



## واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت اجتماعی و جستجو و نجات

امیر پویا صراف\*، حجت‌الله قاسمی<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲- دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

### چکیده

مدل‌های بارش - رواناب به عنوان یکی از ابزارهای ساده و در عین حال کارآمد، در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی کاربرد فراوان دارند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات ورودی از قبیل دما، بارش، تبخیر - تعرق و اطلاعات توپوگرافی حوضه، رژیم جریان را با استفاده از روابط ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند. در پژوهش حاضر، قابلیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی و عملیات جستجو و نجات در واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه رودخانه‌ی اعظم هرات در استان یزد مورد ارزیابی قرار گرفته است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی فوق به صورت چندهدفه برای واسنجی شش پارامتر سراسری مدل IHACRES استفاده شدند. توابع هدف در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل دو شاخص نش - ساتکلیف و نش - ساتکلیف لگاریتمی بوده تا به وسیله‌ی آنها عملکرد مدل در پیش‌بینی دبی‌های حداکثری و حداقلی مشخص گردند. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، از آن برای شبیه‌سازی سیلاب برای دوره‌ی زمانی ۲۰۰۵-۲۰۰۴ در حوضه‌ی مذکور استفاده گردید و قابلیت مدل ارزیابی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی و عملیات جستجو و نجات به ترتیب معادل ۰/۸۱ و ۰/۶۹، عملکرد خوب و قابل قبولی را در واسنجی مدل داشته‌اند. در نهایت مشاهده شد که الگوریتم بهینه‌سازی عملیات جستجو و نجات برای واسنجی مدل فوق مناسب‌تر می‌باشد. همچنین، آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر نشان داد که ضریب رواناب سطحی، حساس‌ترین پارامتر سراسری مدل IHACRES بوده است.

**کلمات کلیدی:** واسنجی، الگوریتم عنکبوت اجتماعی، الگوریتم عملیات جستجو و نجات، مدل بارش - رواناب IHACRES،

حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات یزد

### ۱- مقدمه

یکی از ابزارهای اساسی در مدیریت منابع آب بررسی و تعیین مقدار رواناب در حوضه‌های آبریز است. شبیه‌سازی جریان رودخانه به منظور آگاهی از آورد رودخانه و دستیابی به پیش‌بینی قابل اعتماد و مناسب جریان آن در کارهای عمرانی و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی دارای اهمیت ویژه‌ای است. بدون تحلیل دقیق داده‌های بارش - رواناب مشاهده‌ای و پیش‌بینی دبی‌های زیاد و کم با دقت مناسب، مدیریت جامع حوضه‌ی آبریز برای پیش‌بینی وقوع سیلاب و کاهش خطرات ناشی از آن سبب هدررفت سرمایه و عدم ایجاد توسعه پایدار خواهد شد. از سویی دیگر، فقدان ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری یا کمیت و کیفیت اندک آمار آن‌ها، لزوم استفاده از روش‌های شبیه‌سازی بارش - رواناب در قالب مدل‌های هیدرولوژیکی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند بگونه‌ای که روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی این مشکل را رفع نموده‌اند. (کوپر و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۲). برای شبیه‌سازی رابطه بارش - رواناب مدل‌های هیدرولوژی متفاوتی طراحی شده است. که یکی از جدیدترین این مدل‌ها، مدل بارش - رواناب IHACRES<sup>۱</sup> می‌باشد که به صورت مشترک توسط دانشگاه ملی استرالیا و مرکز اکولوژی و هیدرولوژی انگلستان توسعه یافته است. این مدل به گونه‌ای عمل می‌نماید که به دلیل احتیاج به داده‌های کم و قدرت بالا در تخمین روزانه همواره مورد توجه متخصصین علم هیدرولوژی بوده است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۹: ۲). در این راستا یه و همکاران (۱۹۹۷) به ارزیابی عملکرد مدل در IHACRES در سه حوضه آبریز در استرالیا در مقیاس روزانه پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس معیار نش - ساتکلیف این مدل دارای کارایی بالایی است و میزان خطای مطلق این مدل در جریان روزانه برابر با ۱۰ میلی متر در روز است. دی و کروک (۲۰۰۳) با استفاده از مدل IHACRES به ارزیابی جریان در دو حوضه آبریز در آفریقای جنوبی پرداختند نتایج نشان داد این مدل از دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی جریان برخوردار است. لیتلوود و همکاران (۲۰۰۷) استفاده از دو مدل MGB و IHACRES جریان روزانه را در دو حوضه در کشور برزیل شبیه‌سازی کردند. نتایج ایشان نشان داد که مدل ساده‌تر IHACRES مبتنی بر هیدروگراف واحد به خوبی مدل پیچیده‌تر MGB عمل می‌کند. کروک و جکمن (۲۰۰۸) قابلیت مدل IHACRES را در چهار حوضه‌ی آبریز واقع در استرالیا در مقیاس روزانه بررسی نمودند. نتایج حاصل بر اساس معیار نش - ساتکلیف عملکرد مناسب مدل IHACRES را نشان داد. کارکانو و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دو مدل IHACRES و شبکه عصبی مصنوعی به مدل‌سازی جریان روزانه در شمال ایتالیا پرداختند نتایج حاصل عملکرد مناسب مدل IHACRES را نشان داد. زارعی و همکاران (۲۰۰۹) به شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش - رواناب IHACRES در حوضه‌ی آبریز کسلیان پرداختند. نتایج نشان داد که این مدل توانایی شبیه‌سازی جریان‌های روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبولی دارد ولی در شبیه‌سازی سالانه از

1- Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Stream flow data

دقت کمتری برخوردار است و شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به جریان روزانه نیز قابل قبول‌تر است. وردیان و همکاران (۲۰۱۴) به ارزیابی کارایی مدل IHACRES در شبیه‌سازی جریان روزانه و ماهانه در حوضه آبریز ناورود در استان گیلان پرداختند. نتایج نشان داد که کارایی مدل در شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به جریان روزانه بیشتر است. بورزی و همکاران (۲۰۱۹) ضمن مطالعه‌ی ارتباط بین سیستم آب زیرزمینی اتنا شمالی و حوضه‌ی رودخانه‌ی آلکانتارا در سیسیل (ایتالیا) از طریق یک نسخه اصلاح شده از مدل بارش - رواناب IHACRES دریافتند که مدل اصلاح‌شده IHACRES در بررسی فعل و انفعالات بین آبخوان و رودخانه نسبت به مدل اصلی IHACRES عملکرد بهتری داشته است. مطالعات نشان داده است که روش‌های بهینه‌سازی محلی در تعیین پارامترهای بهینه مدل، ممکن است در دام نقاط بهینه‌ی محلی گرفتار شوند زیرا توابع هدف یک مسأله بهینه‌سازی می‌تواند غیرخطی بوده و دارای چندین نقطه‌ی محلی باشد (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰a). بگونه‌ای که روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری این مشکل را رفع نموده‌اند و به‌همین دلیل امروزه این روش‌ها، توسعه‌ی بسیار زیادی یافته و کاربرد آنها در مسائل مهندسی افزایش یافته است (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۱: ۶). در سه دهه‌ی گذشته گزارش‌های متعددی در زمینه‌ی واسنجی اتوماتیک بارش-رواناب با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی سراسری ارائه شده‌اند (کوزرا و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰؛ سرووشیان و دراکوپ<sup>۲</sup>، ۱۹۸۰) که نشان‌دهنده‌ی قابلیت این روش‌ها در واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی بوده است. بکارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری جدید که تا کنون از آنها در حوضه‌ی مهندسی منابع آب استفاده نگردیده (با لحاظ نمودن این موضوع که نسبت به سایر الگوریتم‌های مرسوم از کارایی بیشتری برخوردار می‌باشند و استفاده از آنها نیز در سایر صنایع، حاکی از برتری آنها نسبت به الگوریتم‌های مرسوم بوده است) نکته‌ای است که در پژوهش حاضر، نوعی نوآوری به‌شمار می‌آید و این درحالیست که پیش‌تر نیز استفاده و مقایسه‌ی الگوریتم‌های مرسوم نظیر ژنتیک، ازدحام ذرات و ... در تعیین مقدار بهینه با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه توسط بسیاری از محققین صورت گرفته بود (دنیائی و همکاران، ۲۰۲۰b). لذا در این پژوهش واسنجی مدل هیدرولوژیکی IHACRES و تعیین مقدار بهینه پارامترهای مختلف آن با در نظر گرفتن بازه‌ی تغییرات آنها با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مد نظر می‌باشد که در آن از تکنیک‌های الگوریتم عنکبوت اجتماعی<sup>۳</sup> (SSO) و عملیات جستجو و نجات<sup>۴</sup> (SAR) استفاده گردیده است. هدف از بهینه‌سازی در این پژوهش، دستیابی به یک پیش‌بینی قابل اعتماد بوده تا مدل قادر باشد علاوه بر دبی‌های معمول، دبی‌های زیاد و کم (از جمله حداکثری و حداقلی) را با دقت مناسب پیش‌بینی نماید. لذا توابع هدف<sup>۵</sup> به نحوی انتخاب شدند که طی فرایند واسنجی،

1- Kuczera et al.

2- Sorooshian and Dracup

3- Social Spider Optimization Algorithm

4- Search and Rescue Algorithm

5- Objective functions

بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی برآورد شود. برخی توابع خطا به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهند در حالی که برخی دیگر اهمیت بیشتری را به جریان‌های پایین می‌دهند. لذا در این مقاله سعی شده در فرمول‌بندی چندهدفه، تعادلی بین این دو در نظر گرفته شود.

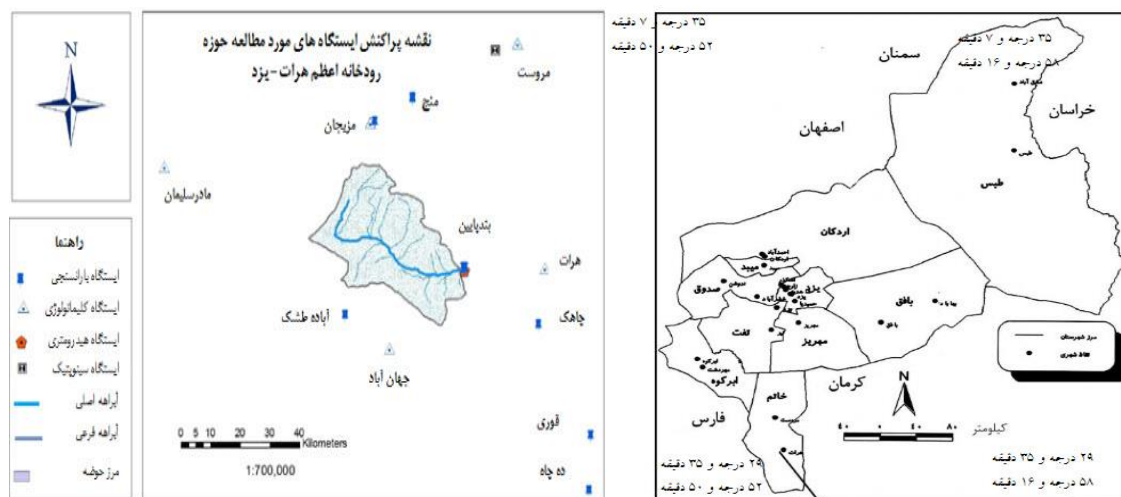
## ۲- مواد و روش

در این پژوهش به ارزیابی و مقایسه دو الگوریتم تکاملی بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی (SSO) و عملیات جستجو و نجات (SAR) در راستای واسنجی مدل بارش - رواناب IHACRES در حوضه رودخانه اعظم شهرستان هرات استان یزد پرداخته شد. شایان ذکر است که استفاده از الگوریتم‌های فوق‌الذکر برای اولین بار در مهندسی منابع آب و علم هیدرولوژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به طوری که جهت سازماندهی ساختار ویژه الگوریتم‌های مذکور، ابتدا فرایند کدنویسی الگوریتم‌ها در نرم افزار متلب صورت گرفت و سپس در واسنجی پارامترهای مدل بارش - رواناب IHACRES مورد استفاده قرار گرفت.

### ۲-۱- حوضه مطالعاتی رودخانه اعظم هرات و داده‌های مدل

منطقه‌ی مطالعاتی این تحقیق، حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات واقع در استان یزد و در موقعیت جغرافیایی  $53^{\circ}61'$  تا  $54^{\circ}1'$  طول شرقی و  $29^{\circ}78'$  تا  $30^{\circ}18'$  عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). وجود نزولات جوی نسبتاً مناسب در ارتفاعات غربی و جنوب غربی دشت هرات که اغلب بصورت برف می‌باشد، باعث ایجاد رودخانه‌ی اعظم (خوانسار) و بوانات (مروست) گردیده که تنها رودخانه‌های دائمی استان یزد می‌باشند. سطح حوضه‌ی آبریز این رودخانه تا محل روستای بند پایین ۱۰۱۷ کیلومتر مربع و حداکثر ارتفاع این حوضه ۳۲۰۰ متر و ارتفاع متوسط آن حدود ۲۳۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. از دیدگاه زمین‌شناسی، محدوده طرح منطقه‌ای است آبرفتی و تپه ماهوری با تراس‌های جوان دوران چهارم است. رخنمون‌های غالب حوضه را سازندهای کربناته کرتاسه و رسوبات تخریبی و تبخیری متعلق به نئوژن و پالئوژن تشکیل می‌دهد. سازندهای اخیر عموماً از فرسایش بالایی برخوردار است. میانگین سالانه دما در این حوضه از حدود ۱۹ درجه سانتی‌گراد در نواحی کم ارتفاع تا ۵/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات متغیر می‌باشد متوسط بارندگی این حوضه بالغ بر ۲۰۵ میلی‌متر در سال بوده به طوری که این مهم خود بر تنوع گونه‌های گیاهی و جانوری مؤثر بوده است. داده‌های روزانه بارندگی (میلی‌متر) و دما (درجه سانتی‌گراد) به عنوان متغیرهای ورودی<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی جریان و داده‌های مشاهداتی دبی روزانه (مترمکعب در ثانیه) در ایستگاه هیدرومتری بند پایین برای سنجش دقت مدل IHACRES بکار گرفته شده است.

1- Input variables

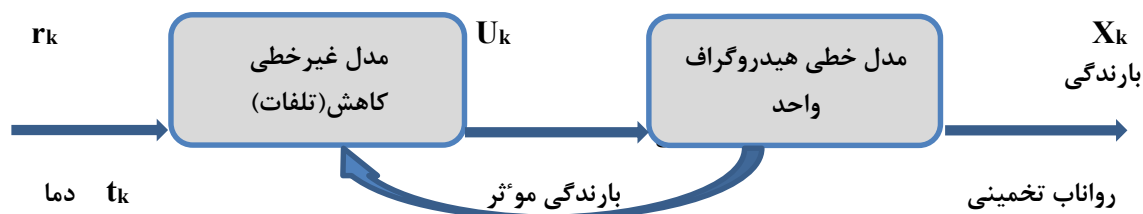


شکل (۱): موقعیت حوضه رودخانه‌ی اعظم در استان یزد (ایران)  
**Fig (1):** Location of the Azam River Basin in Yazd province (Iran)

بر اساس اطلاعات سال‌های موجود جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل، نتایج شبیه‌سازی در سال ۱۹۸۶ به عنوان دوره Warm up منظور شد و از سال ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۶ به مدت ۱۰ سال برای کالیبره کردن مدل و از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ به مدت چهار سال برای اعتبارسنجی استفاده گردید.

## ۲-۲- مدل هیدرولوژیکی IHACRES

IHACRES یک مدل یکپارچه مفهومی متریک<sup>۱</sup> برای شبیه‌سازی بارش - رواناب می‌باشد که توسط جیکمن در سال ۱۹۹۰ توسعه یافت. این مدل به پنج تا هفت متغیر برای واسنجی نیاز دارد و برای اجرا در حوضه‌های بزرگ مناسب است. اساس روش مذکور، از دو مدول غیرخطی کاهش و مدول خطی هیدروگراف تشکیل می‌شود. در این مدل، مقیاس زمانی متغیرهای ورودی به صورت روزانه، ساعتی و یا دقیقه است که در این تحقیق، آمار روزانه در نظر گرفته شده است. به این منظور در ابتدا، بارندگی ( $r_k$ ) و دما ( $t_k$ ) در هر گام زمانی  $K$  توسط مدول غیرخطی، به بارندگی مؤثر<sup>۲</sup> ( $U_k$ ) تبدیل و سپس به وسیله مدول خطی هیدروگراف واحد، به رواناب سطحی در همان گام زمانی تبدیل می‌شود (شکل ۲).



شکل (۲): مدل مفهومی شبیه‌سازی بارش - رواناب با مدول‌های خطی و غیرخطی مدل IHACRES  
Fig (2): Conceptual model of rainfall-runoff simulation using linear and nonlinear modulus of IHACRES model

#### ۲-۲-۱- مدول غیرخطی کاهش<sup>۱</sup>

به منظور تبدیل بارش به بارندگی مؤثر در حوضه، از ضریب رطوبتی حوضه<sup>۲</sup> که به صورت  $0 < S_k < 1$  نشان داده می‌شود استفاده گردید. هرچه حوضه قبل از بارندگی مرطوب‌تر باشد، مقدار تبدیل بارندگی به بارش مؤثر بر اساس رابطه‌ی شماره‌ی ۱ بیشتر خواهد بود:

$$U_k = S_k \times r_k \quad (1)$$

در حالتی که حوضه کاملاً خیس باشد ( $S_k=1$ ) تمامی بارش به بارندگی مؤثر تبدیل خواهد شد. از طرف دیگر ضریب رطوبتی حوضه تابعی از تبخیر و تعرق<sup>۳</sup> در حوضه بوده که با استفاده از روابط ۲ و ۳ بیان می‌گردد:

$$S_k = C \times r_k + \left(1 + \frac{1}{t_w(t_k)}\right) S_{k-1} \quad S_0 = 0 \quad (2)$$

$$t_w(t_k) = t_w e^{0.062f(R-tk)} \quad t_w(t_k) > 1 \quad (3)$$

#### ۲-۲-۲- مدول خطی هیدروگراف واحد<sup>۴</sup>

در روش مدل‌سازی بارش - رواناب، ساختار مدل به صورت دو ماژول سری بوده که ماژول مربوط به بارش مؤثر در قسمت قبل به آن پرداخته شد و ماژول هیدروگراف واحد برای تعیین رواناب کلی (مجموع جریان آهسته و سریع) می‌باشد که به صورت موازی عمل می‌کنند و با استفاده از رابطه‌ی ۴ بیان می‌گردد.

$$Q_k = \left[ \frac{(b_0^{(q)} / (1 + a_1^{(q)} z^{-1})) + (b_0^{(s)} / (1 + a_1^{(s)} z^{-1})) \right] u_{k-\delta} \quad (4)$$

همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود پارامترهای سراسری مورد استفاده در مدل بارش-رواناب IHACRES به تفصیل ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای جهانی مدل بارش - رواناب IHACRES

1- Non-linear loss  
2- Catchment Wetness Index

3- Evaporation and transpiration  
4- Linear UH module

**Table (1):** Global parameters of rainfall- runoff model of IHACRES

ردیف	پارامتر	واحد	عنوان پارامتر
۱	C	[mm]	ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه (Mass balance term)
۲	$\tau_w$	[day]	ثابت زمانی خشکیدگی حوضه (Drying rate reference temperature)
۳	f	⊙	فاکتور تعدیل حرارت (Temperature dependence of drying rate)
۴	$\tau^a$	---	ثابت زمانی کاهش جریان سریع (Time constant 2)
۵	$\tau^s$	---	ثابت زمانی کاهش جریان آهسته (Time constant 1)
۶	$v^s$	---	نسبت حجمی جریان آهسته که در جریان رودخانه مشارکت می‌کند (Volume proportion 1)

یک راهکار حذف اثر رطوبت اولیه خاک، در نظر گرفتن بخشی از سری زمانی در ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی به عنوان دوره‌ی Warm up است. در خصوص طول دوره Warm up محققینی نظیر دنیائی و صراف (۱۳۹۹) و قلخانی و همکاران (۱۳۹۷) یک سال در نظر گرفته‌اند که در این تحقیق نیز دوره Warm up یک سال در نظر گرفته شده است.

#### ۲-۳- الگوریتم‌های بهینه‌سازی<sup>۱</sup>

یکی از نکات مثبت استفاده از چند تابع نکویی به طور همزمان، امکان استفاده از منابع مختلف اطلاعاتی و نیز پرداختن به ابعاد متفاوت فرآیند تولید رواناب و شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی از حوضه است که در نهایت منجر به کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی خواهد شد (گوپتا و همکاران<sup>۲</sup>، ۱۹۹۸). نظر به پیچیدگی و بزرگی مقیاس مسئله واسنجی چندهدفه مدل‌های بارش - رواناب، در سالیان اخیر الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نیز مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند (وراگت و همکاران<sup>۳</sup>، ۲۰۰۳)، بویل و همکاران<sup>۴</sup>، (۲۰۰۰)، (بهره‌مند و همکاران، ۲۰۱۰). الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی یک روش بهینه‌سازی جدید می‌باشد که در سال ۲۰۱۳ توسط کائوس و همکاران ارائه شده است. مدل ریاضی که توسط کائوس و همکاران ارائه شده در رابطه‌ی ۵ آمده است (کائوس و سینگ فائس<sup>۵</sup>، ۲۰۱۴).

$$V_{i,j} = w_j e_{j,i}^{d2} \quad (5)$$

1- Optimization Algorithm  
2- Gupta et al.  
3- Vrugt et al.

4- Boyle et al.  
5- Cuevas and Cienfuegos

عنکبوت جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات جذب می‌شود و یا از آن دور می‌شود. حرکت جاذبه و یا دافعه بستگی به چند پدیده‌ی تصادفی دارد. یک عدد تصادفی ثابت در محدوده  $\{0, 1\}$  تولید می‌شود در صورتی که جنبش جاذبه و در غیر این صورت جنبش دافعه است (کائوس، ۲۰۱۳) (حد آستانه) باشد، PF عدد کوچک‌تر از

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \alpha \cdot \text{Vibc}_i \cdot (S_c - X_i(t)) + \beta \cdot \text{Vibb}_i \cdot (S_b - X_i(t) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad (6)$$

این فرمول زمانی قابل اجرا است که جنس ماده به سمت منشأ ارتعاشات جذب شود. در صورتی که از منشأ ارتعاشات دور شود از رابطه‌ی ۷ استفاده می‌شود.

$$X_i(t+1) = X_i(t) - \alpha \cdot \text{Vibc}_i \cdot (S_c - X_i(t)) + \beta \cdot \text{Vibb}_i \cdot (S_b - X_i(t) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad (7)$$

موقعیت عنکبوت N از رابطه‌ی ۸ به دست می‌آید و موقعیت عنکبوت ND از رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + (\alpha \cdot \text{Vibf}_i \cdot (S_f - X_i(t)) + \delta \cdot (r - 0.5)) \quad (8)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + (\alpha \cdot (\sum_j^N m_j^k \cdot N_i + 1) / (\sum_j^N N_i)) \quad (9)$$

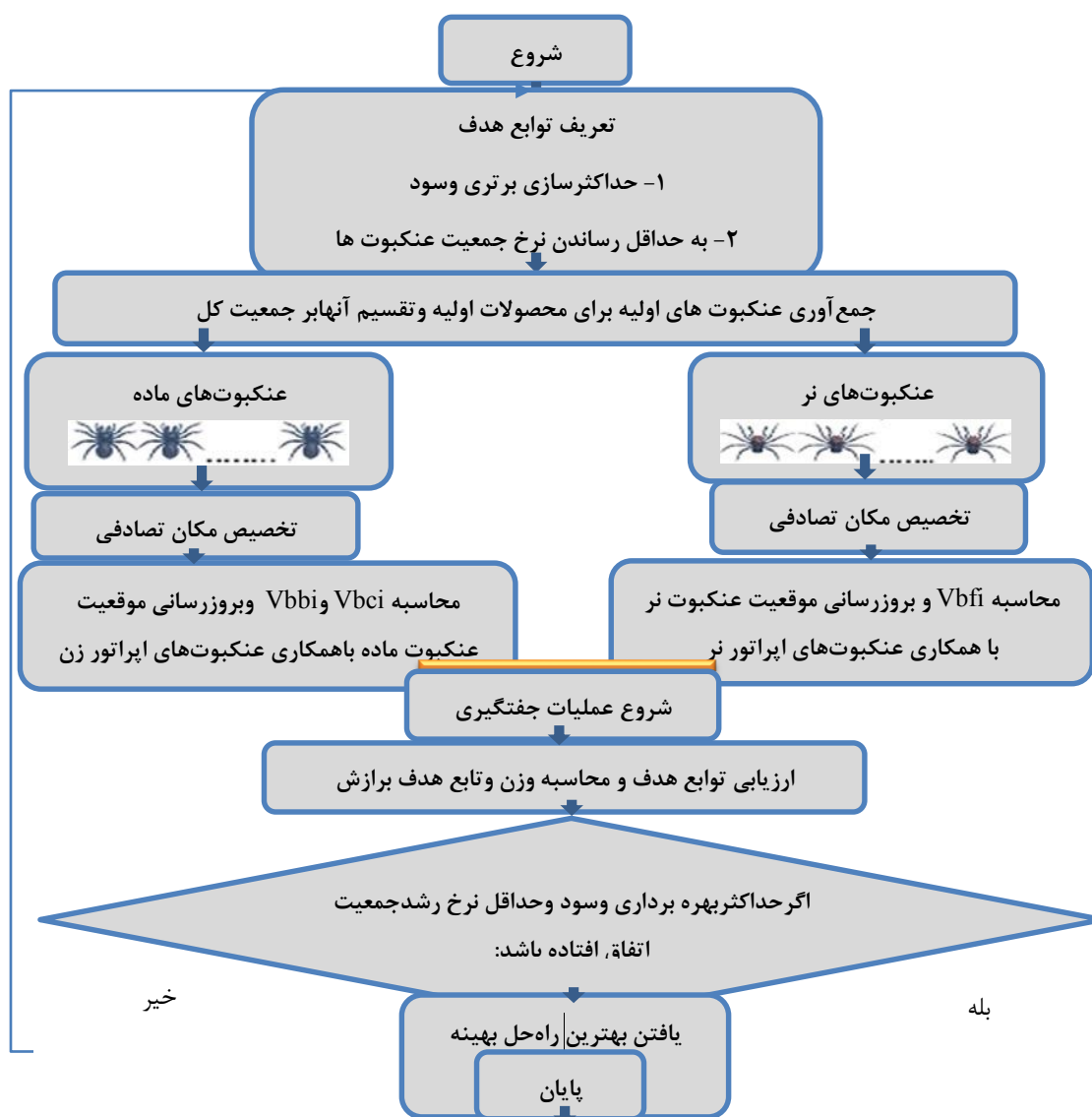
که در آن: Sf نزدیک‌ترین جنس نر  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\delta$  ارزش‌های تصادفی در بازه‌ی  $\{0, 1\}$  می‌باشند (کائوس و سینگ فائس، ۲۰۱۴). مکانیسم آخر، الگوریتم جفت‌گیری است. از این رو عنکبوت N در یک شعاع خاص که متشکل یک یا چند جنس نر و ماده است، شروع به جفت‌گیری می‌کند. مفاهیم روابط فوق در شکل ۳ نشان داده شده است. یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، الگوریتم بهینه‌سازی عملیات جستجو و نجات<sup>۱</sup> (SAR) می‌باشد که در سال ۲۰۲۰ توسط شعبانی و همکاران در گروه عمران دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی توسعه داده شد. در این الگوریتم، موقعیت‌های انسان برابر با راه‌حل‌های مسئله بهینه‌سازی است و مقدار سرخ‌های یافت‌شده در این موقعیت‌ها، عملکرد هدف این راه‌حل‌ها را نشان می‌دهد که به شرح ذیل می‌باشند:

۱- سرخ‌ها: ماتریس سرخ‌ها (ماتریس C) ماتریسی است که حاوی موقعیت‌های سرخ‌های یافت شده است.

این ماتریس از دو ماتریس X و M تشکیل شده است. معادله‌ی ۱۰ نحوه‌ی ایجاد C را نشان می‌دهد. ماتریس‌های M و X و C در هر مرحله جستجوی انسانی به روز می‌گردند:

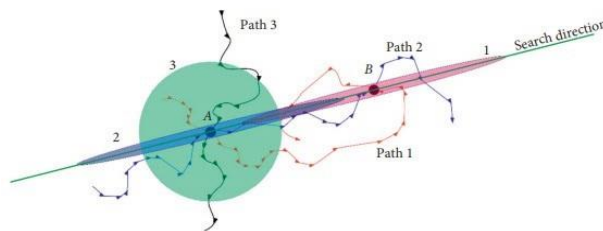
$$C = \begin{pmatrix} X \\ M \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X11 & \dots & X1D \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ XN1 & \dots & XND \end{bmatrix} \quad (10)$$





شکل (۳): فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت اجتماعی (SSO)  
 Fig (3): Social spider optimization algorithm (SSO) flowchart

دو مرحله‌ی جستجوی انسان، از جمله "مرحله‌ی اجتماعی" و "مرحله‌ی فردی"، به شرح زیر طبق شکل ۴ مدل‌سازی شده است:



شکل (۴): دو نوع جستجوی انسانی در عملیات جستجو و نجات (شعبانی و همکاران، ۲۰۲۰)  
**Figure (4):** Two types of human search in search and rescue (SAR) optimization algorithm (Shabani et al., 2020)

۱ و ۲: فاز اجتماعی

A: موقعیت انسان:

۳: فاز فردی

B: موقعیت سرنخ:

۲- فاز اجتماعی: با توجه به توضیحات داده شده در بخش قبلی و با در نظر گرفتن یک سرنخ تصادفی در میان سرنخ‌های یافت‌شده، جهت جستجو با استفاده از معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$SD_i = (X_i - C_k), \quad k \neq 1 \quad (11)$$

از معادله‌ی زیر برای مرحله اجتماعی استفاده می‌شود:

$$X'_{i,j} = \begin{cases} \{C_{k,j} + r_1 \times (X_{i,j} - C_{k,j}), & \text{if } f(C_k) > f(X_i), \\ X_{i,j} + r_1 \times (X_{i,j} - C_{k,j}), & \text{otherwise} \\ X_{i,j} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

۳- فاز فردی: موقعیت جدید انسان نام با معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$X'_i = X_i + r_3 \times (C_k - C_m), \quad i \neq k \neq m \quad (13)$$

۴- کنترل مرز: اگر موقعیت جدید انسان از محیط حل مسئله خارج باشد، برای اصلاح موقعیت جدید از معادله‌ی زیر استفاده می‌شود:

$$X'_{ij} = \begin{cases} \frac{(X_{i,j} + X_{maxj})}{2} & \text{if } X'_{i,j} > X_{maxj}' \text{ and } X'_{i,j} < X_{minj}, \quad (j = 1, \dots, D) \\ \frac{(X_{i,j} + X_{minj})}{2} & \end{cases} \quad (14)$$

۵- به روزرسانی اطلاعات و موقعیت‌ها: در هر تکرار، اعضای گروه با توجه به این دو مرحله جستجو می‌کنند و پس از هر مرحله، اگر مقدار تابع هدف در موقعیت  $X'(f(X'i))$  بزرگ‌تر از مقدار قبلی  $(f(X_i))$  باشد، موقعیت قبلی  $(X_i)$  در موقعیت تصادفی ماتریس حافظه  $(M)$  با استفاده از معادله‌ی (۱۵) ذخیره می‌گردد و این موقعیت با استفاده از معادله‌ی ۱۶ به عنوان موقعیت جدید پذیرفته می‌شود. در غیر این صورت، این موقعیت باقی‌مانده و حافظه به‌روز نمی‌گردد:

$$M_n = \begin{cases} X_i, & \text{if } f(X') < f(X_j), \\ M_n, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

$$X_i = \begin{cases} X'_i, & \text{if } f(X') < f(X_i), \\ X_i, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (16)$$

۶- سرنخ‌های رهاشده: برای مدل‌سازی این رفتار، ابتدا شماره جستجوی ناموفق  $(USN)$  برای هر انسان تعیین می‌شود.

$$USN_i = \begin{cases} USN_i + 1, & \text{if } f(X'_i) < f(X_i), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (17)$$

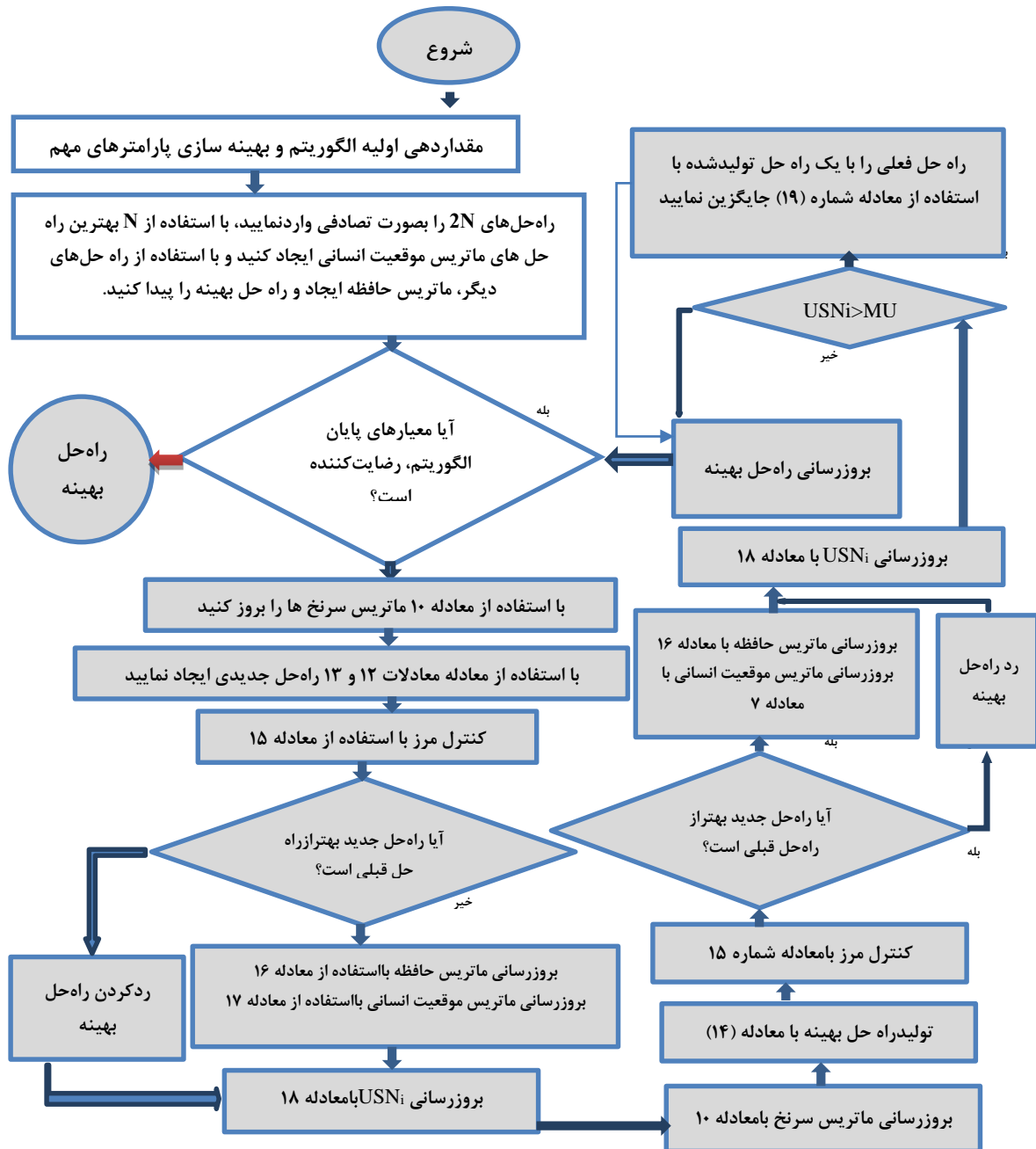
وقتی  $USN$  برای یک انسان بیشتر از حداکثر شماره جستجوی ناموفق  $(MU)$  باشد، او (آقا/خانم) با استفاده از معادله ۱۸ و  $USN$  به موقعیت تصادفی در محیط جستجو می‌رود. برای آن انسان نیز تعیین می‌شود:

$$X_{i,j} = X_j^{min} + r4 \times (X_j^{max} - X_j^{min}), \quad j = 1, \dots, D, \quad (18)$$

۷- پارامترهای کنترل  $SAR^r$ :

$$MU = 70 \times D. \quad (19)$$

فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی عملیات جستجو و نجات  $(SAR)$  طبق شکل شماره ۵ می‌باشد:



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم بهینه سازی عملیات جستجو و نجات (شعبانی و همکاران، ۲۰۲۰)  
 Fig (5): Search and Rescue Optimization (SAR) algorithm Flowchart (Shabani et al., 2020)

#### ۴-۲- توابع هدف و ارزیابی مدل<sup>۱</sup>

در ارزیابی نتایج شبیه‌سازی پیوسته جریان در مدل‌های هیدرولوژیکی از معیارهای متفاوتی از جمله شاخص‌های آماری ضریب همبستگی ( $r$ )، ریشه‌ی متوسط مربعات خطا (RMSE)، متوسط قدرمطلق خطا (MAE)، شاخص نش - ساتکلیف (Nash-Sutcliffe) و نش - ساتکلیف لگاریتمی استفاده می‌شود که در روابط ۲۰ تا ۲۴ ارائه شده و در مقاله حاضر به منظور ارزیابی مدل IHACRES از دو معیار نش - ساتکلیف و نش - ساتکلیف لگاریتمی به عنوان توابع هدف استفاده شده است:

$$r = \frac{\overline{Q_s \cdot Q_o} - \overline{Q_s} \cdot \overline{Q_o}}{\sqrt{(\overline{Q_o^2} - \overline{Q_o}^2) - (\overline{Q_s^2} - \overline{Q_s}^2)}} \quad (20)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{N}} \quad (21)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2} \quad (22)$$

$$\ln(NS) = NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{s_i}) - \ln(Q_{o_i}))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{o_i}) - \ln(\overline{Q_o}))^2} \quad (23)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{s_i} - Q_{o_i}|}{N} \quad (24)$$

که در آنها  $Q_s$  و  $Q_o$  به ترتیب دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی،  $\overline{Q_s}$  و  $\overline{Q_o}$  به ترتیب متوسط مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و  $N$  تعداد داده‌ها در دوره شبیه‌سازی است. لازم به توضیح است که در این مطالعه به منظور واسنجی مدل IHACRES در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات از الگوریتم‌های تکاملی عنکبوت اجتماعی و عملیات جستجو و نجات استفاده می‌شود که در این فرآیند یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه به منظور بهینه‌کردن توابع هدف واسنجی بین خروجی‌های محاسباتی و مشاهدات حل می‌گردد. به منظور افزایش دقت مدل در پیش‌بینی جریان‌های حداقلی و حداکثری، از دو معیار نش - ساتکلیف و نش - ساتکلیف لگاریتمی معادله‌های ۲۲ و ۲۳ استفاده شد. در این صورت، توابع هدف کیفیت هیدروگراف تولیدی توسط مدل IHACRES را به نسبت هیدروگراف مشاهداتی ارزیابی می‌کند. از آنجا که در رابطه نش - ساتکلیف مقادیر

خطا با توان دو ارزیابی می‌شود، لذا خطاهای بزرگ که در پیش‌بینی جریان‌ها بالا ایجاد می‌گردد، بزرگ‌تر شده و تأثیر بیشتری را در واسنجی مدل خواهند داشت، لذا معیار نش - ساتکلیف وزن بیشتری را به جریان‌های بالا می‌دهد، در صورتی که ابتدا دبی‌ها به مقیاس لگاریتمی انتقال داده شده و سپس معیار NS را بر روی آن‌ها اعمال شود. در معادله (۲۳)، 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 یافته و بنابراین مقدار خطای مدل در پیش‌بینی دبی‌های بالا تعدیل می‌گردد.

#### ۲-۵- اعتبارسنجی مدل

این مقدار از طریق محاسبه شاخص  $R^2$  با استفاده از فرمول (۲۵)، بدست آمده است و جهت اطمینان و دستیابی به یک پیش‌بینی قابل اعتماد، نتایج عملکرد الگوریتم‌ها را با روش بدست‌آمده، با نتایج حاصله از RMSE (فرمول شماره ۲۱) و MAE (فرمول شماره ۲۴) مقایسه می‌گردند:

$$R2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_o^2 X_s^2}} \quad (25)$$

$X_s$ : مقادیر شبیه‌سازی شده

$X_o$ : مقادیر مشاهداتی

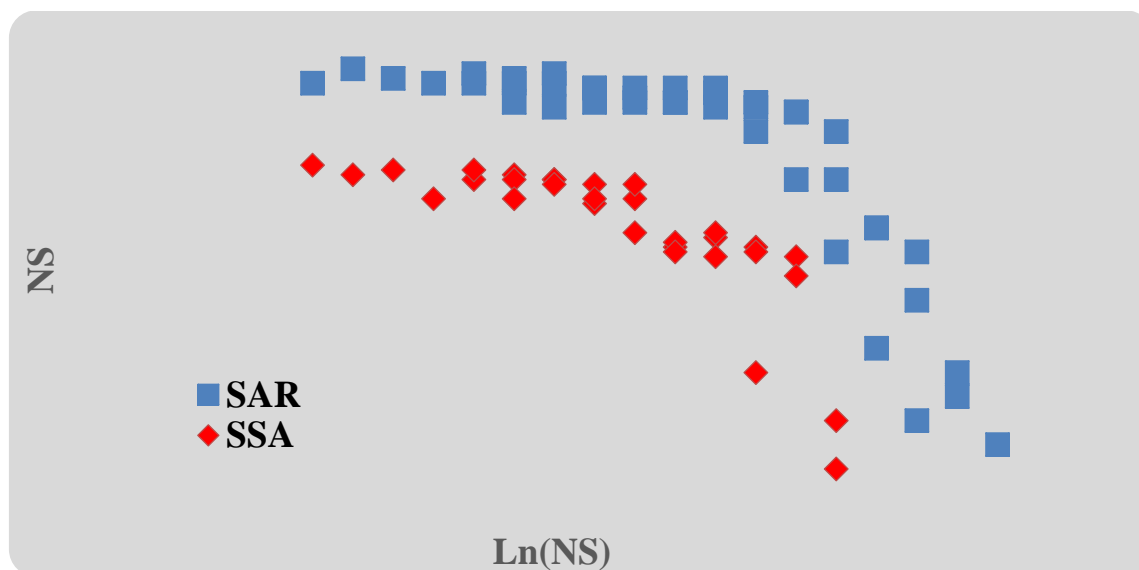
#### ۴- نتیجه و بحث

در این بخش از مقاله نتایج واسنجی مدل IHACRSE با استفاده از الگوریتم‌های عنکبوت اجتماعی و جستجو و نجات ارائه گردیده‌اند. لازم به ذکر است که کدهای مسأله در نرم‌افزار متلب تهیه شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، پارامترهای سراسری شش‌گانه ارائه شده در جدول ۲ هستند. توابع هدف باید به نحوی انتخاب شوند که در انتهای فرآیند واسنجی بتوان بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را به دست آورد. برخی توابع به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهند، در حالی که برخی دیگر اهمیت بیشتری را برای جریان‌های پایین قائل هستند. لذا در این مقاله سعی شده تا در فرمول‌بندی چندهدفه تعادل بین این دو در نظر گرفته شود؛ در این راستا از معیار نش - ساتکلیف (NS) و صورت لگاریتمی آن (Ln NS) استفاده گردیده است. در این پژوهش نتایج به دست‌آمده بر اساس این دو تابع ارائه می‌شود. پس از تعیین تمامی شبکه‌های مکانی لازم در مدل‌سازی حوضه، اطلاعات بارش، تبخیر، دما و دبی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۶ برای واسنجی مدل و اطلاعات سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شده‌اند. به منظور تعیین محدوده‌ی اولیه پارامترها، از اطلاعات موجود در منطقه و مقادیر پیشنهادی در راهنمای مدل استفاده گردیده است.

جدول (۲): محدوده اولیه پارامترها در واسنجی مدل IHACRES  
Table (2): Initial range for each parameter in IHACRES model calibration

پارامتر	C	f	$t_w$	$t^a$	$t^s$	$v^s$
Min	۰	۰	۲	۱۰	۱۰۰۰	۰
Max	۶۰۰	۴	۳۰	۳۰	۴۰۰۰	۱

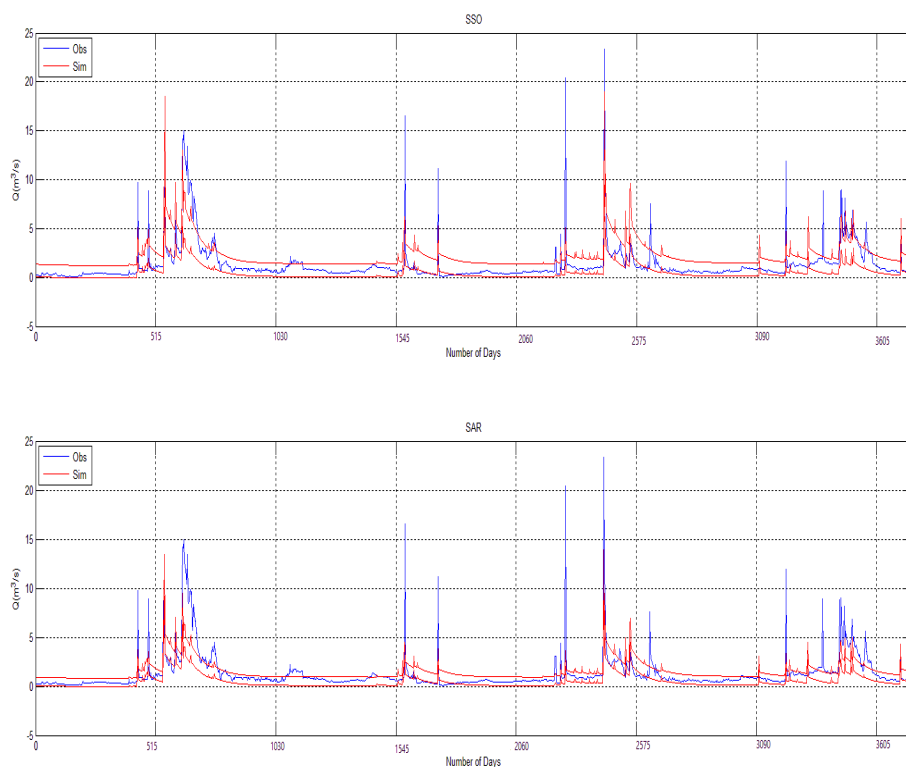
هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با اندازه‌ی جمعیت اولیه ۱۰۰ و در طول ۲۰۰ نسل (تعداد دفعات اجرای مدل بهینه‌سازی) اجرا شدند؛ در نتیجه، تعداد کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر اجرا از الگوریتم برابر با ۲۰۰۰۰ است. بعد از انجام فرایند واسنجی، بهترین مقادیر دو تابع هدف (یعنی معیارهای NS و Ln NS) در دوره‌ی زمانی واسنجی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل (۶): رویه پارتوی بدست‌آمده توسط الگوریتم‌های SAR و SSO در دوره زمانی واسنجی  
Fig (6): Pareto procedure obtained by SSO and SAR algorithms in calibration time period

با توجه به نتایج حاصله از شکل فوق، ملاحظه می‌شود که جواب‌های به دست‌آمده توسط SAR بهتر از جواب‌های SSO هستند؛ زیرا مقادیر NS آن بالاتر است. مطابق نتایج به دست‌آمده، مقادیر NS عموماً بین ۰/۸ و ۰ و مقادیر Ln NS بین ۰/۹ و ۰/۳ هستند. این مسئله نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی دبی‌های پایین موفق‌تر بوده است. هیدروگراف‌های خروجی به دست‌آمده از واسنجی مدل IHACRES در حوضه‌ی

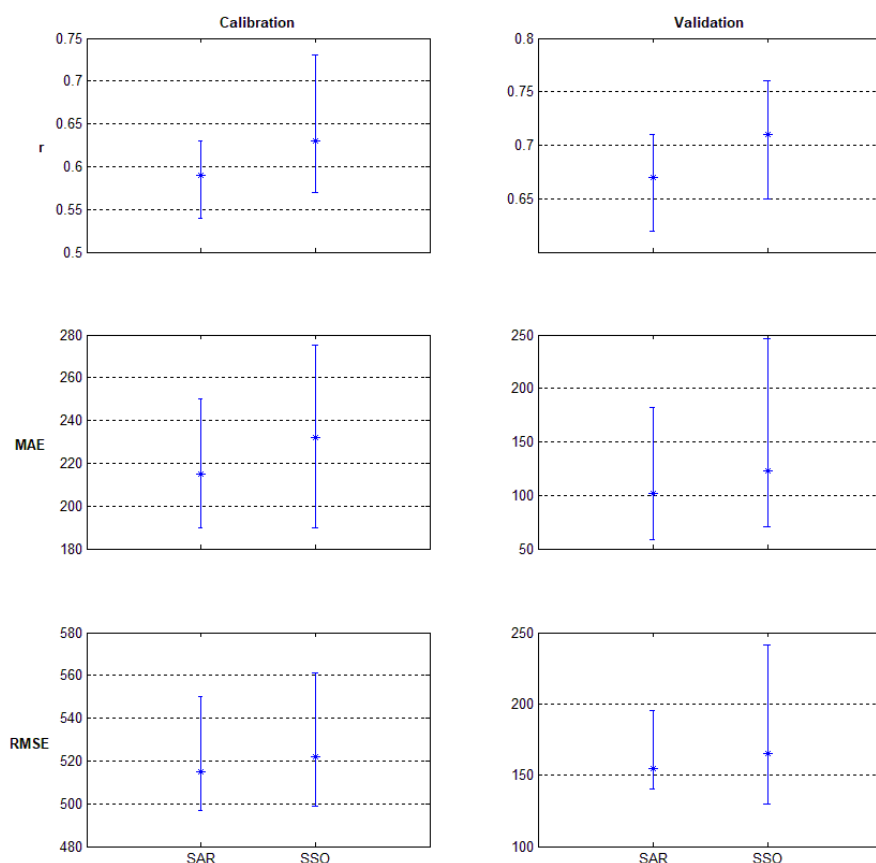
رودخانه‌ی اعظم هرات در شکل ۷ ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر دبی در این شکل‌ها مربوط به سال‌های ۱۹۸۷ تا ۱۹۹۶ است. در واقع، با توجه به اینکه مدل به صورت پیوسته اجرا گردیده، در این شکل، محدوده‌ی هیدروگراف‌های خروجی متناظر با جواب‌های بهینه موجود روی رویه‌ی پارتو که توسط الگوریتم‌های SSO و SAR به دست آمده‌اند، برای کل دوره واسنجی نشان داده شده است، به این صورت که به ازای هر زمان، مقادیر حداقل و حداکثر دبی شبیه‌سازی شده متناظر با مجموعه نقاط رویه پارتو، محاسبه شده و فاصله‌ی آن‌ها به صورت کاملاً ملموس در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است. لازم به توضیح است که هر نقطه از رویه پارتو متناظر با یک سری از متغیرهای تصمیم مسئله (شش پارامتر سراسری مدل) IHACRES و یک مقدار دبی جریان در خروجی حوضه است. همانگونه که ملاحظه می‌شود عرض باند هیدروگراف به دست آمده از الگوریتم SAR تا اندازه‌ای کمتر از عرض باند هیدروگراف SSO است. دلیل این مسئله به طور مشخص در کیفیت جستجو و پارامتریابی این دو الگوریتم بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم SAR در حل مسئله واسنجی مدل IHACRES در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات نسبت به الگوریتم SSO به گونه‌ای متفاوت رفتار می‌کند.



شکل (۷): هیدروگراف خروجی به دست آمده از واسنجی مدل IHACRES در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات  
Fig (7): Resulted hydrograph obtained by IHACRES model in the calibration phase in Azam river basin



شکل ۸ مقادیر به دست آمده برای معیارهای ضریب همبستگی، متوسط قدر مطلق خطا و ریشه متوسط مربعات خطا را برای دو الگوریتم استفاده شده نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود، روش SAR برای کلیه آماره‌های بررسی شده در مقایسه با روش SSO از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. این الگوریتم جزء روش‌های مناسب برای حل مسائل چندهدفه است که در این مثال نیز از کارایی بالایی برخوردار بوده است.

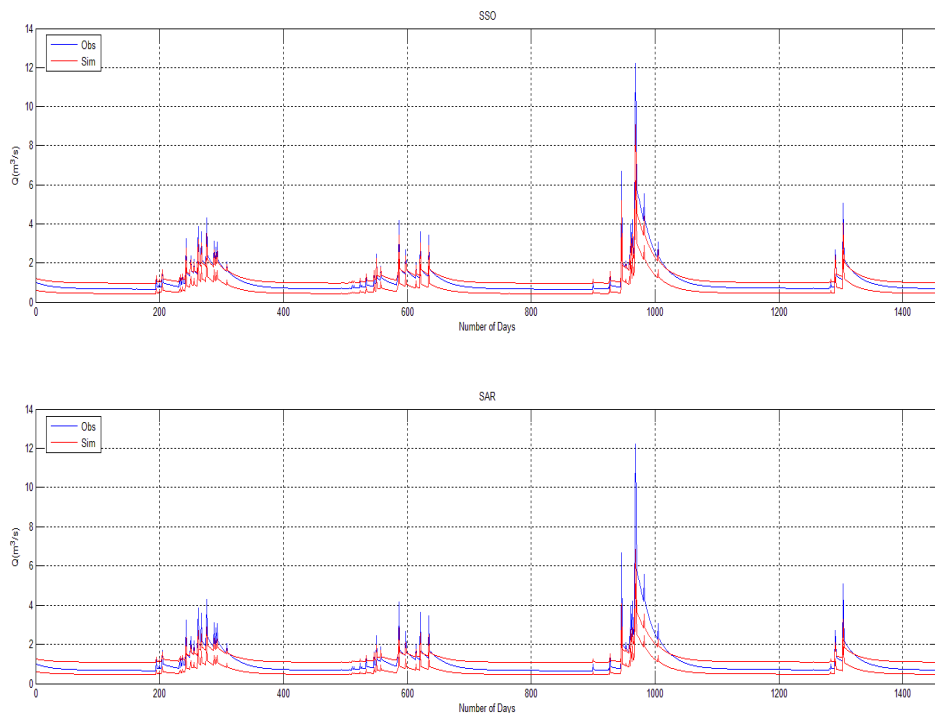


شکل (۸): مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط به دست آمده برای معیارهای سنجش کیفیت شبیه‌سازی‌ها در واسنجی مدل IHACRES با الگوریتم‌های مختلف (اشکال سمت چپ و راست به ترتیب مربوط به دوره واسنجی و صحت‌سنجی هستند)

**Fig (8):** The minimum, maximum and average values obtained for the quality measurement criteria of the simulations in the calibration of the IHACRES model with different algorithms (the left and right shapes are related to the calibration and validation period, respectively)

هیدروگراف‌های خروجی شبیه‌سازی شده متناظر با الگوریتم‌های SAR و SSO برای سال‌های ۱۹۹۹-۲۰۰۲ از دوره‌ی صحت‌سنجی در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، باند دبی شبیه‌سازی تا حد

قابل ملاحظه‌ای عریض شده است. مقایسه‌ی نتایج حاکی از آن است که پهنای باند نتایج SSO از نتایج SAR بیشتر بوده و همین مسئله باعث شده که اکثر مقادیر مشاهداتی در باند نتایج قرار گیرند در حالی که نتایج SAR در برخی زمان‌ها پوشش‌دهنده‌ی مقادیر مشاهداتی دبی جریان نیستند. اگرچه مطابق شکل ۸ بعضاً کیفیت نتایج به دست‌آمده در دوره‌ی صحت‌سنجی بهتر از دوره‌ی واسنجی بوده، لیکن در بین پاسخ‌های شکل ۹، جواب‌هایی نیز یافت می‌شود که از کیفیت مناسبی برخوردار نیستند؛ از جمله، دبی‌های حداکثر که در برخی موارد خارج از باند قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مدل، وقوع سیلاب‌ها (مخصوصاً در ابتدای دوره) را پیش‌بینی نموده است، ولی دقت پیش‌بینی در برخی زمان‌ها چندان رضایت‌بخش نیست. البته در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی نیز اختلاف مقادیر دبی پیش‌بینی و مشاهداتی حتی در انتهای دوره (ماه‌های آخر سال ۱۹۹۶) به همین صورت وجود دارد، لیکن به دلیل مقیاس گراف و محدوده‌ی تغییرات دبی روی محور قائم، این اختلافات کمتر دیده می‌شود؛ به جز در سه ماه ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی، که کمی اختلاف بین نتایج وجود دارد، در مابقی دوره‌ی نتایج قابل قبول و رضایت‌بخش هستند.



شکل (۹): هیدروگراف‌های خروجی به دست‌آمده مدل IHACRES برای دوره‌ی صحت‌سنجی

Fig (9): Output hydrographs obtained by IHACRES in validation phase

در جدول شماره ۳ حدود مجاز تغییرات و مقادیر به دست آمده در فرآیند واسنجی شش پارامتر سراسری مدل IHACRES با استفاده از الگوریتم SSO بدست آمده‌اند.

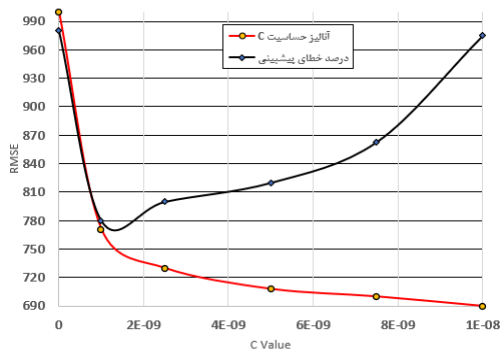
جدول (۳): پارامترهای جهانی حاصل از واسنجی مدل در حوضه رودخانه‌ی اعظم هرات

**Table (3):** Global parameters obtained by model calibration in Azam river basin of Herat

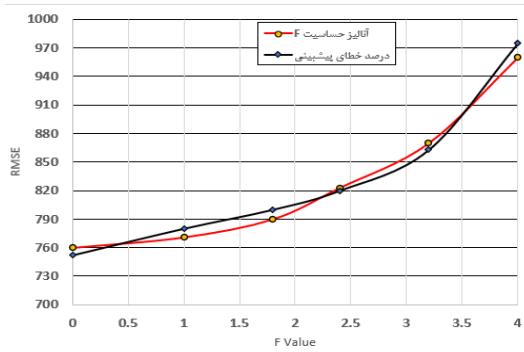
پارامتر	C	f	$\tau_w$	$\tau^q$	$\tau^s$	$U^s$
Min	$0.1 \times 10^{-5}$	0.1	۲	۱۰	۱۰۰۰	0.01
Max	۶۰۰	۴	۳۰	۳۰	۴۰۰۰	۱
مقدار	$92/9 \times 10^{-5}$	۴	۲/۸	۲۵/۲۲	۳۱۳۱	0.1659

#### ۴-۱- آنالیز حساسیت مدل‌ها

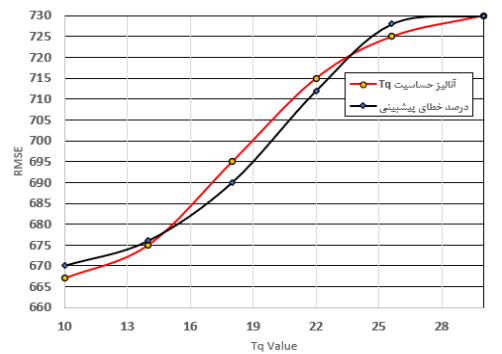
به منظور آنالیز حساسیت، ابتدا مدل با توجه به داده‌های جدول ۳ تنظیم گردید و با تغییر هر یک از پارامترها در بازه ممکن آن، و ثابت نگهداشتن سایر پارامترها، شبیه‌سازی‌های مکرر صورت گرفت. در هر شبیه‌سازی جمعیت اولیه و تعداد نسل‌ها برابر ۱۰۰، و توابع هدف به ترتیب نش - ساتکلیف و RMSE در نظر گرفته شدند. در این تحلیل ارزیابی خطا به ازای کل داده‌های واسنجی انجام شده است. در شکل ۱۰ نحوه تغییرات RMSE به ازای تغییر پارامترهای مدل نشان داده شده است. به علاوه در هر یک از اشکال تغییرات به صورت درصدی نیز نشان داده شده است. به عنوان مثال شکل ۱۰- الف، آنالیز حساسیت پارامتر F فاکتور تعدیل حرارت را در مدل IHACRES نشان می‌دهد. محدوده ممکن این پارامتر در بازه‌ی {۰ و ۴} و محدوده جواب‌های رویه پارتو بین {۰/۱ و ۴} برآورد شده است. در شکل شماره ۱۰ منحنی‌هایی که با نشان ● آمده‌اند، معرف خطای مدل (محور قائم در سمت چپ) در مقابل مقدار C (محور افقی پایین) هستند که با منحنی قرمز نشان داده شده است. منحنی‌هایی که با نشان ♦ آمده‌اند، معرف حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامتر F هستند به طوری که درصد افزایش یا کاهش RMSE (محور قائم سمت راست) نسبت به درصد تغییرات F (محور افقی بالا) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خطاهای نسبی (درصد تغییرات RMSE) با توجه به پیش‌بینی دبی جریان به ازای مقادیر بهینه شش پارامتر سراسری مدل سنجیده شده‌اند. نتایج شکل ۱۰- الف نشان می‌دهد که افزایش پارامتر F تأثیر زیادی در نتایج شبیه‌سازی حوضه رودخانه اعظم هرات نداشته است به طوری که با ۵ برابر شدن مقدار F، تغییرات RMSE از ۱۰٪ فراتر نرفته است. با توجه به منحنی شکل ۱۰- الف، با افزایش مقدار F از صفر تا چهار، مقدار خطا نیز به تناسب با F سیر صعودی داشته به طوری که این مقدار در F=8 به نهایت خود یعنی چهار می‌رسد.



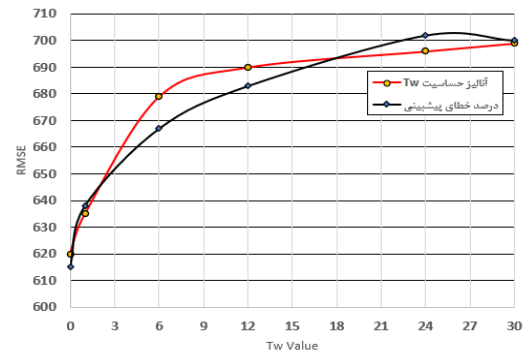
(ب)



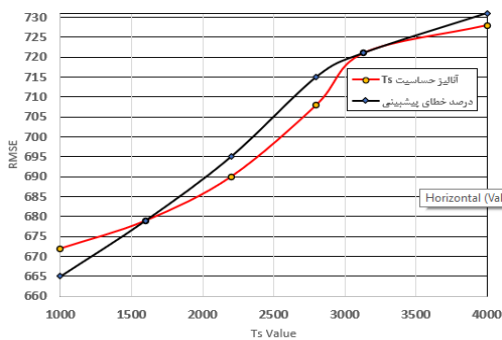
(الف)



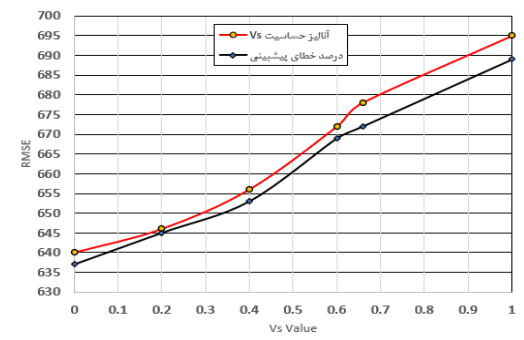
(د)



(ج)



(و)



(ه)

شکل (۱۰): آنالیز حساسیت مدل IHACRES نسبت به پارامترهای جهانی شش‌گانه

Fig (10): Analysis of the sensitivity of the IHACRES model to the six global parameters

ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه (C) (شکل ب)، به عنوان دومین پارامتر سراسری مدل، اهمیت زیادی در حوضه رودخانه اعظم هرات دارد. محدوده شدنی این پارامتر در بازه‌ی {۰ و ۶۰۰} و محدوده جواب‌های رویه پارتو بین [1E-8, 2E-9] است. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، افزایش این پارامتر منجر به بالارفتن مقدار دبی پایه‌ی رودخانه و افزایش خطای RMSE تا نه درصد می‌گردد. در حوضه‌ی رودخانه اعظم هرات، مدل به تغییرات این پارامتر بسیار حساس بوده و می‌تواند دبی صفر را تولید کند. بهترین جواب در همسایگی 6E-9 است. مطابق شکل ۱۰-ج، مقدار بهینه  $\tau_{10}$  ثابت زمانی خشکیدگی حوضه حدود {۹ و ۰} است. محدوده‌ی جواب‌های رویه پارتو برابر محدوده شدنی این پارامتر در بازه {۲ و ۳۰} است. در حوضه رودخانه اعظم هرات مقدار بهینه  $\tau^q$ ، (شکل د)، ثابت زمانی کاهش جریان سریع در حدود ۱۴ بوده و برای مقادیر کمتر از آن، خطای نسبی می‌تواند تا حدود ۱۳٪ افزایش یابد. مقادیر  $\tau^q$  یا ثابت زمانی کاهش جریان آهسته (شکل و) در بازه‌ی {۱۲ و ۱۳} پیشنهاد شده است. مطابق شکل ۱۰ و در حوضه رودخانه اعظم هرات مقدار خطای ناشی از تغییرات این پارامتر ناچیز و حساسیت مدل به مقدار این پارامتر بسیار کم ارزیابی شده است. مطابق نتایج شکل ۶-ه با افزایش مقدار پارامتر  $U^s$ ، خطای محاسباتی کمتر شده و به عبارتی حساسیت مدل نسبت به ابتدای بازه، کمتر می‌گردد.

نتایج به دست آمده از کاربرد مدل در این حوضه نشان‌دهنده‌ی قابلیت رضایت بخش این الگوریتم‌ها در واسنجی مدل IHACRES است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از الگوریتم SAR و SSO نشان داد که در مسأله‌ی واسنجی چندهدفه، الگوریتم SAR اندکی موفق‌تر از مدل SSO عمل نموده است. ضعف مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی برخی سیلاب‌ها، می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های استفاده شده در حوضه‌ی پهناور رودخانه اعظم هرات باشد؛ لذا افزایش طول دوره شبیه‌سازی می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل استفاده شده گردد. همچنین نتایج نشان داد که کیفیت شبیه‌سازی دبی‌های پایین، بیشتر از دبی‌های بالا بود. دلیل این مسئله را می‌توان اولاً به فراوانی کمتر دبی‌های بالا در مجموعه داده‌های بررسی شده و ثانیاً به واکنش نسبتاً کند مدل به تغییر شرایط هیدرولوژیکی در شرایط سیلابی در حوضه اعظم هرات بزرگ دانست؛ زیرا نسبت حجمی جریان آهسته که در جریان رودخانه مشارکت می‌کند ( $U^s$ ) مقدار بزرگی را به خود اختصاص داده است که می‌تواند موجب تاثیر مستقیم در کاهش رواناب سطحی گردد. از طرفی، ضعف نتایج در پیش‌بینی برخی دبی‌های کم، می‌تواند به مقدار بهینه ظرفیت نگهداری رطوبت حوضه (C) مرتبط باشد که در فرآیند واسنجی، مقدار کوچکی را اختیار نموده زیرا آب‌های زیرزمینی بالاترین تأثیر را در تولید دبی‌های پایین در حوضه دارد. به منظور ارزیابی حساسیت مدل واسنجی شده به پارامترهای سراسری و ارزیابی اهمیت آن‌ها در حوضه‌ی اعظم هرات، با داشتن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای سراسری، آنالیز حساسیت مدل انجام شد؛ بدین صورت که تأثیر هر یک از پارامترهای

مدل بر دقت نتایج ارزیابی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تأثیر ضریب رواناب سطحی بر نتایج مدل به نسبت سایر پارامترها بسیار بیشتر است (حدود ۴۰٪). این در حالی است که حساسیت مدل نسبت به سایر پارامترها از یک تا ۱۴ درصد متغیر برآورد شده است.

##### ۵- نتیجه‌گیری

مقاله‌ی حاضر به واسنجی مدل بارش-رواناب توزیعی IHACRES پرداخته است. برای این منظور از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی SSO و SAR در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات یزد بهره گرفته شد و نتایج به دست آمده در این حوضه نشان‌دهنده‌ی قابلیت رضایت بخش این الگوریتم‌ها در واسنجی مدل IHACRES بوده است. همچنین مقایسه‌ی نتایج به حاصل از الگوریتم SSO و SAR حاکی از آن است که در مسأله واسنجی چندهدفه، الگوریتم SAR اندکی موفق‌تر از مدل SSO عمل نموده است. شایان توجه است، ضعف مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی برخی سیلاب‌ها نیز می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های بکارگرفته شده در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات باشد و لذا افزایش طول دوره‌ی شبیه‌سازی می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل استفاده شده گردد. همچنین نتایج نشان داد که کیفیت شبیه‌سازی دبی‌های پایین، بیشتر از دبی‌های بالا بوده است و دلیل این مسئله را می‌توان اولاً به فراوانی کمتر دبی‌های بالا در مجموعه داده‌های بررسی شده و ثانیاً به واکنش نسبتاً کند مدل به تغییر شرایط هیدرولوژیکی در شرایط سیلابی و در حوضه‌ی رودخانه‌ی اعظم هرات مربوط دانست.

## ۶- منابع

- Asadi, M., Fathzadeh, A., & Taghizadeh Mehrjardi, R. (2017). The Effects of the Daily, Monthly, and Annual Time Scales on the Suspended Sediment Load Prediction. *Hydrogeomorphology*, 4(10), 121-143
- Esfandiari, F., & Gharachorlo, M. (2015). Investigation of Spatio-Temporal Relationships of Suspended Sediment Load with Basin Rainfall (Case Study: Gharasoo Watershed). *Hydrogeomorphology*, 2(4), 125-142
- Abozar Esmali, Mohammad Golshan, Ataolla Kavian, "Investigating the Performance of SWAT and IHACRES in Simulation Streamflow under different Climatic regions in Iran" *Atmosfera*, 34(1), Mexico one 2021.
- Bahremand, A. and De Smedt, F. 2010. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. *Water Resources Management* DOI 10.1007/s11269-010-9584-1
- Borzi, I.; Bonaccorso, B.; Fiori, A. A Modified IHACRES Rainfall-Runoff Model for Predicting the Hydrologic Response of a River Basin Connected with a Deep Groundwater Aquifer. *Water* 2019, 11, 2031. <https://doi.org/10.3390/w11102031>
- Boyle, D.P., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resour. Res.* 36: 3663-3674.
- Carcano, E.C., P. Bartolini, M. Muselli and Piroddi, L. 2008. Jordan recurrent neural network versus IHACRES in modeling daily stream flows. *Hydrology*, 362: 291-307.
- Cooper V. A. Nguyen V. T. V. and Nicel J. A. 2007. Calibration of conceptual rainfall-runoff models using global optimization methods with hydrologic process-based parameter constraints. *Journal of Hydrology*. 334(3-4):455-466.
- Croke B. F. W. and Jakeman A. J. 2008. Use of the IHACRES rainfall-runoff model in arid and semiarid regions. In: Weather H. S. Sorooshian S. and Sharma K. D. (Eds.), *Hydrological Modeling in Arid and Semi-Arid Areas*. Cambridge University Press, Cambridge. Pp.41-48.
- Cuevas, E., & Cienfuegos, M. (2014). A new algorithm inspired in the behavior of the social-spider for constrained optimization. *Elsevier Journal of Expert Systems with Applications*, 41, 412–425. doi: 10.1016/j.eswa.2013.07.067
- Donyaii, A., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2020a. A Novel Approach to Supply the Water Reservoir Demand Based on a Hybrid Whale Optimization Algorithm. *Shock and vibration journal*. 1-10 <https://doi.org/10.1155/2020/8833866>
- Donyaii, A., Sarraf, A. and Ahmadi, H. 2021. Comparison of meta-heuristic algorithms in optimum operation of a single-reservoir dam system. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering Sustainability*. <https://doi.org/10.1680/jensu.20.00065>

- Donyaii, A., Sarraf, A. Ahmadi, H. 2020b. 'Using composite ranking to select the most appropriate Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method in the optimal operation of the Dam reservoir', *Journal of Hydraulic Structures*, 6(2): 1-22.  
doi: 10.22055/jhs.2020.34402.1142
- Donyaii, A., Sarraf, A. (2021). Evaluation of Hydro-Climatic Conditions of Gorganroud Catchment under the Effect of Climate Change using MIROC-ESM model. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 204-183. doi: 10.22034/hyd.2021.44082.1572. (In Persian).
- [Dye, P.J., Croke, B.F.W. 2003. Evaluation of stream flow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. *Environmental Modeling and Software*, 18: 705-712.
- Ghalkhani, H., h, F., Koohian-Afzal, F., sh, M. (2019). Calibration of WetSpa model using NSGA-II and PSO multi-objective optimization algorithms, 11(39), pp. 15-34.
- Gupta, H.V., Sorooshian, S. and Yapo, P.O. 1998. Toward improved calibration of hydrological models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resour. Res.* 34(4): 751-763.
- [Kuczera, G., Williams, B., Binning, P., & Lambert, M. (2000). An education web site for free water engineering software (pp. 1048–1053).  
<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.584902896190042>
- [Littlewood, I.G. Clarke, R.T. Collischonn, W. and Croke, B.F.W. 2007. Predicting daily stream flow using rainfall forecasts, a simple loss module and unit hydrographs: Two Brazilian catchments. *Environmental Modeling and Software*, 22: 1229-1239
- [Shabani, A., Asgarian, B., Salido, M., Asil Gharebaghi, S., Search and Rescue optimization algorithm: a new optimization method for solving constrained engineering optimization problems, *Expert Systems with Applications* (2020), doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113698>
- Sorooshian, S., and J. A. Dracup, Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and heteroscedastic error cases, *Water Resour. Res.*, 6(2), 430-442, 1980.
- Vardian, F. Shahedi, K. Habibnezhad Roshan, M. and Zarei, M. 2014. Evaluate the efficiency of IHACRES rainfall-runoff models to simulate daily flow monthly Navroud catchment located in Gilan, *Journal of Water and Wastewater*, 8(15): 229-233. (In Persian)
- Vrugt, J., Gupta, H.V., Bastidas, L.A., Bouten, W. and Sorooshian, S. 2003. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resour. Res.* 39(8):1214, doi:1210.1029/2002WR001746, 2003.
- Ye, W. Bates, B.C. Viney, N.R. Sivapalan, M. and Jakeman, A.J., 1997. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. *Water Resources Research*, 33 (1), 153–166



Zarei, M. Ghanbarpour, M.R. Habibnezhad Roshan, M. And Shahedi K. 2009. Streamflow Simulation Using IHACRES Rainfall-Runoff Model (Case Study: Kasilian Catchment). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*. 3 (8): 11-20. (In Persian).