

واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت اجتماعی و عنکبوت بیوه سیاه

امیرپویا صراف*: استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

حجت‌الله قاسمی: دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۶/۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.8.5

چکیده

مدل‌های بارش - رواناب مفهومی، از جمله ابزارهای ساده و در عین حال کارآمد در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است. این مدل‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات ورودی از قبیل بارش، تبخیر - تعرق، دمای اندازه‌گیری شده و اطلاعات توپوگرافی حوضه، سیستم جریان را با استفاده از روابط پیچیده ریاضی شبیه‌سازی می‌کند. در این مقاله، از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب حوضه زشک استفاده شد. این پژوهش، قابلیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی و عنکبوت بیوه سیاه را در واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه زشک بیان می‌کند. از الگوریتم‌های بهینه‌سازی بالا به صورت چند هدفه برای واسنجی یازده پارامتر سراسری مدل WetSpa استفاده شد. در این تحقیق از معیار نش - ساتکیف و نش - ساتکیف لگاریتمی نیز به عنوان تابع هدف استفاده شد تا به وسیله آنها، عملکرد مدل در پیش‌بینی دبی‌های حداکثری و حداقلی بهبود یابد. نتایج نشان داد که هر دو الگوریتم عنکبوت اجتماعی (SSO) و عنکبوت بیوه سیاه (BWO) به ترتیب با ضریب رگرسیون ۰/۷۱ و ۰/۷۶، عملکردهای مناسبی را در واسنجی مدل از خود نشان دادند. مقدار شاخص RMSE در دوره واسنجی نیز به طور متوسط برابر با ۱۲۳/۶ و ۱۶۰/۱ بود. همچنین، تجزیه و تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر نشان داد که K_1 (ضریب رواناب سطحی) با ۳۶٪ تأثیر بر مقدار دبی جریان، حساس‌ترین پارامتر سراسری مدل WetSpa بود.

واژگان کلیدی: الگوریتم عنکبوت اجتماعی، الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه، حوضه زشک - مشهد، مدل بارش - رواناب WetSpa و کالیبراسیون.

۱- مقدمه

با گسترش GIS و تکنولوژی سنجش از دور، امکان دسترسی گسترده و مدیریت پارامترها و متغیرهای هیدرولوژیکی - توزیعی مکانی میسر شد. مدل‌سازی بارش - رواناب همواره نیازی مهم و مداوم برای مسائل کاربردی

* نویسنده مسئول: sarraf@riau.ac.ir

در زمینه‌های ارزیابی منابع آب، پیش‌بینی سیل، طراحی کانال‌های مهندسی و بسیاری مقاصد دیگر است (Bone, 2001). تلفیق GIS با مدل‌های توزیعی، در زمینه مطالعه تأثیر فعالیت‌های بشری بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه رودخانه همواره با گسترش سریعی همراه بوده‌است. مزیت استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی در مدل‌سازی، پتانسیل بالای آن در استخراج اطلاعات رقومی با دقت بسیار زیاد از روی مدل رقومی زمین DEM است (Ashour, 2002). محاسبه نتایج بارش - رواناب توسط مدل هیدرولوژیکی - توزیعی و با استفاده از تکنیک‌های GIS امکان‌پذیر و عملیاتی شده - است. مدل بارش - رواناب WetSpa، مدلی هیدرولوژیکی - توزیعی است که در سال ۱۹۹۷ در بروکسل توسعه یافت (Wange et al, 1997) و علاوه بر توسعه در مدل‌های متعدد، از آن در طرح‌های متعدد پژوهشی و اجرایی نیز استفاده شد. این مدل هیدرولوژیکی دارای قابلیت اجرای شبیه‌سازی‌ها در سطح پیکسل است و به همین دلیل، امکان استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای را به همراه اطلاعات دقیق اندازه‌گیری‌شده در سطح حوضه - که دارای توزیع مکانی است - در اختیار کاربر قرار می‌دهد (Hoshiarpur et al, 1397). بازه زمانی مدل‌سازی در WetSpa ساعتی و بدون تغییر است که استفاده از آن را در کارهای تحقیقاتی با مشکل مواجه کرده‌است. با توجه به گسترش کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع آب، الحاقیه مدل WetSpa (De Smite et al, 2002) - که مدلی هیدرولوژیکی - توزیعی در محیط GIS است - برای شبیه‌سازی بیلان آب و تخمین سیلاب در مقیاس حوضه توسعه داده شد. این الحاقیه می‌تواند به تخمین هیدروگراف در نقطه خروجی حوضه و هر نقطه دیگری از آن بپردازد. در الحاقیه، قابلیت مدل‌سازی ذوب برف، شبیه‌سازی جریان‌های زیرسطحی جانبی و مشخص کردن تلفات اولیه چالاب نیز به مدل اولیه اضافه شد و شبیه‌سازی را در بازه‌های دلخواه برای آن ممکن ساخت (Lio and De Smite, 2004).

کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب توسط محققان زیادی بررسی شده‌است؛ به عنوان مثال، Hoshiarpur و همکاران (۱۳۹۷) واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa را با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه PSO و II NSGA- ارزیابی کردند. آذین‌مهر و همکاران (2016) نیز شرایط هیدرولوژیک حوضه دینور را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که این مدل، جریان روزانه را با دقت خوبی شبیه‌سازی کرده‌است و جریان‌های کمینه و بیشینه نیز با دقت نسبتاً مشابهی در آن برآورد شده‌اند. ایمانی و همکاران (2016)، دبی روزانه حوضه بالخوچای در استان اردبیل را با استفاده از مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. نتایج، دقت قابل قبولی را در شبیه‌سازی جریان روزانه نشان داد و بیانگر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی جریان‌های سیلابی نسبت به جریان‌های پایه بود. Karimi و همکاران (2016)، شبیه‌سازی رواناب حاصل از برف از مدل WetSpa را با مدل SRM مقایسه کردند. نتایج نشان داد که مدل WetSpa رواناب را با دقت بالاتری شبیه‌سازی کرده‌است. De Smite و همکاران (2000) نیز مدل اولیه WetSpa را برای یکی از حوضه‌های بلژیک توسعه دادند و رواناب رودخانه را شبیه‌سازی کردند. Lio و همکاران (2000) و De Smite و همکاران (2000)، مدل WetSpa را در حوضه‌های لوکزامبورگ به کار بردند. Ghasemi و همکاران (۱۴۰۰) نیز واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES را با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه الگوریتم عنکبوت اجتماعی (SSO) و الگوریتم عملیات جستجو و نجات (SAR) ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که کیفیت شبیه‌سازی دبی‌های پایین بیش از دبی‌های بالا بود. Donyaii و همکاران (۱۳۹۹)، عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی را در بهینه‌سازی کارایی مخزن مقایسه کردند. پارامترهای واسنجی مدل در این تحقیق شامل ضریب زبری

کانال، شعاع هیدرولیکی، رواناب مؤثر، گیاه و ضریب فروکش جریان آب زیرزمینی بود که به صورت دستی در مدل اجرا شد. لیو و همکاران به منظور مدل‌سازی بارش و روندیابی سیلاب، رهیافتی جدید را در مدل Wetspa توسعه دادند که بر سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش انتقال پخش مبتنی بود. بر اساس تحلیل فقدان قطعی صورت گرفته در این مطالعه، پارامترهای فراوانی سیلاب و ضریب زبری کانال تأثیرگذارتر از آستانه حداقل شیب و آستانه سطح زهکش بود. آذین مهر (2012) از WetSpa برای شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه آبریز دینور در بالادست سد کرخه استفاده کرد. Kabir and Bahremand (2013) فقدان قطعی پارامترهای مدل WetSpa را با استفاده از روش مونت - کارلو در حوضه آبریز گرگان‌رود بررسی کردند. نتایج نشان داد که شاخص تصحیح تبخیر - تعرق، بیشترین حساسیت و شاخص آب زیرزمینی، کمترین حساسیت را داشت. چناری و همکاران (۲۰۱۵) نیز کارایی این مدل را در حوضه آرازکوسه در استان گلستان بررسی و بیان کردند که مدل در پیش‌بینی دبی پیک جریان توانایی زیادی داشت. به دلیل فقدان قطعی‌های زیاد پارامترهای هیدرولوژیکی، واسنجی مدل یکی از مهم‌ترین بخش‌های مدل‌سازی است که در آن عمدتاً از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. صراف و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهش خود تحت عنوان «واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه عنکبوت اجتماعی و جستجو و نجات»، به واسنجی مدل بارش - رواناب توزیعی IHACRES پرداختند و برای واسنجی مدل، از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی SSO و SAR در حوضه رودخانه اعظم هرات یزد استفاده کردند. نتایج به دست آمده از کاربرد مدل در این حوضه، بیانگر قابلیت رضایت‌بخش این الگوریتم‌ها در واسنجی مدل IHACRES است. همچنین نتایج نشان داد که کیفیت شبیه‌سازی دبی‌های پایین بیش از دبی‌های بالا بود (Lio et al, 2020). در تحقیقی تحت عنوان «افزایش قابلیت اطمینان پیش‌بینی برف با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT با رویکرد داده‌های سنجش از دور»، کالیبراسیون مدل SWAT برای چهار حوضه متفاوت اجرا شد. این مطالعه نشان داد که کالیبراسیون مدل، به شدت تحت تأثیر فرایندهای برف در حوضه آبخیز بود (Hio et al, 2020). در تحقیقی تحت عنوان بهینه‌سازی پارامترها برای کاهش فقدان قطعی و بهبود شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی، برای اولین بار الگوریتم‌های PSO و SUFI-2 را در شش روش مختلف (رویکردهای تک الگوریتمی و ترکیبی) به منظور کالیبراسیون بهینه پارامترها با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT به کار برد (RikeBeker et al, 2019). در پژوهشی تحت عنوان «کالیبراسیون مدل توزیعی - هیدرولوژیکی با مدیریت بسیار بالا»، به ارزیابی پتانسیل‌ها و کمبودهای موجود در استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق مبتنی بر سنجش از دور در یک رویکرد واسنجی مدل با توزیع مکانی پرداخته شد. در این تحقیق، از مجموعه داده‌های الگوریتم SEBAL برای دستیابی به سری زمانی تبخیر و تعرق استفاده شد که متعاقب آن، در یک روش واسنجی با توزیع مکانی نیز به کار گرفته شد.

روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت و بررسی فقدان قطعی مدل‌ها وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد (Salteli, 2000): روش‌های سراسری و روش‌های تخمین نقطه‌ای. در روش‌های سراسری، شبیه‌سازی با استفاده از پارامترها در کل فضای شدنی انجام می‌شود؛ در حالی که در روش‌های تخمین نقطه‌ای برای یافتن جواب بهینه، جستجوی محلی تا جایی ادامه می‌یابد که در کنار جواب به دست آمده، جواب بهتری وجود نداشته باشد (Van Grinone, 2002). در این میان از نرم‌افزار بهینه‌ساز PEST، در مطالعه‌های بارش - رواناب بسیار

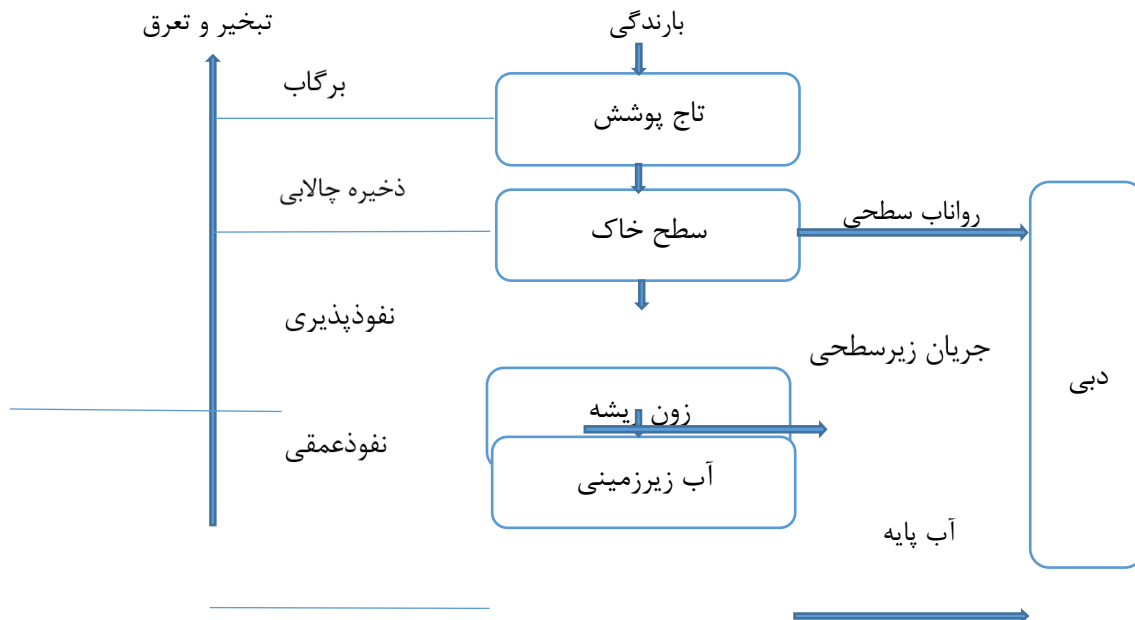
استفاده شد (Bahremmand and DeSmite, 2008 & Safari et al, 2009 & Bahremmand, 2007). Bahremmand و همکاران (2007) با استفاده از مدل WetSpa در روی حوضه هورناد کشور اسلواکی، به ارزیابی تأثیر احیای جنگل در واقعه سیلاب رودخانه‌ها پرداختند. در این مطالعه، یازده پارامتر سراسری مدل با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی PEST واسنجی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که بین میزان پوشش جنگلی و کاهش دبی اوج رودخانه همبستگی بالایی وجود داشت. Bah remmand and DeSmite (2010) نیز فقدان قطعیت مدل WetSpa را بررسی کردند. Safari و همکاران (2009) با استفاده از داده‌های سنجش از راه دور بارندگی، نقشه‌های رقومی توپوگرافی، نوع خاک، کاربری اراضی و نرم‌افزار PEST مدل WetSpa را برای چندین حوضه واسنجی کردند. ایشان معیارهای مختلفی مثل معیار اُریب مدل، ضریب همبستگی اصلاح‌شده و معیار کارآمدی نش را برای واسنجی مدل ارزیابی کردند. نتایج به دست آمده در مطالعه نشان داد که شبیه‌سازی‌های انجام‌شده توسط مدل WetSpa در دوره واسنجی و دوره صحت‌سنجی، رضایت‌بخش بود. تحقیقات نشان داد که روش‌های بهینه‌سازی محلی در تعیین سری پارامترهای بهینه مدل، ممکن است در دام نقاط بهینه محلی گرفتار شود؛ زیرا توابع هدف یک مسئله بهینه‌سازی، می‌تواند غیرخطی باشد و چندین نقطه بهینه محلی داشته باشد (Kample, 2001). روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند الگوریتم‌ها این مشکل را رفع کردند و به همین دلیل، امروزه این روش‌ها توسعه بسیار زیادی یافتند و کاربرد آنها در مسائل مهندسی افزایش یافته‌است. در سه دهه گذشته نیز گزارش‌های متعددی در زمینه واسنجی اتوماتیک بارش - رواناب با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی سراسری ارائه شد که ارزیابی الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه را با رویکرد بهبود عملکرد مدل هیدرولوژیک WetSpa به‌خوبی نشان می‌داد. بر این اساس، هدف مقاله حاضر واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa و تعیین مقدار بهینه پارامترهای مختلف آن با در نظر گرفتن بازه تغییرات آنها با رویکرد بهینه‌سازی چند هدفه است که در آن از تکنیک‌های الگوریتم عنکبوت اجتماعی (SSA) و عنکبوت بیوه سیاه (BWO) استفاده خواهد شد. با این دید که برای دستیابی به یک پیش‌بینی قابل اعتماد، مدل باید بتواند علاوه بر دبی‌های معمول، دبی‌های زیاد و کم (از جمله حداکثری و حداقلی) را با دقت مناسب پیش‌بینی کند؛ بنابراین، توابع هدف به نحوی انتخاب می‌شود که بتوان طی فرایند واسنجی، بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی را به دست آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل هیدرولوژیکی WetSpa

WetSpa یک مدل پیوسته مکانی و زمانی است و تمامی شبیه‌سازی‌ها در آن به صورت پیوسته صورت می‌گیرد. این مدل برای نمایش بیلان آب و انرژی برای هر سلول محاسباتی، فرایندهای بارش، گیرش گیاهی، ذوب برف، چالاب، نفوذ، تبخیر - تعرق، تراوش، رواناب سطحی، جریان دیواره‌ای و جریان آب زیرزمینی را قابل توجه قرار می‌دهد. سیستم هیدرولوژیک شبیه‌سازی‌شده توسط این مدل، از چهار لایه پوشش گیاهی، سطح خاک، منطقه ریشه و سفره اشباع آب زیرزمینی تشکیل شده‌است (Hooshyarypor et al, 1397) (شکل ۱). مهم‌ترین فرضیه‌هایی که در استفاده از مدل بارش - رواناب WetSpa قابل توجه قرار می‌گیرد، عبارتند از: ۱- مشخصه‌های خاک، پوشش گیاهی و توزیع بارندگی برای یک سلول محاسباتی، از نظر فیزیکی مشابه و همگن است؛ ۲- هنگامی که رطوبت خاک از رطوبت پژمردگی پایین‌تر باشد، از تبخیر - تعرق صرف‌نظر می‌شود؛ ۳- هنگامی که خاک خشک شود یا توسط میزان ذخیره

آب زیرزمینی مؤثر محدود گردد، تبخیر - تعرق عمیقی رخ خواهد داد؛ ۴- از روش روندیابی تقریب موج پخشی، برای جریان دامنه و جریان آبراهه استفاده می‌شود و ۵- جریان میان حوضه‌ای در حالی رخ می‌دهد که محتوای رطوبت خاک از ظرفیت مزرعه بیشتر باشد (Hooshyarypor et al, 1397).



شکل ۱: ساختار مدل WetSpa در یک سلول محاسباتی

این جریان، با تقریب سینماتیک و از روی قانون داریسی برآورد می‌شود. الحاقیه مدل WetSpa در واقع همان مدل هیدرولوژیک است که از قابلیت‌های GIS نیز در مدل‌سازی استفاده می‌کند. این مدل به منظور اجرای کامل شبیه‌سازی‌ها، به پارامترهای متفاوتی نیاز دارد که بیشتر آنها با اندازه‌گیری‌های میدانی یا به کمک معادلات تجربی به دست می‌آید. برای مدل‌سازی با WetSpa به نقشه رقومی منطقه، پوشش گیاهی و نوع خاک در نقاط مختلف حوضه نیاز است. علاوه بر این، داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، تبخیر - تعرق پتانسیل و دما نیز اطلاعاتی است که توزیع زمانی و مکانی آنها باید به مدل معرفی شود. پارامترهایی در مدل وجود دارد که مقدار آنها در طول زمان و مکان ثابت است و به آنها پارامترهای سراسری گفته می‌شود. در جدول شماره ۱، پارامترهای سراسری مدل به صورت خلاصه توصیف شده‌است.

جدول ۱: پارامترهای سراسری مدل بارش - رواناب WetSpa (Hooshyarypor et al, 1397)

ردیف	پارامتر	واحد	عنوان پارامتر
۱	K_1	[-]	جریان دیواره‌ای
۲	K_2	[-]	ضریب فروکش آب زیرزمینی
۳	K_3	$[d^{-1}]$	مؤلفه رطوبتی اولیه خاک
۴	K_4	[-]	ضریب اصلاحی تبخیر
۵	K_5	[mm]	ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی
۶	K_6	[mm]	ضریب ذخیره آب زیرزمینی
۷	K_7	$[^{\circ}C]$	دمای پایه ذوب برف
۸	K_8	$[mm/^{\circ}C/day]$	ضریب درجه - روزدما
۹	K_9	$[^{\circ}C/day]$	ضریب درجه - روز بارندگی
۱۰	K_{10}	[-]	ضریب رواناب سطحی
۱۱	K_{11}	[mm]	آستانه حداکثر شدت بارش

جریان دیواره‌ای، یک مؤلفه مهم رواناب برای مناطق با آب و هوای مرطوب به شمار می‌ورد؛ به خصوص مناطقی که زمین‌های پرشیب و پوشش گیاهی مناسب دارد (Lio and De Smite, 2004). در الحاقیه مدل WetSpa فرض بر این است که جریان دیواره‌ای زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک از ظرفیت مزرعه بیشتر شود و گرادیان هیدرولیکی کافی برای حرکت آب وجود داشته باشد. K_2 ، ضریب فروکش آب زیرزمینی است که در مدل WetSpa، ابتدا یک مقدار عمومی در نقطه خروجی حوضه تعیین می‌شود، سپس با همبستگی خطی بین نقطه خروجی حوضه و خروجی هر زیرحوضه، مقدار ضریب در زیرحوضه‌ها تعیین می‌شود. این همبستگی بر اساس مساحت زهکش و میانگین شیب زیرحوضه است و در آن به زیرحوضه‌های با مساحت زهکش بالاتر و شیب تندتر، مقادیر بالاتر ضریب فروکش اختصاص می‌یابد. K_3 ، مؤلفه رطوبتی اولیه خاک یکی از نشانه‌های مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که بر تولید رواناب سطحی، تبخیر - تعرق، تراوش و جریان دیواره‌ای تأثیر مستقیمی دارد. شرایط اولیه رطوبتی مناسب به تخمین - های واقع بینانه‌تر منجر خواهد شد؛ با این حال، برای شبیه‌سازی جریان بلندمدت در یک حوضه آبریز، رطوبت اولیه خاک اهمیت کمتری دارد؛ چون تنها بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی در ابتدای دوره شبیه‌سازی اثرگذار خواهد بود (Lio and De Smite, 2004). یک راهکار حذف اثر رطوبت اولیه خاک، در نظر گرفتن بخشی از سری زمانی (مثلاً یک سال) در ابتدای دوره شبیه‌سازی به عنوان دوره Warm up است که در این مقاله نیز در نظر گرفته شده است (Hooshyarypor et al, 1397 & Mashari eshghabadi et al, 1396 & Sarraf et al, 1400). K_4 ، ضریب اصلاحی تبخیر است که در واقع تأثیر کاربری اراضی، تراز و شرایط میکرو هواشناسی شبکه سلول‌ها را در مقادیر تبخیر - تعرق اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد و این ضریب تقریباً نزدیک به یک است. در صورتی که ایستگاه تبخیرسنجی در این مناطق وجود داشته باشد، استفاده از این ضریب دقت محاسبات را بالا خواهد برد. در این شرایط برای در نظر گرفتن اثر تغییرات تراز منطقه، ضریب اصلاحی PET مقادیر کوچکی را اختیار خواهد کرد. یکی دیگر از پارامترهای ورودی

مدل WetSpa، K5 یا ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی در عمق و K6 ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی نیز پارامتری است که با رواناب حوضه ارتباط مستقیمی دارد. حداکثر ظرفیت ذخیره پیشنهاد شده، دو هزار میلی‌متر و حداقل آن، صفر در نظر گرفته می‌شود؛ در صورتی که دما از دمای پایه کمتر شود، بارش به صورت برف خواهد بود و هنگامی که دمای هوا از دمای پایه بالاتر رود، پدیده ذوب شدن برف رخ می‌دهد و برف ذوب شده قسمتی از رواناب سطحی را تشکیل می‌دهد. برای در نظر گرفتن این اثرات، ضریب K7 به عنوان دمای پایه ذوب برف در مدل در نظر گرفته شد که مقدار این پارامتر در حدود [-1,1] است. بسته به شرایط ارتفاعی حوضه و فشار هوا، این پارامتر تغییرات جزئی خواهد داشت. محدوده تغییرات K8 ضریب درجه روز دما برای شرایط بدون بارش، بین ۱/۸ تا ۳/۷ در تغییر بوده و در زمان و مکان نیز متغیر است. K9 ضریب درجه - روز بارندگی نام دارد و میزان ذوب برف ناشی از انقباض هوای مرطوب بر روی سطح برف و دمای انتقال یافته توسط بارش به سطح برف را تعیین می‌کند. از این ضریب برای محاسبه ذوب برف اضافی ناشی از بارش استفاده می‌شود. مقدار ضریب درجه - روز بارش بسیار پایین و در حدود ۰/۰۱ است. همچنین از آنجا که شدت بارندگی تأثیر به‌سزایی بر کنترل نسبت رواناب سطحی و تراوش دارد، در مدل WetSpa از ضریب K10 به عنوان ضریب رواناب سطحی استفاده می‌شود. بر مبنای مطالعات قبلی، مقدار این پارامتر در حدود ۳ است؛ در صورتی که مقدار این پارامتر واحد باشد، از تأثیر شدت بارش بر رواناب صرف‌نظر و ضریب رواناب واقعی، تابعی خطی از محتوای رطوبت نسبی خاک می‌شود (Lio and De Smite, 2004). پارامتر K11 بر اساس دقت زمانی شبیه‌سازی مدل، آستانه شدت بارش متناظر را با حالتی تعیین می‌کند که مؤلفه رواناب سطحی با یک برابر شود و در نتیجه، ضریب رواناب واقعی تابعی از رطوبت نسبی خاک می‌شود. این پارامتر در واقع توزیع مکانی دارد و به کاربری اراضی، شیب و نوع خاک وابسته است. به علاوه، پارامترهای دیگری در مدل وجود دارد که لازم است مقدار آنها با توجه به استانداردهای موجود، اطلاعات منطقه و آزمایش و اندازه‌گیری تعیین شود؛ از جمله ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق ریشه، ظرفیت ذخیره چالابی، گیرش گیاهی، ضریب زبری مانینگ و ضریب رواناب که می‌توان آن را با درون‌یابی از استانداردهای موجود که در راهنمای نرم‌افزار نیز وجود دارد (Lio and De Smite, 2004) و از روی پیشینه‌های مطالعاتی بر روی حوضه‌های مشابه تعیین کرد. در WetSpa، روندیابی جریان در کانال با استفاده از معادله‌های سنت و نانت انجام می‌شود:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + ci \frac{\partial Q}{\partial x} - di \frac{\partial Q}{\partial x^2} = 0 \quad \text{رابطه ۱}$$

ضریب زبری مانینگ کانال، با روش درون‌یابی بین رتبه‌های مختلف آبراهه‌ها (O) محاسبه می‌شود (معادله ۲):

$$= n_{r,max} - \left(\frac{O - O_{min}}{O_{max} - O_{min}} \right) (n_{r,max} - n_{r,min}) \quad \text{رابطه ۲}$$

در نهایت، ضریب رواناب نیز با استفاده از تمام اطلاعات موجود شامل توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی و بافت خاک، تخمین زده و به صورت توزیعی به مدل وارد می‌شود (Hooshyarypor et al, 1397).

۲-۲- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

یکی از نکات مثبت استفاده از چند تابع نکویی به طور همزمان، امکان استفاده از منابع مختلف اطلاعاتی و پرداختن به ابعاد متفاوت فرایند تولید رواناب و شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی از حوضه است که در نهایت، به کاهش فقدان قطعیت شبیه‌سازی منجر خواهد شد (Goupta et al, 1998). نظر به پیچیدگی و بزرگی مقیاس مسئله واسنجی چند هدفه مدل‌های بارش - رواناب، در سالیان اخیر محققان از الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه نیز استفاده کرده‌اند (Warget et al, 2003 & Boile et al, 2000 & Bahremand et al, 1378). الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی (SSO)، روش بهینه‌سازی جدیدی است که در سال (2013) توسط Kause و همکاران ارائه شد. این الگوریتم برای سال‌های زیادی یک موضوع تحقیقاتی مهم در کالیبراسیون مدل هیدرولوژیکی و علوم مربوط به مهندسی هوش مصنوعی بود. مدل ریاضی که توسط کائوس و همکاران ارائه شده، در رابطه ۳ آمده است (Kause and Sing Faese, 2014):

$$\text{Vibs}_i = w_j e_{j,i}^{d2} \quad \text{رابطه ۳}$$

عنکبوت جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات، جذب یا از آن دور می‌شود. حرکت جاذبه یا دافعه به چند پدیده تصادفی بستگی دارد. یک عدد تصادفی ثابت در محدوده $\{0 \text{ و } 1\}$ تولید می‌شود و در صورتی که عدد کوچک‌تر از PF (حد آستانه) باشد، جنبش جاذبه و در غیر این صورت جنبش دافعه است (Kause, 2013).

$$\text{Xi}(t+1) = \text{Xi}(t) + \alpha \cdot \text{Vibc1} \cdot (\text{Sc} - \text{Xi}(t)) + \beta \cdot \text{Vibbi} \cdot (\text{Sb} - \text{Xi}(t) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad \text{رابطه ۴}$$

این فرمول زمانی قابل اجراست که جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات جذب شود. در صورتی که این جنس از منشأ ارتعاشات دور شود، از رابطه ۵ استفاده شده است.

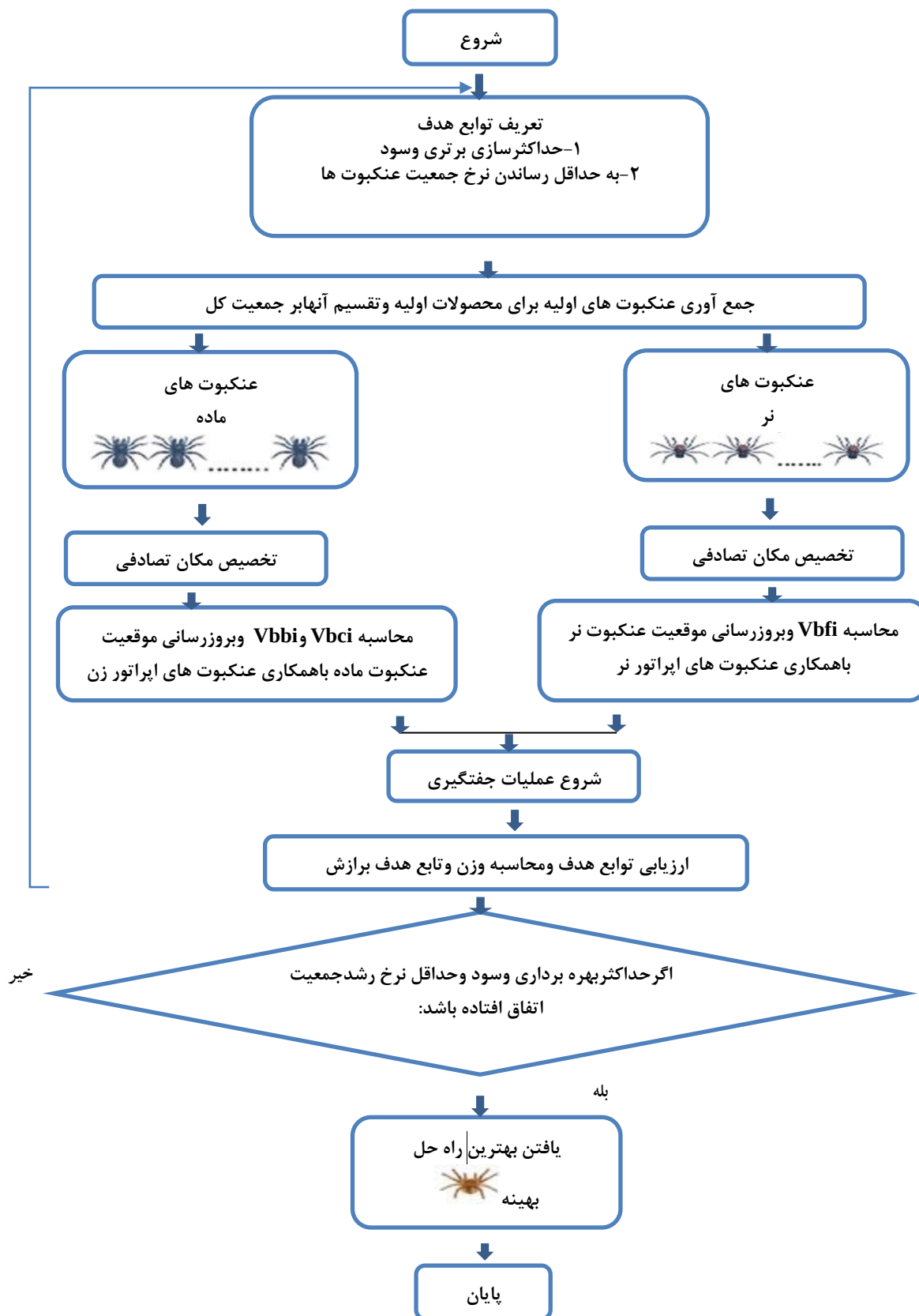
$$\text{Xi}(t+1) = \text{Xi}(t) - \alpha \cdot \text{Vibc1} \cdot (\text{Sc} - \text{Xi}(t)) + \beta \cdot \text{Vibbi} \cdot (\text{Sb} - \text{Xi}(t) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad \text{رابطه ۵}$$

موقعیت عنکبوت N از رابطه ۶ و موقعیت عنکبوت ND از رابطه ۷ به دست می‌آید:

$$\text{Xi}(t+1) = \text{Xi}(t) + (\alpha \cdot \text{Vibfi} \cdot (\text{Sf} - \text{Xi}(t)) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\text{Xi}(t+1) = \text{Xi}(t) + (\alpha \cdot ((\sum_j N_{mj} k_{Nf} + 1) / (\sum_j N_j N_f))) \quad \text{رابطه ۷}$$

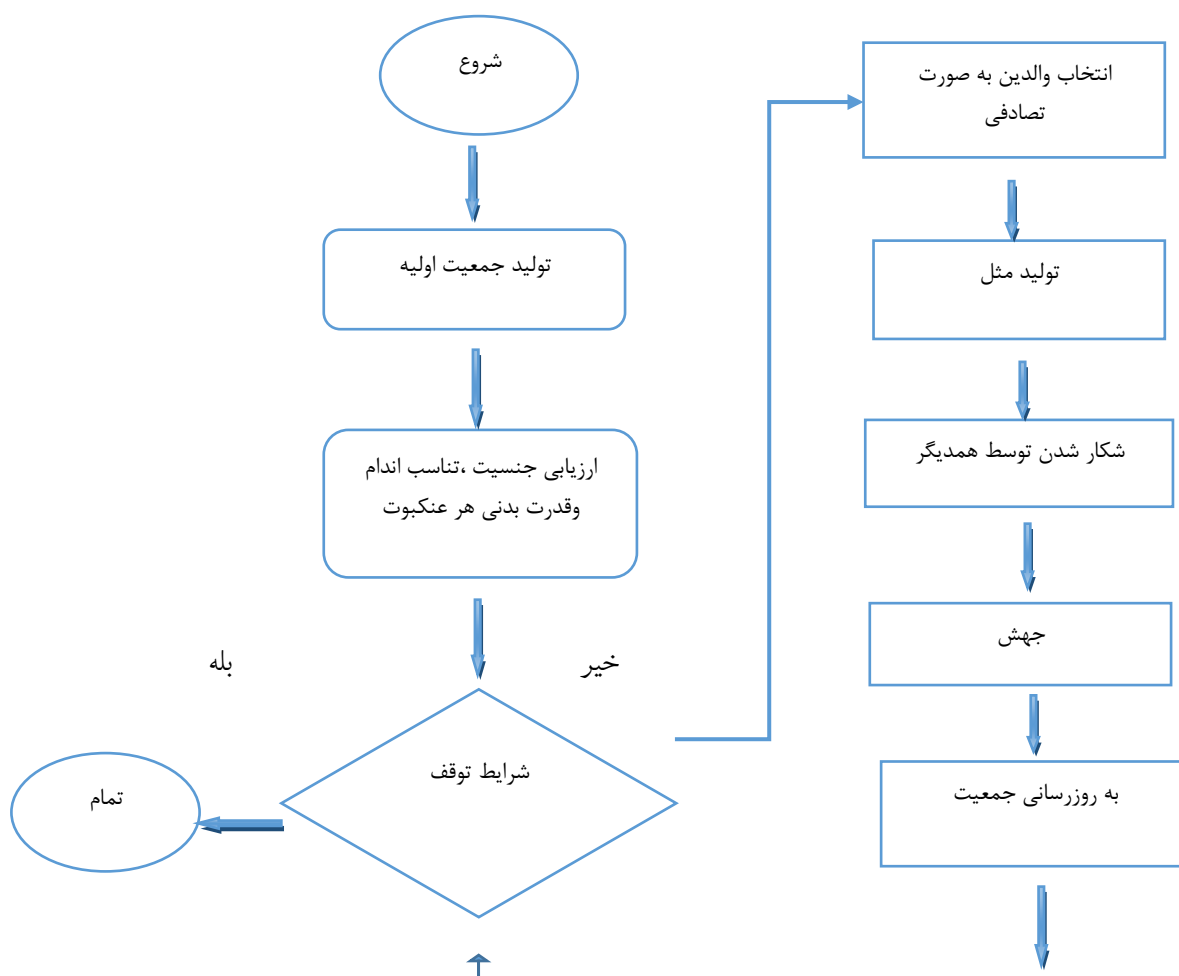
که در آنها، Sf نزدیک‌ترین جنس نر و α , β و δ ارزش‌های تصادفی در بازه $[0,1]$ است (Kause and SingFaese, 2014). مکانیسم آخر، الگوریتم جفت‌گیری است؛ از این رو، عنکبوت N در یک شعاع خاص که متشکل از یک یا چند جنس نر و ماده است، شروع به جفت‌گیری می‌کند. مفاهیم روابط بالا در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی (SSO)

یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی که در این مقاله استفاده شده، الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه (BWO) است. عنکبوت بیوه سیاه در طول روز از دید ظاهری خارج و بیشتر شب‌هنگام ظاهر می‌شود. در طول شب، شبکه خود را می‌چرخاند. به طور کلی بیوه زن، بیشتر زندگی بزرگ‌سالی خود را در همان سایت زندگی می‌کند (Andrite and Banta, 2002). هرگاه عنکبوت بیوه سیاه به جفت‌گیری تمایل داشته باشد، نقاط خاصی از شبکه خود را با ماده فرمون مشخص می‌کند و با این روش، عنکبوت نر را به خود جذب می‌کند (Birkhed and Moler, 1998).

شکل ۳، فلوچارت الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد:



شکل ۳: فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه

مانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه نیز با تعداد زیادی عنکبوت اولیه شروع می‌شود؛ به گونه‌ای که هر عنکبوت یک راه‌حل بالقوه را نشان می‌دهد. عنکبوت‌های اولیه به صورت جفت سعی دارند به تولیدمثل نسل جدید بپردازند. عنکبوت ماده بیوه سیاه در هنگام جفت‌گیری یا بعد از آن، به خوردن عنکبوت نر می‌پردازد. سپس

اسپرم‌های ذخیره شده آنها را در حفره‌های اسپرم خود حمل و آنها را در کیسه‌های تخمک آزاد می‌کند. یازده روز پس از گذاشته شدن، عنکبوت‌های تولیدمثل شده از کیسه خارج می‌شوند. در الگوریتم بهینه‌سازی بیوه سیاه (BWO)، راه-حل بالقوه هر مسئله به عنوان عنکبوت بیوه سیاه در نظر گرفته شده‌است. هر عنکبوت بیوه سیاه، متغیرهای مسئله را نشان می‌دهد:

$$\text{Widow} = [x1, x2, x3, \dots, xNVar], \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\text{Fitness} = f(\text{widow}) (x1, x2, x3, \dots, xNVar), \quad \text{رابطه ۹}$$

برای شروع الگوریتم بهینه‌سازی، یک ماتریس عنکبوت بیوه کاندید شده به ابعاد $N_{pop} \times NVar$ با جمعیت اولیه عنکبوت‌ها ایجاد می‌شود. سپس به منظور تولیدمثل، باید آرایه‌ای به نام α تا زمانی که ماتریس عنکبوت‌های بیوه با اعداد تصادفی همراه باشد، ایجاد شود. سپس فرزندان با استفاده از α و با معادله زیر تولیدمثل می‌شوند:

$$\begin{cases} y1 = \alpha + x1 + (1 - \alpha) \times x2 \\ y2 = \alpha + x2 + (1 - \alpha) \times x1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

سرانجام فرزندان تولیدمثل شده و مادران، به یک آرایه اضافه و براساس ارزش تناسب آنها مرتب‌سازی می‌شوند. باتوجه به رتبه‌بندی خورده‌شدن توسط همدیگر، تعدادی از بهترین افراد به جمعیت تازه تولید شده اضافه می‌شوند. اصلی‌ترین گام در پیاده‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری، تبدیل متغیرهای تصمیم مدل ریاضی به یک سیستم کد-گذاری مناسب است. برای این منظور، از بستر نرم‌افزار متلب برای این مهم استفاده می‌شود. در نرم‌افزار متلب، کدگذاری‌ها به صورت حالت باینری (فقط از اعداد ۱ و ۰ استفاده می‌شود)، کدگذاری جایگشتی (هر جواب به صورت یک ترتیب از n عدد مختلف) و روش کلید تصادفی (از اعداد تصادفی بین ۰ و ۱ استفاده می‌شود) انجام می‌شود.

۳-۲- توابع هدف و ارزیابی مدل

در مقاله حاضر به منظور ارزیابی مدل، از پنج شاخص آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، متوسط قدرمطلق خطا (MAE)، شاخص نش - ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) و نش - ساتکلیف لگاریتمی استفاده شده‌است (Hooshyarypor et al, 1397 & Mashari eshghabadi et al, 1396):

$$r = \frac{\overline{Q_s} \cdot \overline{Q_o} - \overline{Q_s \cdot Q_o}}{\sqrt{(\overline{Q_o^2} - \overline{Q_o}^2) - (\overline{Q_s^2} - \overline{Q_s}^2)}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{N}} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{si} - Q_{oi}|}{N} \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \overline{Q_o})^2} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$NS - Log = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{si}) - \ln(Q_{oi}))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{oi}) - \ln(Q_o))^2} \quad \text{رابطه ۱۵}$$

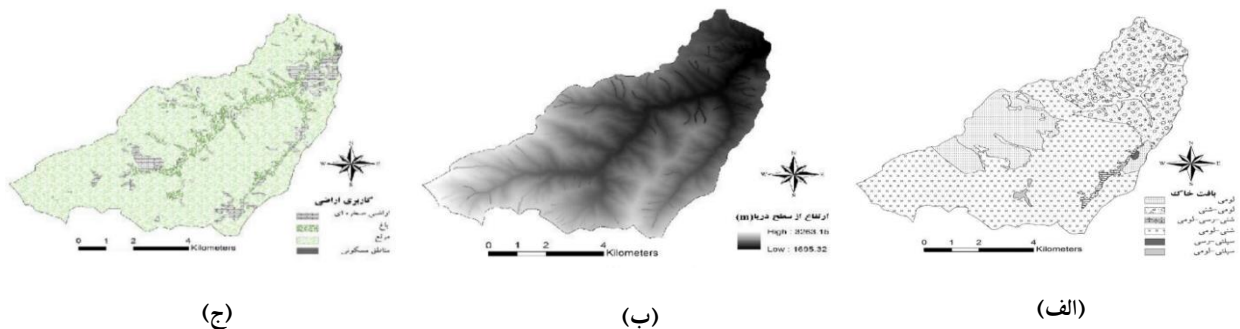
که در آنها Q_s و Q_o به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (m^3/s)، $\overline{Q_s}$ و $\overline{Q_o}$ به ترتیب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (m^3/s) و N تعداد داده‌ها در دوره شبیه‌سازی است. توضیح این امر لازم است که در این مقاله به منظور واسنجی مدل WetSpa در حوضه زشک مشهد، از الگوریتم‌های تکاملی عنکبوت اجتماعی و عنکبوت ییوه سیاه استفاده می‌شود که در این فرایند یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهینه کردن توابع هدف واسنجی بین خروجی‌های محاسباتی و مشاهدات حل می‌شود. به منظور افزایش دقت مدل در پیش‌بینی جریان‌های حداقلی و حداکثری، از دو معیار نش - ساتکیف و نش - ساتکیف لگاریتمی معادله‌های ۱۴ و ۱۵ استفاده می‌شود. در این صورت، توابع هدف کیفیت هیدروگراف تولیدی توسط مدل WetSpa را به نسبت هیدروگراف مشاهداتی ارزیابی می‌کند. از آنجا که در روش نش - ساتکیف، مقادیر خطا با توان دو ارزیابی می‌شود؛ بنابراین، خطاهای بزرگ که در پیش‌بینی جریان‌های بالا ایجاد می‌شود، بزرگ‌تر می‌شود و در واسنجی مدل تأثیر بیشتری خواهد داشت. بنابراین، معیار نش - ساتکیف وزن بیشتری را به جریان‌های بالا می‌دهد؛ در صورتی که ابتدا دبی‌ها به مقیاس لگاریتمی انتقال داده شود و معیار NS بر روی آنها اعمال شود (معادله ۱۵)، وزن بیشتری به جریان‌های پایین داده خواهد شد؛ زیرا در این حالت به دلیل استفاده از تابع لگاریتم، بزرگی مقدار دبی‌های بالا در مقایسه با دبی‌های کم بسیار کاهش می‌یابد. بنابراین، مقدار خطای مدل در پیش‌بینی دبی‌های بالا تعدیل می‌شود (Hooshyarypor et al, 1397).

۴-۲- حوضه مطالعاتی زشک و داده‌های مدل

حوضه زشک با مساحت ۶۵/۵۶ کیلومتر مربع، در استان خراسان رضوی و در غرب مشهد قرار دارد. از نظر مختصات جغرافیایی، حوضه مذکور در محدوده بین ۵۹-۰۰ و ۳۸-۳ تا ۵۹-۰۰ و ۵۳-۱۱ طول شرقی و ۳۶-۰۰ و ۱۸-۱۵ تا ۳۶-۰۰ و ۲۱-۷ عرض شمالی واقع است. ۸۵/۰۷ درصد از مساحت حوضه مرتع، ۸/۶۷ درصد باغ، ۶/۱۷ درصد اراضی بایر و ۹ درصد مناطق مسکونی است. شیب متوسط آن ۴۶/۱۷ درصد، حداقل ارتفاع آن ۱۶۹۵/۳۲ متر، حداکثر ارتفاع آن ۳۲۶۵/۱۵ متر و ارتفاع متوسط آن ۲۴۲۸/۲۰ متر است. شکل ۴، موقعیت حوضه زشک را در استان خراسان رضوی و ایران نشان می‌دهد:



شکل ۴: موقعیت حوضه زشک و ایستگاه‌های هیدرومتری، سینوپتیک و باران‌سنجی در استان خراسان رضوی و ایران



شکل ۵: الف) مدل رقومی ارتفاع، ب) نقشه کاربری اراضی و ج) نقشه بافت خاک حوضه زشک

مدل WetSpa، مدلی توزیعی با پایه فیزیکی است. داده‌های مکانی مورد نیاز از سه نقشه پایه شامل مدل رقومی ارتفاع (DEM)^۱، کاربری اراضی و بافت خاک (شکل ۵) به دست می‌آید. مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰۰ سازمان جغرافیایی ارتش تهیه شد. نقشه کاربری با استفاده از تصاویر بارگذاری شده در Google Earth تهیه و با بازدید میدانی تصحیح و تدقیق شد. برای تهیه نقشه بافت خاک نیز ابتدا نقشه واحدهای کاری با توجه به شکل زمین (نقشه ژئومورفولوژی کاربردی) و با استفاده از عکس‌های هوایی ۱:۲۰۰۰۰ و تصاویر Google Earth تهیه و با بازدید میدانی تصحیح شد (شکل ۶). سپس در هر یک از واحدهای کاری، یک پروفیل خاک حفر و بافت آن در آزمایشگاه مشخص شد. در برداشت نقاط عمیق، ابتدا خاک از سطح، سپس عمق پنجاه سانتیمتری، صد سانتیمتری و بعد ۱۵۰ سانتیمتری و در نهایت، در عمق دویست سانتیمتری برداشت و پس از آن، درصد رطوبت خاک محاسبه شد (شکل ۷). داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل بارندگی (P)، دما (T) و تبخیر - تعرق پتانسیل (PET) است. برای ارزیابی و واسنجی مدل، به داده‌های دبی نیاز است. داده‌های بارندگی از ایستگاه باران‌سنجی ثبات زشک (اداره هواشناسی) و دما از ایستگاه سینوپتیک مشهد دریافت شد؛ بدین ترتیب که گرادیان حرارتی حوضه با استفاده از ایستگاه‌های اطراف منطقه تهیه و دمای حوضه با استفاده از ایستگاه معرف سینوپتیک مشهد محاسبه شد. رابطه ۱۶، گرادیان دمای متوسط سالانه را نشان می‌دهد:



¹ Digital Elevation Model

شکل ۶: تصویر نقاط نمونه برداری در گوگل ارث (منبع: نویسندگان)



شکل ۷: نقاط نمونه برداری شده به صورت عمقی (L.mokhtari et al, 1397)

$$T = -0.0051H + 19.97$$

$$R = 0.92$$

رابطه ۱۶

تبخیر - تعرق پتانسیل نیز با استفاده از نرم افزار Ref ET به روش پنمن - مانتیث با استفاده از داده های سینوپتیک به صورت ساعتی محاسبه شد. داده های هواشناسی و هیدرومتری با گام زمانی ساعتی استفاده شد. واسنجی مدل نیز با استفاده از داده های دوره ۲۰۰۹/۱/۱ تا ۲۰۱۱/۱۲/۳۱ و اعتبارسنجی آن، با داده های دوره ۲۰۱۲/۱/۱ تا ۲۰۱۴/۱/۳۱ انجام شد. موقعیت ایستگاه های هیدرومتری، سینوپتیک و باران سنج مورد استفاده، در شکل شماره ۵ نشان داده شد.

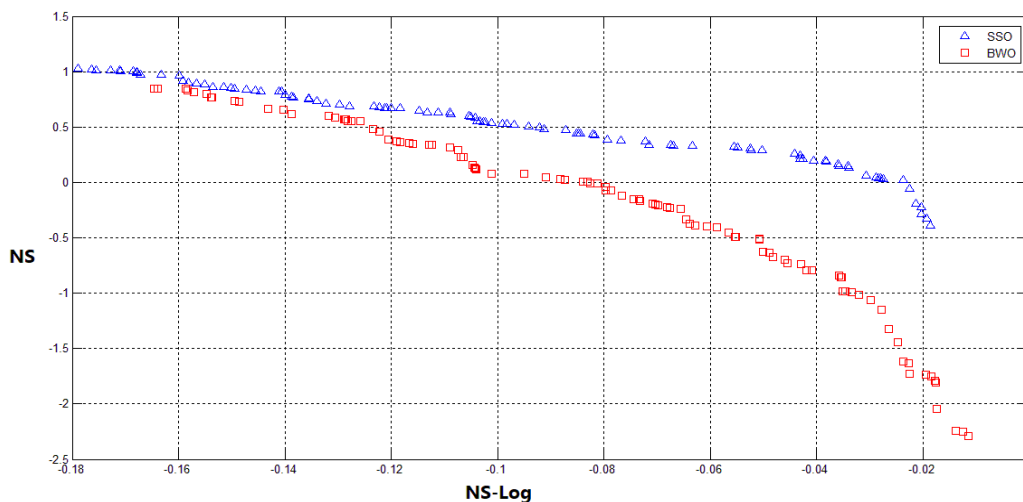
۳- نتیجه و بحث

در این بخش از مقاله، نتایج کالیبراسیون (واسنجی) مدل WetSpa با استفاده از الگوریتم های عنکبوت اجتماعی و عنکبوت بیوه سیاه ارائه می شود. متغیرهای تصمیم مسئله، پارامترهای سراسری یازده گانه ارائه شده در جدول ۱ است. توابع هدف باید به نحوی انتخاب شود که در پایان فرایند واسنجی بتوان بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را به دست آورد. برخی از این توابع، به جریان های بالا وزن بیشتری می دهند؛ در حالی که برخی دیگر، جریان های پایین را بیشتر قابل توجه قرار می دهند و برای آنها اهمیت بیشتری قائل هستند. بنابراین در این مقاله سعی شده تا در فرمول بندی چند هدفه، تعادل بین این دو در نظر گرفته شود؛ در این راستا از معیار نش - ساتکلیف (NS) و صورت لگاریتمی آن (NS-Log) استفاده شد. در این مقاله، نتایج به دست آمده بر اساس این دو تابع ارائه خواهد شد. پس از تعیین تمامی شبکه های مکانی لازم در مدل سازی حوضه، از اطلاعات بارش، تبخیر، دما و دبی سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ برای واسنجی مدل و از اطلاعات سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ برای صحت سنجی نتایج استفاده شد. محدوده اولیه پارامترها مطابق جدول ۲ تعیین شد:

جدول ۲: محدوده اولیه پارامترها در واسنجی مدل WetSpa در حوضه آبخیز زشک

پارامتر	K_{11}	K_{12}	K_1	K_{18}	K_{17}	K_6	K_5	K_7	K_3	K_2	K_1
Min	۴۵۰	۵	$e-7$	۰/۰۲	-۱	۱۹۶۰	۳۸۰	۰/۱	۱	$۶e-5$	۰
Max	۶۳۰	۷	۵۰۰	۰/۶	۱	۲۰۰۰	۵۰۰	۲/۰	۱/۵	$۹e-5$	۱/۳

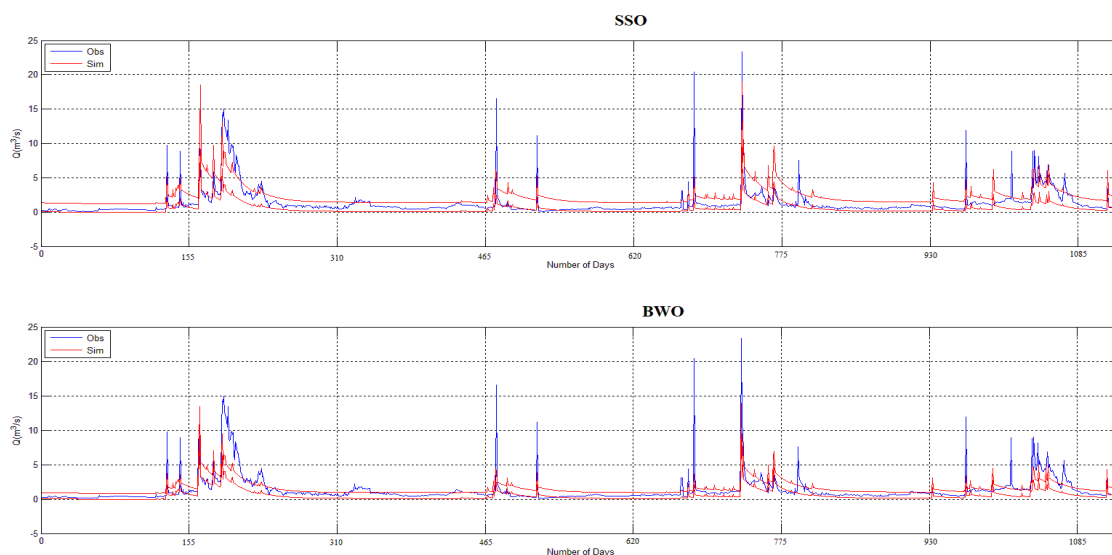
هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی، با اندازه جمعیت اولیه صد نفر و در طول صد نسل (تعداد دفعات اجرای مدل بهینه‌سازی) اجرا شد؛ در نتیجه، تعداد کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر اجرا از الگوریتم برابر با ده هزار است. بعد از اجرای فرایند واسنجی، بهترین مقادیر دو تابع هدف (یعنی معیارهای NS و NS-Log) در دوره زمانی واسنجی در شکل شماره ۸ نشان داده شد.



شکل ۸: رویه پارتوی به دست آمده توسط الگوریتم‌های SSO و BWO در دوره زمانی واسنجی

ملاحظه می‌شود که جواب‌های به دست آمده توسط BWO بهتر از جواب‌های SSO است؛ زیرا مقادیر NS آن بالاتر است. مطابق نتایج به دست آمده، مقادیر NS عموماً بین $-2/3$ و $0/75$ و مقادیر NS-Log بین $-0/165$ و $-0/1$ است. همان گونه که در بالا نیز بدان اشاره شد، توابع هدف، کیفیت هیدروگراف تولیدی توسط مدل WetSpa را به نسبت هیدروگراف مشاهداتی ارزیابی می‌کند. از آنجا که مقادیر خطا در روش نش - ساتکلیف با توان دو ارزیابی می‌شود؛ از این رو، خطاهای بزرگ که در پیش‌بینی جریان‌های بالا ایجاد می‌شود، بزرگ‌تر خواهد شد و در واسنجی مدل تأثیر بیشتری خواهد داشت. بنابراین، معیار نش - ساتکلیف به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهد؛ در صورتی که ابتدا دبی‌ها به مقیاس لگاریتمی انتقال داده شود و معیار NS بر روی آنها اجرا شود (معادله ۱۵)، به جریان‌های پایین وزن بیشتری داده خواهد شد؛ زیرا در این حالت به دلیل استفاده از تابع لگاریتم، بزرگی مقدار دبی‌های بالا در مقایسه با دبی‌های کم بسیار کاهش می‌یابد و بنابراین، مقدار خطای مدل در پیش‌بینی دبی‌های بالا تعدیل می‌شود. این مسئله نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی دبی‌های پایین موفق‌تر عمل کرده است. هیدروگراف‌های خروجی به دست-

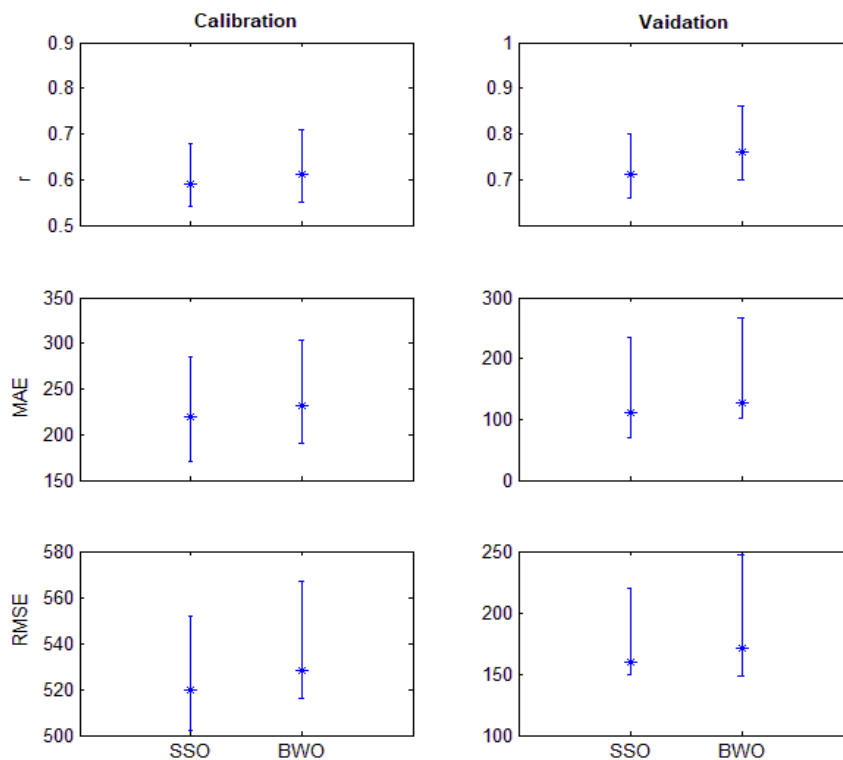
آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه زشک، در شکل ۹ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقادیر دبی در این شکل ها مربوط به سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ است و از ارائه نتایج دبی جریان در سال ۲۰۰۸ صرف نظر شده است. در واقع، با توجه به اینکه مدل به صورت پیوسته و ادامه دار اجرا شده است، نتایج شبیه سازی در سال ۲۰۰۸ به عنوان دوره Warm Up منظور می شود. در این شکل، محدوده هیدروگراف های خروجی متناظر با جواب های بهینه موجود روی رویه پارتو - که توسط الگوریتم های SSO و BWO به دست آمده اند - برای کل دوره واسنجی نشان داده شد؛ به این صورت که به ازای هر زمان، مقادیر حداقل و حداکثر دبی شبیه سازی شده متناظر با مجموعه نقاط رویه پارتو محاسبه و فاصله آنها به صورت کاملاً ملموس در شکل ۹ و ۱۰ ارائه شد. ذکر این امر لازم است که هر نقطه از رویه پارتو متناظر با یک سری از متغیرهای تصمیم مسئله (یازده پارامتر سراسری مدل) WetSpa و یک مقدار دبی جریان در خروجی حوضه است. همان گونه که ملاحظه می شود، عرض باند هیدروگراف به دست آمده از الگوریتم BWO تا اندازه ای کمتر از عرض باند هیدروگراف SSO است؛ دلیل این مسئله به طور مشخص در کیفیت جستجو و پارامتریابی این دو الگوریتم است و نشان می دهد که الگوریتم BWO در حل مسئله واسنجی مدل WetSpa در حوضه زشک، نسبت به الگوریتم SSO به گونه ای متفاوت رفتار می کند. در تحقیقی (Hooshyarypor et al, 1397) تحت عنوان واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از بهینه سازی چندهدفه NSGA-II و PSO که بر روی حوضه کارون بزرگ و بر اساس رویه پارتو صورت گرفت، جواب های به دست آمده توسط NSGA-II بهتر از جواب های PSO بود؛ زیرا مقادیر NS آنها بین ۰/۵- و ۰/۱ و مقادیر NS-Log آنها بین ۷- و ۰/۳۵ بود. در این تحقیق نیز مدل واسنجی شده در دبی های پایین موفق تر بود.



شکل ۹: هیدروگراف خروجی به دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه آبخیز زشک برای دوره واسنجی

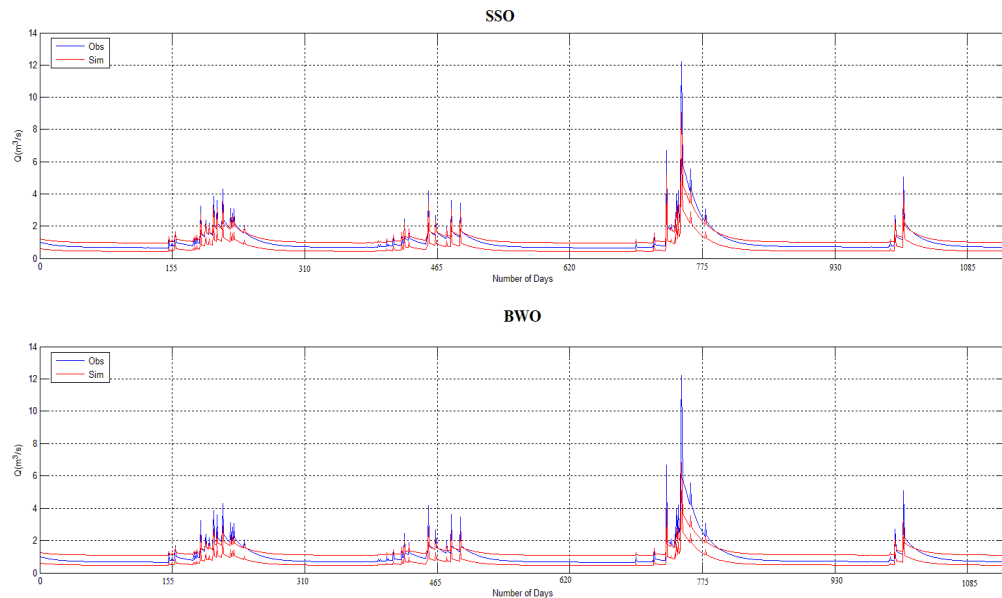
شکل ۱۰، مقادیر به دست آمده برای معیارهای ضریب همبستگی، متوسط قدر مطلق خطا و ریشه متوسط مربعات خطا را برای دو الگوریتم استفاده شده نشان می دهد. همان گونه که در شکل ملاحظه می شود روش BWO برای تمام

آماره‌های بررسی شده، در مقایسه با روش SSO مطلوبیت بالاتری دارد. این الگوریتم جزء روش‌های مناسب برای حل مسائل چند هدفه است که در این مثال نیز کارایی بالایی دارد.



شکل ۱۰: مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط به دست آمده برای معیارهای سنجش کیفیت شبیه‌سازی‌ها در واسنجی مدل WetSpa با الگوریتم‌های مختلف (اشکال سمت چپ و راست به ترتیب مربوط به دوره واسنجی و صحت‌سنجی است).

هیدروگراف‌های خروجی شبیه‌سازی‌شده متناظر با الگوریتم‌های SSO و BWO برای سال‌های ۲۰۱۲-۲۰۱۴ از دوره صحت‌سنجی، در شکل ۱۱ نشان داده شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، باند دبی شبیه‌سازی تا حد قابل ملاحظه‌ای عریض شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که پهنای باند نتایج SSO از نتایج BWO بیشتر بود و همین مسئله باعث شد که اکثر مقادیر مشاهداتی در باند نتایج قرار گیرد؛ در حالی که نتایج BWO در برخی زمان‌ها، مقادیر مشاهداتی دبی جریان را پوشش نمی‌دهند. اگرچه مطابق شکل ۱۰، گاه کیفیت نتایج به دست آمده در دوره صحت‌سنجی بهتر از دوره واسنجی بود، ولی در بین پاسخ‌های شکل ۱۱ جواب‌هایی نیز یافت می‌شد که کیفیت مناسبی نداشت؛ از جمله، دبی‌های حداکثر که در برخی موارد خارج از باند قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که این مدل، وقوع سیلاب‌ها را پیش‌بینی می‌کند، ولی دقت پیش‌بینی در برخی زمان‌ها چندان رضایت‌بخش نیست. البته در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نیز اختلاف مقادیر دبی پیش‌بینی و مشاهداتی حتی در انتهای دوره (ماه‌های آخر سال ۲۰۱۱) به همین صورت وجود دارد، اما به دلیل مقیاس گراف و محدوده تغییرات دبی بر محور قائم، این اختلافات کمتر دیده می‌شود؛ به جز در سه ماه ابتدای دوره شبیه‌سازی - که بین نتایج کمی اختلاف وجود دارد - در باقی دوره نتایج قابل قبول و رضایت‌بخش است.



شکل ۱۱: هیدروگراف‌های خروجی به دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه زشک برای دوره صحت‌سنجی

در جدول شماره ۳ حدود مجاز تغییرات و مقادیر به دست آمده در فرایند واسنجی، یازده پارامتر سراسری مدل WetSpa با استفاده از الگوریتم SSO به دست آمد.

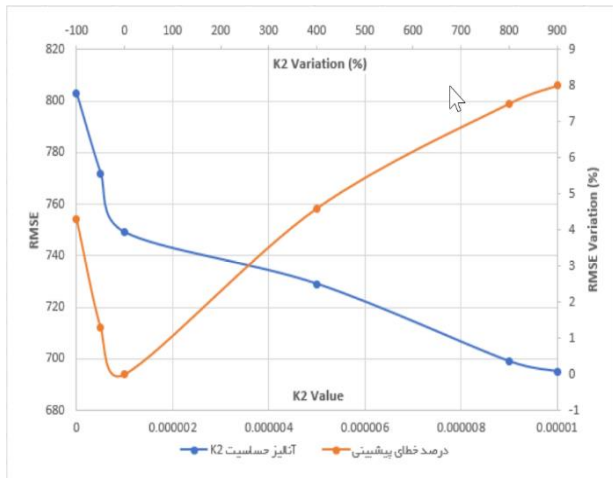
جدول ۳: پارامترهای سراسری حاصل از واسنجی مدل در حوضه آبخیز زشک

پارامتر	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
Min	۰	$6e-5$	۱	۰/۱	۳۸۰	۱۹۶۰	-۱	۰/۰۲	$e-7$	۵	۴۵۰
Max	۱/۳	$9e-5$	۱/۵۳	۲/۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱	۰/۶	$4e-5$	۷	۶۳۰
مقدار	۰/۱۸۸	$6/5e-5$	۱/۵	۱/۹۸	۴۲۵	۱۹۰۰	۰/۹۸	۱/۳۷	۰/۰۴۷	۴/۳	۴۳۵

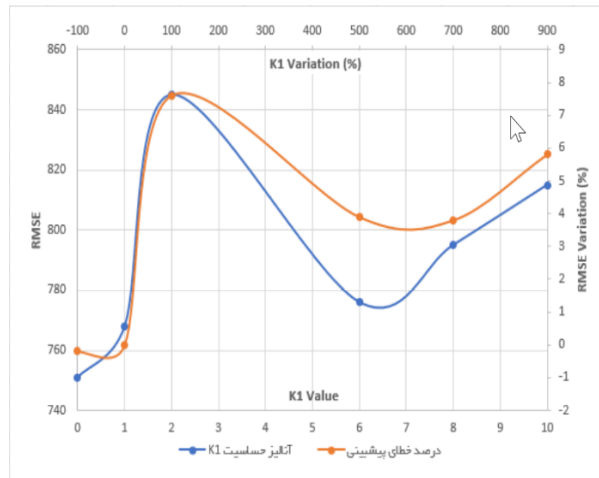
۴- آنالیز حساسیت مدل‌ها

هدف از تجزیه و تحلیل حساسیت، قابلیت شناسایی در مدل‌سازی مدل‌های بارش - رواناب، شناسایی ساختار مدل و مجموعه پارامترهای متناظر است که ضمن در نظر گرفتن جنبه‌هایی مانند اهداف مدل‌سازی و داده‌های موجود، بیشترین حالت‌های بررسی یک حوضه آبریز را نشان می‌دهد (Wagner et al, 2001). به منظور بررسی حساسیت، ابتدا مدل با توجه به داده‌های جدول ۳ تنظیم شد و با جمعیت اولیه و تعداد نسل‌ها برابر صد، و توابع هدف به ترتیب NASH-HF و RMSE در نظر گرفته شد. در این تحلیل، ارزیابی خطا به ازای کل داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی انجام شد. در شکل ۱۲ نیز نحوه تغییرات RMSE به ازای تغییر پارامترهای مدل نشان داده شد. به علاوه در هر یک از اشکال، تغییرات به صورت درصدی نشان داده شد. در شکل ۱۲، منحنی‌هایی که نارنجی رنگ است، خطای مدل (محور قائم در سمت چپ) در مقابل مقدار C (محور افقی پایین) و منحنی‌هایی که آبی رنگ است، حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامتر F را نشان می‌دهد؛ به طوری که بیانگر درصد افزایش یا کاهش RMSE (محور قائم راست) نسبت به

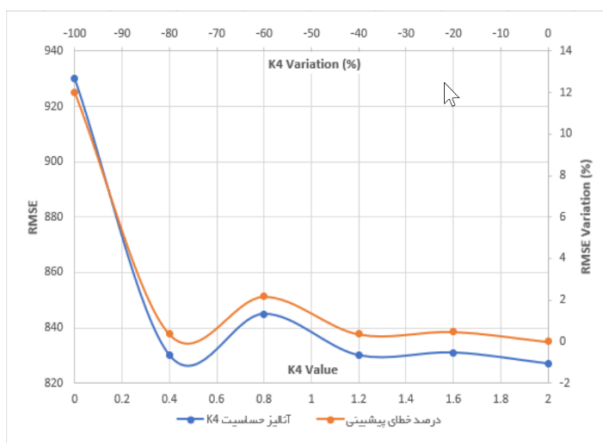
درصد تغییرات F (محور افقی بالا) است. ذکر این امر لازم است که خطاهای نسبی (درصد تغییرات RMSE)، با توجه به پیش‌بینی دبی جریان به ازای مقادیر بهینه یازده پارامتر سراسری مدل سنجیده شده‌است.



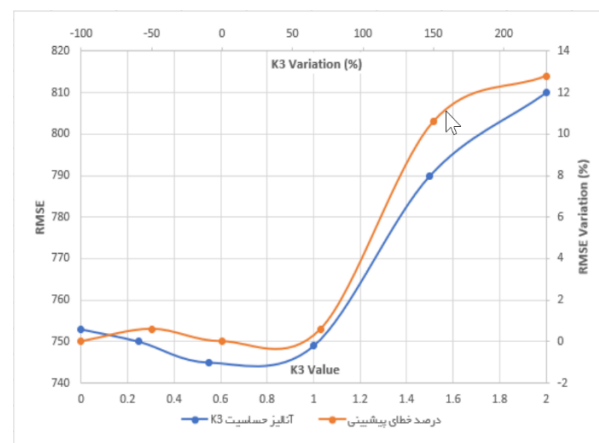
(ب)



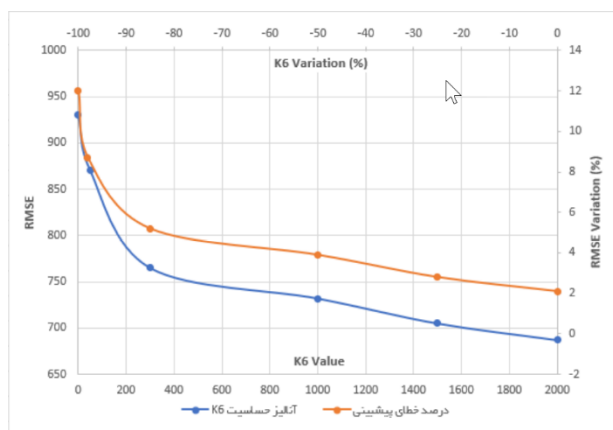
(الف)



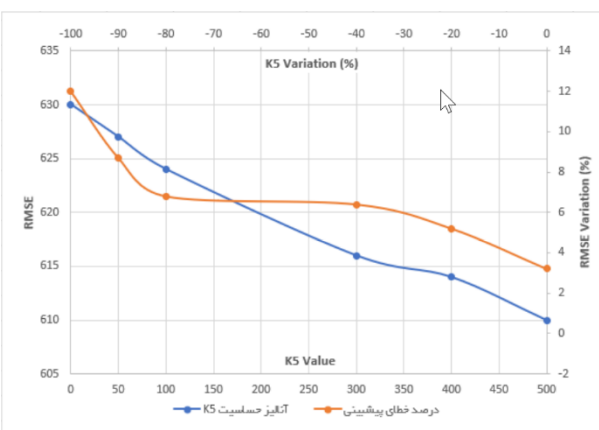
(د)



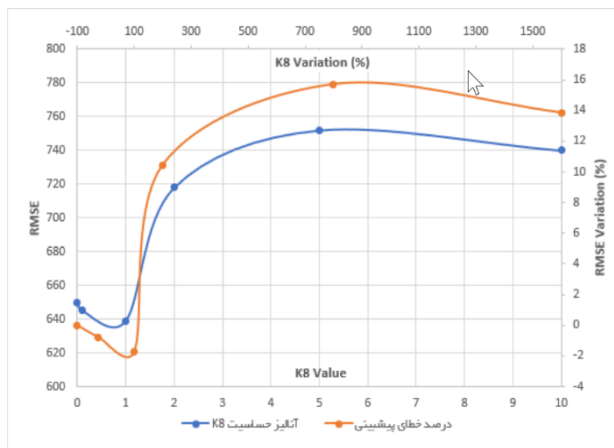
(ج)



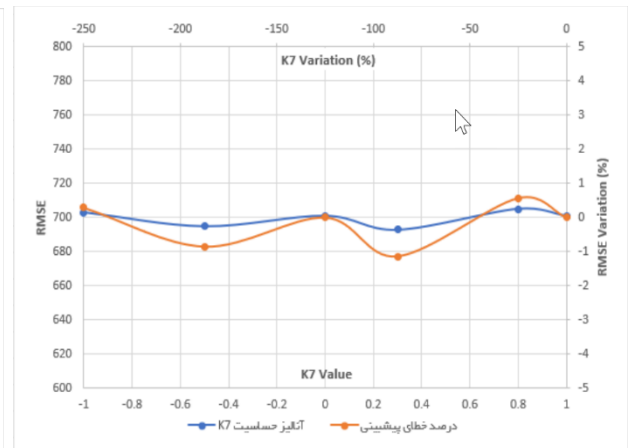
(و)



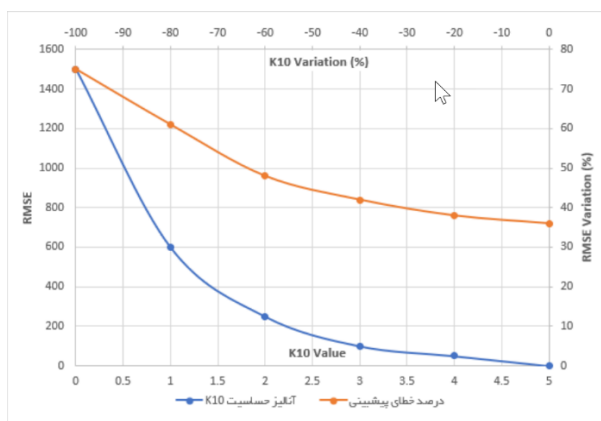
(ه)



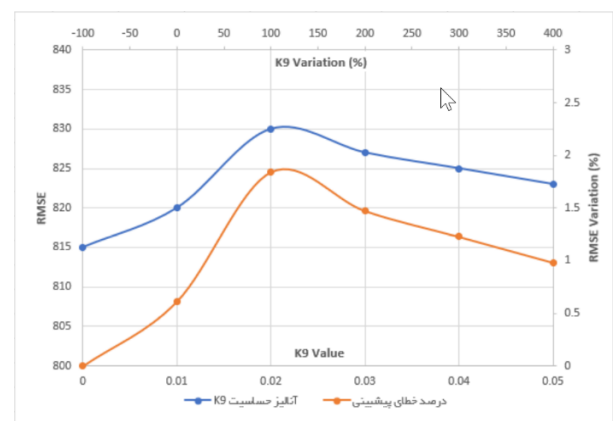
(ح)



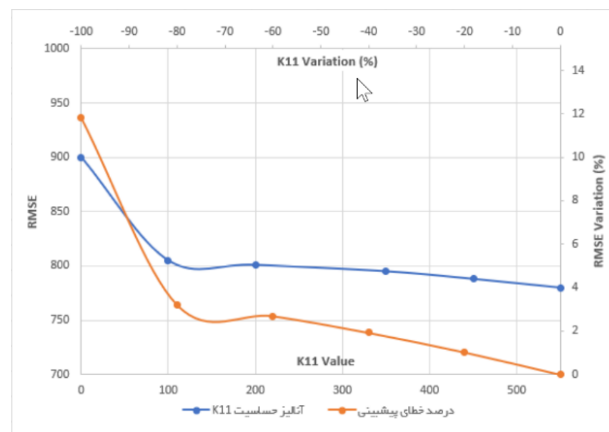
(ز)



(ی)



(ط)



(ک)

شکل ۱۲: آنالیز حساسیت مدل WetSpa نسبت به پارامترهای سراسری یازده گانه

نتایج شکل ۱۲- الف نشان می‌دهد که با افزایش پارامتر K_1 ، تأثیر زیادی در نتایج شبیه‌سازی حوضه زشک مشاهده نمی‌شود؛ به طوری که با پنج برابر شدن مقدار این پارامتر، تغییرات RMSE از ده درصد فراتر نمی‌رود. با توجه به منحنی شکل ۱۲- الف، با افزایش مقدار K_1 از صفر تا دو، خطا حدود ۷/۶ درصد افزایش می‌یابد و به مقدار حداکثر

خود نزدیک می‌شود و بالعکس با افزایش مقدار K_1 از مقدار ۲ تا ۸، خطا کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت، به ازای $K_1=8$ به ۳ درصد کاهش پیدا می‌کند. ضریب فروکش آب زیرزمینی به عنوان دومین پارامتر سراسری مدل مورد بحث، اهمیت زیادی در حوضه زشک دارد. محدوده شدنی این پارامتر در بازه $[0.01/0.1]$ و محدوده جواب‌های رویه نمودار پارتو بین $[6E-6/8E-6]$ است. همچنین نتایج تجزیه و تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که افزایش این پارامتر به بالا رفتن مقدار دبی پایه حوضه آبخیز و افزایش خطای RMSE تا هشت درصد منجر می‌شود. در حوضه زشک، مدل به تغییرات این پارامتر بسیار حساس است و قابلیت تولید دبی صفر را دارد. بهترین جواب در همسایگی بسیار کوچکی از $5E-6$ و $6E-6$ است. مطابق شکل ۱۲-ج، مقدار بهینه K_3 مؤلفه رطوبتی اولیه خاک حدود 0.06 است. محدوده جواب‌های رویه پارتو برابر محدوده شدنی این پارامتر در بازه $[0.2/0]$ است. در حوضه زشک، مقدار بهینه K_4 ضریب اصلاحی تبخیر در حدود 0.46 بود و برای مقادیر کمتر از آن، خطای نسبی می‌تواند تا حدود ده درصد افزایش یابد. مقادیر K_5 یا ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی در عمق در بازه $[0.5/0]$ پیشنهاد شد. مطابق شکل ۱۲-ه در حوضه زشک مقدار خطای ناشی از تغییرات این پارامتر، ناچیز و حساسیت مدل به مقدار این پارامتر بسیار کم ارزیابی شد. مطابق نتایج شکل ۱۲ و با افزایش مقدار این پارامتر، خطای محاسباتی کمتر می‌شود و به عبارتی، حساسیت مدل نسبت به ابتدای بازه کمتر می‌شود. در حوضه زشک، مدل نسبت به تغییرات K_7 دمای پایه ذوب برف حساسیت چندانی ندارد. بازه شدنی K_8 ضریب درجه - روز دما در محدوده $[0.1/0]$ در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۱۲-ز در حوضه زشک در همسایگی مقدار صفر، RMSE کمترین مقدار خود را دارد و با زیاد شدن این پارامتر، مقدار خطا تا حدود شانزده درصد افزایش می‌یابد. بازه شدنی K_9 ضریب درجه - روز بارندگی در محدوده $[0.05/0]$ است. مطابق شکل ۱۲-ط در حوضه زشک، خطای مدل در نزدیکی صفر برای این پارامتر کمترین مقدار بود و با تغییر آن، نتایج مدل آن چنان تغییر نمی‌کند. بازه شدنی K_{10} ضریب رواناب سطحی در محدوده $[0.5/0]$ پیشنهاد می‌شود که در حوضه زشک خطای مدل در مجاورت عدد $4/5$ و 5 مناسب است. حساسیت مدل نسبت به کم شدن این پارامتر به خصوص برای اعداد کمتر از یک، زیاد بود و به جواب‌های غیرقابل قبول منجر شد. بازه شدنی K_{11} آستانه شدت بارش در محدوده $[0.5/0]$ در نظر گرفته شد. در حوضه زشک، RMSE در مجاورت مقدار 500 کمترین بود و با کم شدن آن، مقدار خطا در آن حوضه تا حدود ۳۶ درصد افزایش یافت.

۵- نتیجه گیری

مقاله حاضر به واسننجی مدل بارش - رواناب توزیعی WetSpa می‌پردازد. برای واسننجی مدل، از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی عنکبوت اجتماعی (SSO) و عنکبوت بیوه سیاه (BWO) در حوضه زشک مشهد استفاده شد. نتایج به دست آمده از کاربرد مدل در این حوضه بیانگر قابلیت رضایت‌بخش این الگوریتم‌ها در واسننجی مدل WetSpa است. مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم SSO و BWO نشان داد که در مسئله واسننجی چند هدفه، الگوریتم BWO اندکی موفق‌تر از مدل SSO عمل کرده‌است. ضعف مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی برخی سیلاب‌ها، می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های استفاده شده در حوضه زشک باشد؛ بنابراین، افزایش طول دوره شبیه‌سازی می‌تواند به افزایش دقت مدل استفاده شده منجر شود. همچنین نتایج نشان داد که کیفیت شبیه‌سازی دبی‌های پایین، بیش از دبی‌های بالا بود. دلیل این مسئله را می‌توان نخست به فراوانی کمتر دبی‌های بالا در مجموعه داده‌های بررسی شده و دوم به

واکنش نسبتاً کند مدل به تغییر شرایط هیدرولوژیکی در شرایط سیلابی در حوضه زشک نسبت داد؛ زیرا ضریب ذخیره موقت آب زیرزمینی (K_5) مقدار بزرگی را به خود اختصاص داده است که می تواند به تأثیر مستقیم در کاهش رواناب سطحی منجر شود. از طرفی، ضعف نتایج در پیش بینی برخی دبی های کم می تواند به مقدار بهینه ضریب فروکش آب زیرزمینی (K_2) مرتبط باشد که در فرایند واسنجی، مقدار کوچکی را اختیار کرده است؛ زیرا آب های زیرزمینی در تولید دبی های پایین در حوضه بالاترین تأثیر را دارد. به منظور ارزیابی حساسیت مدل واسنجی شده به پارامترهای سراسری و ارزیابی اهمیت آنها در حوضه زشک، تجزیه و تحلیل حساسیت مدل با داشتن مقادیر بهینه پارامترهای سراسری انجام شد؛ بدین صورت که تأثیر هر یک از پارامترهای مدل بر دقت نتایج ارزیابی شد. نتایج این مطالعه نشان داد که تأثیر ضریب رواناب سطحی بر نتایج مدل به نسبت سایر پارامترها بسیار بیشتر بود (حدود ۳۶٪). نتایج حاصل از این تحقیق در مقایسه با سایر پژوهش هایی (Hooshyarypor et al, 1397 & Mashari eshghabadi et al, 1396) که با مدل مشابه یا سایر مدل های هیدرولوژیکی و با الگوریتم های بهینه سازی چندهدفه متفاوت انجام شده است، به طور کامل تطابق داشت و مطلوب ارزیابی شد.

منابع

1. Azin, M., 2012. Simulation of land use change scenarios on hydrograph of dinour basin by using wetspa distributed-hydrological model, Master's thesis, Faculty of Rangeland and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
2. Azinmehr, M.; Bahremand, A.; & A. Kabir, 2016. Parameter Sensitivity and Uncertainty Analysis of the Model WetSpa in the Flow Hydrograph Simulation Using PEST, in Dinvar Basin. Karkheh, *Journal of Watershed Management Research*, 7(13), 72-82.
3. Bahremand, A.; De Smedt, F.; Corluy, J.; Liu, Y. B.; Poórová, J.; Velická, L.; & E. Kuniková, 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods by in Margecany-Hornad watershed, Slovakia, *Water Resources Management*, 21, 1376-1391.
4. Bahremand, A., & F. DeSmedt., (2008). Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa watershed. Slovakia. *Water Resources Management Journal*. 22(3), 393-408.
5. Bahremand, A., & F. DeSmedt., (2010). Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. *Water Resources Management*. DOI: 10.1007/s11269-010-9584-1.
6. Bates, B. C., & E. P. Campbell., (2001). Runoff modeling. *Water Resour. Res.* 37(4), 937-947.
7. Chau, K. W., 2007. Application of a particle swarm optimization algorithm to hydrological problems, *Water Resources Research Progress*. Robinson (ed.). Nova Science Publishers.
8. De Smedt, F.; Liu, Y. B.; & S. Gebremeskel, 2000. Hydrological modelling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, *Brebbia, C.A. (ed.)*, 295-304, Risk Analyses II, WIT Press, Southampton, Boston.
9. Donyaii, A.; Sarraf, A.; & H. Ahmadi, 2020. Water Reservoir Multiobjective Optimal Operation Using Grey Wolf Optimizer, Hindawi Publishing Corporation, *Applied Advances in Meteorology*.
10. Donyaii, A.; Sarraf, A.; & H. Ahmadi, 2021. Performance Comparison of Meta-Heuristic Algorithms in the Optimal Operation of Water Reservoirs "Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability".
11. Ghasemi, H.; Sarraf, A.; & A. Donyaii, 2021. Calibration of IHACRES Hydrological Model Using Social Spider and Search and Rescue Multi-Objective Optimization Algorithms, *Hydrogeomorphology Journal*.

12. Gholkhani, H.; Hoshyaripour, F.; Kouhian-afzal, F.; & M. Shafiei-hasanabadi, 2021. Calibration of WetSpa model using NSGA-II and PSO multi-objective optimization algorithms, *Water Engineering Journal*, 11(39), 15-34.
13. Imani, R.; Ghasemieh, H.; & A. E. Ouri, 2016. Application and Calibration of WetSpa Hydrological Model for Daily Runoff Simulation for 2007-2008 to 2011-2012 Water years: A Case Study: Balokhluchay Watershed, Ardabil, and Northwestern Iran, *International Bulletin of Water Resource & Development*, 3(4), 140-152.
14. Kabir, A., & A. Bahremand., (2013). Investigating the uncertainty of the parameters of the rainfall-runoff model using the monte carlo method wetspa. *Water and Soil Conservation Research Journal*. 20(5), 81-97 (In Persian).
15. Karimi, H.; Zeinivand, H.; Tahmasebipour, N.; Haghizadeh, A.; & M. Miryaghoubzadeh, 2016. Comparison of SRM and WetSpa models efficiency for snowmelt runoff simulation, *Environmental Earth Sciences*, 75(664), 1-16.
16. Liu, Y. B., & F. De Smedt., (2004). WetSpa Extension, A GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management documentation and user manual, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering.
17. Sabercharny, K.; Bahremand, A.; & H. Salmani, 2015. Simulation of River Flow Daily Using Distributed Hydrological Model WetSpa, Case Study: Arzakoush, Gorganroud Watershed Basin, Gorgan Province, *Quarterly journal of research on water resources and development*, 2(10), 24-34. Vrije Universiteit Brussee.
18. Safari, A.; De smedt, F.; & F. Moreda., 2009. WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP2), *Journal of Hydrology*, 419, 78-89.
19. Saltelli, A.; Chan, K.; & E. M. Scott, 2000. Sensitivity analysis, Wiley, Chichester, UK. pp, 3-13.
20. Van Griensven. A., 2002. Developments towards integrated water quality modeling for river basins, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Calibration of WetSpa Model using Black Widow Spider and Social Spider Multi-objective Optimization Algorithms

Amirpouya Sarraf¹: Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

Hojjatollah Ghasemi: Ph.D. Student, Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

Article History (Received: 2021/08/27

Accepted: 2022/01/22)



20.1001.1.22517812.1401.12.2.8.5

Extended abstract

1. Introduction

By developing GIS and remote sensing technology, the widespread access possibility and local distribution of hydrological management parameters and variables have become practical. Runoff rainfall modeling is always an important and continuous need for practical issues in the fields of water resources evaluation, flood forecasting, engineering canals designing, and many other goals (Bone, 2001). Calculation of runoff-rainfall results has been made practical and operationalized by using GIS techniques and a distributed hydrological model. The WetSpa runoff-rainfall model is a hydrological-distribution model that was developed in Brussels in 1997 (Wange et al, 1997) and also, had been used in various research and executive projects by developing in various models. This hydrological model has the capability of performing simulations at the pixel level and because of this, it provides the possibility of using aerial and satellite images with accurate information measured at the basin level, which has a local distribution (Hooshyarypor et al, 1397). Due to the high uncertainties of hydrological parameters, the calibration model is one of the most important part of modeling whose optimization techniques are mainly are used for such purposes. There are various methods for optimization, sensitivity analysis, and also evaluation of uncertainty of models. Accordingly, this paper's purpose is to calibrate the WetSpa hydrological model with a multi-objective optimization approach that uses the Social Spider Algorithm (SSA) and the Black Widow Spider (BWO) techniques. By this point of view, to achieve a reliable prediction, in addition to the usual discharges, the model must be able to predict high and low discharges accurately (including maximum and minimum), so the objective functions are selected in a way that the best match between observational and computational values can be achieved during the Vasanji process.

2. Materials and Methods

2.1. WetSpa Model

WetSpa is a continuous local and temporal model in which all of the simulations are conducted continuously. The WetSpa model displays the water and energy balance for each calculation cell, considers rainfall processes, vegetation, snowmelt, wetting, infiltration, evapotranspiration, leakage, surface runoff, wall flow, and groundwater flow. The hydrological system simulated by this model consists of four layers: vegetation, soil surface, root zone, and saturated groundwater table.

2.2. The Optimization algorithms

The Social Spider Optimization (SSO) algorithm is a new optimization approach which is proposed in 2013 by Kauser et al. Another optimization approach used in this paper is the Black Widow Spider (BWO) optimization algorithm. During the day, the black widow spider is out of sight and is mostly nocturnal, and rotates its network during the night. Generally, the widow spends most of her adult life on the same site (Andrite and Banta, 2002).

2.3. Objective functions and model evaluation

¹ Corresponding Author: sarraf@riau.ac.ir

In this paper, to evaluate the model, five statistical indices have been used of correlation coefficient (r), Root Mean Square Error (RMSE), mean absolute error (MAE), Nash-Sutcliffe index, and Nash-Sutcliffe logarithmic index. To increase the accuracy of the model in predicting the minimum and maximum flows, two algorithm Nash-Sutcliffe and Nash-Sutcliffe logarithmic criteria were used.

2.4. Zashk basin and model data

Zashk Basin is located in Khorasan Razavi province and in the west of Mashhad with an area of 65.56 square kilometers.

3. Result and Discussion

In this part of the paper, the calibration results of the WetSpa model using social spider and black widow spider algorithms are presented. The problem decision variables are the 11 global parameters illustrated in Table 1. Objective functions must be selected in a way that at the end of the calibration process the best match between the observed and computational values can be obtained. Some of these functions give more weight in high flows, while others consider more weight in low flows and have more emphasis on them. In this regard, Nash-Sutcliffe (NS) criterion and its logarithmic form (NS-Log) have been used. In this paper, the results obtained based on these two functions are illustrated. After determining all the necessary local networks in basin modeling, precipitation, evaporation, temperature, and discharge information from 2009 to 2011 were used to calibrate the model and 2012 to 2014 data were used to validate the results. Each of the optimization algorithms was conducted with an initial population size of 100 people and over 100 generations (number of times the optimization model was executed). As it was observed, the answers obtained by BWO are better than the answers of SSO due to its higher NS values. According to the obtained results, NS and NS-Log values are generally from -2.3 to 0.75 and from -0.165 to -0.01, respectively. This problem illustrates that the calibrated model has been more successful in simulating low discharges. In fact, since the model has been executed continuously, the simulation results in 2008 are considered as the Warm-Up period.

4. Conclusion

This paper calibrated the WetSpa distributed rainfall-runoff model. To calibrate the model, two evolutionary optimization algorithms of social spider (SSO) and black widow spider (BWO) were used in the Zashk basin of Mashhad. The results obtained from the usage of the model in this basin illustrated the satisfactory capability of these algorithms in calibrating the WetSpa model. Comparing the results obtained from the SSO and BWO algorithms illustrated that in the multi-objective calibration problem, the BWO algorithm was slightly more successful than the SSO model. Also, the results indicated that the simulation quality of low discharges was higher than the high ones. The reason for this problem, firstly, can be due to the lower abundance of high discharges in the evaluated data set and secondly, the relatively slow response of the model to changes in hydrological conditions in flood conditions in the catchment basin, because the temporary groundwater storage coefficient (K_5) allocated a large amount for itself that can directly affect the reduction of surface runoff. On the other hand, the weakness of the results in predicting some low discharges can be related to the optimal value of groundwater recession coefficient (K_2), which has taken a small amount in the calibration process. The results of this study illustrated that the effect of the surface runoff coefficient on the model results is much greater than other parameters (about 36%).

Keywords: The Social Spider algorithm, Black Widow Spider algorithm, Zask-Mashhad basin, The WetSpa rainfall-runoff model, Calibration.