) algorithm, due to its flexibility, easy implementation, and high performance, has been favored by many researchers in recent years. This method has a high rate of convergence and suitable computational cost.

2- Methodology

In this study, the hydroPSO package was employed to optimize KINEROS2 (K2) parameters applied in the Bar watershed, Neyshabour, Iran. The hydroPSO package in R software environment was utilized to implement the PSO optimization algorithm. The possibility to develop R capabilities by adding the produced packages by the users is one of the most important specifications of this software. The statistical measures used in model validation analysis were model bias (MB), modified correlation coefficient (rmod), and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE). These metrics are the most common evaluation criteria in the literature. The capability of the model in water discharge estimation can be assessed by MB, while rmod signifies the differences both in hydrograph size and shape. In this work, 16 parameters have been introduced as the effective parameters on flood simulation by K2. These parameters were calibrated using the hydroPSO optimization package within R environment, which benefits from a parallel processing capability and a higher speed of computations, as compared with other software environments like MATLAB. The common parameters in the calibration process involved in the main code of K2 program include Ks, n, CV, G, and In. In this study, by changing some codes in K2 through the FORTRAN programming language, calibration parameters were increased by 16 parameters. Therefore, the response of a watershed to the variations of these parameters, separated for channel and plane, can be well evaluated. Due to semi-distributed simulation of K2,

¹ Corresponding Author: F.poorhagh@gmail.com

changing the amount of each parameter was done through “relative changes” in the initial value using a multiplier approach. Five storm events were utilized in hydrograph simulation, as well.

3- Results

Results indicated the better efficiency of K2 based on the event 1992/03/31 with the coefficient of determination and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) of 0.96 and 0.96, respectively. The events dated 1991/03/07, 1991/05/11, 1992/03/16, 1994/12/04, respectively, with the NSEs of 0.90, 0.90, 0.89, and 0.43, showed the excellent, excellent, excellent, and good fitness of simulated flow compared to observed flow, respectively. Sensitivity analysis established that the parameters K_s_c , n_c , Rock, G_p , K_s_p , Por_p , and Sat were the most effective parameters in K2 calibration, respectively. The posterior distributions of some parameters such as n_c and Smax appeared to be more sharply peaked than other parameters which established less uncertainty in hydrological modeling. Visual inspection of boxplots showed that for 8 out of 16 parameters (K_s_p , n_c , G_p , In, Rock, Por_p , Por_c , and Sat), the optimum values 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 n_c define a narrow range of the parameter space with a high model performance. On the other hand, the model performance was more impacted by the interaction of K_s and n parameters. Correlation analysis revealed that the highest linear correlation between NSE and K2 parameters was obtained for the parameters K_s_p , K_s_c , n_p , CV_p , G_c , In, Por_p , $Dist_p$, $Dist_c$, Smax, and Sat.

4 Discussion & Conclusions

In comparison with manual calibration, the HydroPSO R package could compensate for the shortage of K2 proficiency, due to the lack of enough observed rainfall records, in hydrologic modeling of semi-arid watersheds. Thus, it can be successfully integrated with the K2 model to harness the combined benefits of a distributed hydrological model and flexible computing capability of the open-source R software. However, the performance of HydroPSO in K2 calibration should be assessed for several semi-arid watersheds which have the similar conditions to Bar watershed.

Key Words: hydroPSO, KINEROS γ , Particle Swarm Optimization (PSO), rainfall-runoff, Simulation, Water discharge.