نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد - شهریور ۱۴۰۰، ص. ۷۳۶-۷۲۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 721-736

مقاله علمی - پژوهشی

کالیبراسیون مدل توزیعی هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه عنکبوت بیوه سیاه و NSGA-II

علیرضا دنیائی[۱] و امیرپویا صراف[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۳۱

چکیده

استفاده از مدل‌های بارش-رواناب مفهومی به‌عنوان یکی ابزارهای ساده و در عین حال کارآمد در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی کاربرد فراوان دارند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن اطلاعات ورودی از قبیل بارش، تبخیر- تعرق و دمای اندازه‌گیری شده و اطلاعات توپوگرافی حوضه، رژیم جریان را با استفاده از روابط ریاضی شبیه‌سازی می‌کنند. در پژوهش حاضر، قابلیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه (BWO) و NSGA-II در واسنجی مدل توزیعی هیدرولوژیکی WetSpa به منظور شبیه‌سازی بارش- رواناب حوضه گرگانرود مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. الگوریتم‌های بهینه سازی فوق به صورت چندهدفه برای واسنجی ۱۱ پارامتر سراسری مدل WetSpa استفاده شدند. توابع هدف در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل دو شاخص نش-ساتکلیف و نش-ساتکلیف‌لگاریتمی بوده تا به‌وسیله آنها عملکرد مدل در پیش‌بینی دبی‌های حداکثری و حداقلی بهبود یابد. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، از آن برای شبیه‌سازی سیلاب در یک‌دوره یک ساله در حوضه مذکور استفاده گردید و قابلیت مدل ارزیابی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم‌های بهینه‌سازی BWO و NSGA-II با ضریب همبستگی ۰/۸۱و ۰/۶۹ به‌ترتیب عملکرد خوب و قابل قبولی را در واسنجی مدل داشته‌اند؛ بنابراین عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی BWO بسیار بهتر از NSGA-II ارزیابی شد. همچنین، آنالیز حساسیت پارامترهای موثر نشان داد که ضریب رواناب سطحی، حساس‌ترین پارامتر سراسری مدل WetSpa بوده است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه؛ الگوریتم بهینه‌سازی NSGA-II؛ کالیبراسیون (واسنجی)؛ مدل بارش - رواناب؛ مدل هیدرولوژیکی WetSpa

مقدمه

مدل بارش - رواناب WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی است که در سال ۱۹۹۷ در دانشگاه آزاد بروکسل توسعه یافته است (Wang et al., 1997). در این مدل امکان استفاده از عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای به همراه اطلاعات دقیق اندازه‌گیری شده در سطح حوضه که دارای توزیع مکانی هستند وجود دارد. بازه زمانی مدل‌سازی در WetSpa ساعتی و بدون تغییر بوده که استفاده از آن را در کارهای تحقیقاتی با مشکل مواجه کرده است. با توجه به گسترش کاربرد سیستم اطلاعات جغرافیایی در منابع آب، الحاقیه مدل WetSpa که یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی در محیط GIS است، برای شبیه‌سازی بیلان آب و تخمین سیلاب در مقیاس حوضه توسعه داده شد (De Smedt et al., 2000). این الحاقیه قادر به تخمین هیدروگراف در نقطه خروجی حوضه و هر نقطه دیگری از آن است. در الحاقیه قابلیت مدل‌سازی ذوب برف، شبیه‌سازی جریان‌های زیرسطحی جانبی و منظور نمودن تلفات اولیه چالاب نیز به مدل اولیه اضافه گردیده و به آن امکان شبیه‌سازی را در بازه‌های دلخواه داده است. لذا کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب توسط محققان زیادی بررسی شده است (Liu and De Smedt,2004).

همچنین مدل اولیه WetSpa برای یکی از حوضه‌های بلژیک توسعه داده شده و رواناب رودخانه شبیه‌سازی شده است (De Smedt et al., 2000) پارامترهای واسنجی مدل در این تحقیق شامل ضریب زبری کانال، شعاع هیدرولیکی، ضریب رواناب موثر، ضریب گیاه و ضریب فروکش جریان آب زیرزمینی بودند که به صورت دستی به مدل اعمال شدند. همچنین به منظور مدل‌سازی بارش و روندیابی

۱- دکتری مهندسی عمران، کارشناس حفاظت و بهره‌برداری، شرکت آب منطقه‌ای گلستان، گرگان، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران.
(*- نویسنده مسئول: (Email: sarraf@riau.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.3.20.4

سیلاب، روشی جدید را برای مدل Wetspa توسعه داده شده است که بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش انتقال پخشی استوار است (Liu et al., 2003) بر اساس تحلیل عدم قطعیت صورت گرفته در این مطالعه، پارامترهای فراوانی سیلاب و ضریب زبری کانال تأثیرگذارتر از آستانه حداقل شیب و آستانه‌ی سطح زهکش بودند.

به دلیل عدم‌قطعیت‌های زیاد پارامترهای هیدرولوژیکی، واسنجی مدل یکی از مهمترین بخش‌های مدل‌ســـازی‌محسوب می‌شود که در آن عمدتاً از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت و همچنین بررسی عدم‌قطعیت مدل‌ها وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: ۱) روش‌های سراسری و ۲) روش‌های تخمین نقطه‌ای. در روش‌های سراسری شبیه‌سازی با استفاده از پارامترها در کل فضای ممکنـــــه انجام می‌شود؛ درحالی‌که در روش‌های تخمین نقطه‌ای برای پیداکردن جواب بهینه، جستجوی محلی تا جایی ادامه می‌یابد که در همسایگی جواب به‌دست‌آمده، جواب بهتری وجود نداشته باشد (Van Griensven, 2002). در این میان از نرم‌افزار بهینه‌سازی PEST در مطالعه‌های بارش – رواناب بسیار استفاده شده است (Safari, et al. 2009).

در برخی از تحقیقات پیشـین عدم‌قطعیت مدل WetSpa بررسـی شـده اسـت (Bahremand and De Smedt, 2010). همچنـین در مطالعـــه‌ای با استفاده از داده‌های بارندگی رادار نسل بعدی، نقشه‌های رقومی توپوگرافی، نوع خاک، کاربری اراضی و نرم افزار PEST، مدل WetSpa برای چندین حوضه واسنجی شده اسـت (Safari, et al. 2009). ایشان از معیارهای مختلفی مثل معیار اریب مدل، ضریب همبستگی اصلاح شده و معیار کارآمدی نش برای واسنجی مدل استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده در مطالعه نشان داد شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل WetSpa در دوره واسنجی و نیز در دوره صحت‌سنجی رضایت بخش بوده است.

مطالعات نشان داده‌اند که روش‌های بهینه‌سازی محلی در تعیین سری پارامترهای بهینه مدل، ممکن است در دام نقاط بهینه محلی گرفتار شوند زیرا توابع هدف یک مساله بهینه‌سازی می‌تواند غیر خطی بوده و دارای چندین نقطه بهینه محلی باشد (Donyaii et al., 2020a).

روش‌های بهینه‌سازی سراسری مانند استفاده الگوریتم‌های فراابتکاری این مشکل را رفع نموده‌اند و به‌همین دلیل امروزه این روش‌ها، توسعه بسیار زیادی یافته و کاربرد آن‌هادر مسائل مهندسی افزایش یافته است (Donyaii et al., 2021). در سه دهه گذشته گزارش‌های متعددی در زمینه واسنجی اتوماتیک بارش – رواناب با استفاده از روش‌های بهینه‌یابی سراسری ارائه شده‌اند (Kuczera,1997) که نشان‌دهنده قابلیت این روش‌ها در واسنجی مدل WetSpa بوده است. استفاده و مقایسه الگوریتم‌های مرسوم نظیر ژنتیک، ازدحام ذرات و ... در تعیین مقدار بهینه با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه پیشتر توسط بسیاری از محققین صورت گرفته بود ولی استفاده از الگوریتم‌های جدید که تا کنون در مهندسی منابع آب از آن‌ها استفاده نشده با توجه به این مطلب که نسبت به سایر الگوریتم‌های مرسوم از کارایی بیشتری برخوردار می‌باشند و استفاده از آن‌ها در سایر صنایع نشانگر برتری آن‌ها نسبت به الگوریتم‌های مرسوم بوده است، نکته‌ای است که در پژوهش حاضر نوعی نوآوری به‌شمار می‌آید (Donyaii et al., 2020b)؛ لذا در این پژوهش واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa و تعیین مقدار بهینه پارامترهای مختلف آن با در نظر گرفتن بازه تغییرات آن‌ها با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه مد نظر می‌باشد که در آن از تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک (GA) 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 (ازجمله حداکثری و حداقلی) را با دقت مناسب پیش‌بینی نماید، لذا توابع هدف به نحوی انتخاب می‌شوند که بتوان طی فرآیند واسنجی بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی را به‌دست آورد. برخی توابع خطا به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهند درحالی‌که برخی دیگر اهمیت بیشتری را به جریان‌های پائین می‌دهند. لذا در این پژوهش سعی شده است در فرمول‌بندی چندهدفه تعادلی بین این دو در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

مدل هیدرولوژیکی WetSpa

مدل هیدرولوژیکی 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، فرآیندهای بارش، گیرش گیاهی، ذوب برف، چالاب، نفوذ، تبخیر– تعرق، تراوش، رواناب سطحی، جریان دیواره‌ای و جریان آب زیرزمینی را مد نظر قرار می‌دهد. سیستم هیدرولوژیک شبیه‌سازی شده توسط این مدل، متشکل از چهار لایه‌ی پوشش گیاهی، سطح خاک، منطقه ریشه و سفره اشباع آب زیرزمینی است. الحاقیه مدل WetSpa در واقع همان مدل هیدرولوژیک است که از قابلیت‌های GIS نیز در مدلسازی استفاده می‌کند. این مدل به‌منظور انجام کامل شبیه‌سازی‌ها نیاز به پارامترهای متفاوتی دارد که بیشتر آن‌ها یا با اندازه‌گیری‌های میدانی و یا به کمک معادلات تجربی به‌دست می‌آیند. جهت مدلسازی با WetSpa به نقشه رقومی منطقه، پوشش گیاهی و نوع خاک در نقاط مختلف حوضه نیاز است. به‌علاوه داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، تبخیر– تعرق پتانسیل و دما نیز

اطلاعاتی است که توزیع زمانی و مکانی آن‌ها باید به مدل معرفی شوند. پارامترهایی در مدل وجود دارند که مقدار آن‌ها در طول زمان و مکان ثابت است و به آن‌ها پارامترهای سراسری گفته می‌شود. مقدار این پارامترها می‌بایست طی فرایند واسنجی تعیین شود. جدول ۱ به صورت خلاصه پارامترهای سراسری مدل را معرفی می‌کند.

جریان دیواره‌ای یک مؤلفه مهم رواناب برای مناطق با آب و هوای مرطوب، مخصوصاً مناطقی که دارای زمین‌های پرشیب و پوشش گیاهی مناسب هستند، به‌شمار می‌رود (Liu and De Smedt,2004). در الحاقیه مدل WetSpa، فرض بر این است که جریان دیواره‌ای زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک از ظرفیت مزرعه بیشتر شده و گرادیان هیدرولیکی کافی برای حرکت آب موجود باشد. پارامتر 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. ضریب K_3 مولفه رطوبتی اولیه خاک یکی از المان‌های مهم در مدلسازی هیدرولوژیکی است که تأثیری مستقیم بر تولید رواناب سطحی، تبخیر- تعرق، تراوش و جریان دیوارهای دارد. شرایط اولیه رطوبتی مناسب منجر به تخمین‌های واقع بینانه تر خواهد شد. با این‌حال، برای شبیه‌سازی جریان بلند مدت در یک حوضه آبریز، رطوبت اولیه خاک از اهمیت کمتری برخوردار است. چون تنها بر مولفه‌های هیدرولوژیکی در ابتدای دوره شبیه‌سازی اثرگذار خواهد بود. 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 پژوهش نیز در نظر گرفته شده است. ضریب K_4 ضریب اصلاحی تبخیر نام داشته و در واقع تاثیر کاربری اراضی، تراز و همچنین شرایط میکروهواشناسی شبکه سلول‌ها را در مقادیر تبخیر- تعرق اندازه گیری‌شده نشان می‌دهد. این ضریب تقریباً نزدیک به یک است. درصورتی‌که 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 اختیار خواهد کرد. یکی دیگر از پارامترهای ورودی مدل WetSpa، ضریب K_5 یا ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی در عمق و K_6 ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی نیز پارامتری است که ارتباط مستقیم با رواناب حوضه دارد. حداکثر ظرفیت ذخیره پیشنهاد شده ۲۰۰۰ میلیمتر و حداقل آن صفر در نظر گرفته می‌شود (Liu and De Smedt,2004). درصورتیکه دما از دمای پایه کمتر شود، بارش به صورت برف خواهد بود و هنگامی‌که دمای هوا از دمای پایه بالاتر برود، پدیده ذوب برف رخ داده و برف ذوب شده قسمتی از رواناب سطحی را تشکیل می‌دهد. برای در نظر گرفتن این اثرات، ضریب K_7 به نام دمای پایه ذوب برف در مدل در نظر گرفته شده است که بازه ممکن این پارامتر در محدوده [۱، ۱-] است. بسته به شرایط ارتفاعی حوضه و فشار هوا، این پارامتر تغییرات جزئی خواهد داشت. محدوده تغییرات K_8 ضریب درجه - روز دما برای شرایط بدون بارش بین ۱/۸ تا ۳/۷ $mm/day\text{-}^{\circ}C$ در تغییر بوده و در زمان و مکان نیز متغیر است. K_9 ضریب درجه-روز بارندگی نام دارد و نرخ ذوب برف ناشی از انقباض هوای مرطوب بر روی سطح برف و دمای انتقال یافته توسط بارش به سطح برف را تعیین می‌کند. این ضریب برای محاسبه ذوب برف اضافی ناشی از بارش استفاده می‌شود. مقدار ضریب درجه- روز بارش بسیار پایین و در حدود ۰/۰۱ $mm/^{o}C/day$ است. همچنین از آنجا که شدت بارندگی تاثیر بسزایی بر کنترل نسبت رواناب سطحی و تراوش دارد، در مدل WetSpa ضریب K_{10} به‌عنوان ضریب رواناب سطحی در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای مطالعات قبلی، مقدار این پارامتر حدوداً ۳ است. درصورتی‌که مقدار این پارامتر واحد باشد، از تاثیر شدت بارش بر رواناب صرفنظر شده و ضریب رواناب واقعی تابعی خطی از محتوای رطوبت نسبی خاک می‌شود. پارامتر K_{11} بر اساس دقت زمانی شبیه‌سازی مدل، آستانه شدت بارش متناظر با حالتی را تعیین می‌کند که مولفه رواناب سطحی برابر با یک شده و در نتیجه ضریب رواناب واقعی تابعی از رطوبت نسبی خاک می‌گردد. این پارامتر در واقع دارای توزیع مکانی و وابسته به کاربری اراضی، شیب و نوع خاک است (Liu and De Smedt,2004).

به‌علاوه پارامترهای دیگری در مدل وجود دارند که لازم است مقدار آن‌ها با توجه به استانداردهای موجود، اطلاعات منطقه و آزمایش و اندازه‌گیری تعیین شوند. از جمله ضریب هدایت هیدرولیکی، عمق ریشه، ظرفیت ذخیره چالابی، گیرش گیاهی، ضریب زبری مانینگ و ضریب رواناب که می‌توان آن‌ها را با درون‌یابی از استانداردهای موجود، که در راهنمای نرم افزار نیز وجوددارند.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

با توجه به پیچیدگی فرآیند واسنجی مدل‌های بارش-رواناب؛ نظیر جریانات حداقلی و حداکثری، همچنین تعداد و تنوع پارامترهای واسنجی، برخی محققان برای این کار از فرمول‌بندی چندهدفه استفاده کرده‌اند. بطوریکه در تحقیقی برای اولین بار مزایای استفاده از روش واسنجی چندهدفه، کاربرد و مطلوبیت آن بررسی شده است (Gupta et al., 1998)؛ همچنین بعدها محققان دیگری نیز از روش‌های متفاوت واسنجی چندهدفه استفاده کرده‌اند (Bahremand and De Smedt,2008).

جدول ۱- پارامترهای سراسری مدل بارش- رواناب Wetspa

عنوان پارامتر	پارامتر	واحد
جریان دیواره‌ای (Inter flow scale factor)	K_1	بدون بعد
ضریب فروکش آبزیرزمینی (Groundwater recession coefficient)	K_2	d^{-1}
مولفه رطوبتی اولیه خاک (Initial soil moisture factor)	K_3	بدون بعد
ضریب اصلاحی تبخیر (Correction factor for PET)	K_4	بدون بعد
ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی (Initial groundwater storage)	K_5	mm
ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی (Groundwater storage scaling)	K_6	mm
دمای پایه ذوب برف (Base temperature for snowmelt)	K_7	$^{\circ}C$
ضریب درجه-روز دما (Temperature degree-day coefficient)	K_8	$^{\circ}C$/day
ضریب درجه-روز بارندگی (Rainfall degree-day coefficient)	K_9	mm/°C/day
ضریب رواناب سطحی (Surface runoff coefficient)	K_{10}	بدون بعد
آستانه حداکثر شدت بارش (Maximum rainfall threshold)	K_{11}	mm

یکی از نکات مثبت استفاده از چند تابع نکویی به‌طور 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 (Gupta et al., 1998). نظر به پیچیدگی و بزرگی مقیاس مسأله واسنجی چندهدفه مدل‌های بارش- رواناب، در سالیان اخیر الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه نیز مورد استفاده بسیاری از محققان قرار گرفته است (Shafii and Smedt,2009).

از این بین الگوریتم ژنتیک از جمله پرکاربردترین‌روش‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته می‌شود که توانایی حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه را نیز دارد. لذا در این پژوهش، نحوه عملکرد الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA II)، توسعه داده شده دب و همکاران (۲۰۰۲) در مقایسه با یکی از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری به نام الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه استفاده شده است.

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA- II)

الگوریتم ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب یکی از الگوریتم‌های شاخص و پرکاربرد در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه است. در واقع روش کار الگوریتم NSGA-II به گونه‌ای است که ابتدا جمعیت اولیه ایجاد شده، سپس معیار برازندگی محاسبه می‌گردد. در ادامه فاصله ازدحامی[1] که فاکتوری جهت انتخاب بهترین جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه است محاسبه شده و پس از آن، انتخاب از میان جمعیت اولیه بر اساس رتبه جمعیت و میزان فاصله ازدحامی صورت می‌پذیرد، سپس با فرض این که دو عضو از جمعیت موجود دارای یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. البته اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است. در مرحله بعد انجام تقاطع و جهش برای تولید فرزندان جدید صورت گرفته و تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش در دستور کار قرار می‌گیرد. پس از آن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده، جایگزین می‌گردد و مجددا فرآیند انتخاب بر اساس رتبه، فاصله ازدحامی، تقاطع، جهش و مراحل تلفیق تا رسیدن به شرایط بهینگی تکرار می‌شود (Deb et al., 2002).

در الگوریتم NSGA-II، فاصله ازدحامی بر اساس رابطه ۱ محاسبه می‌گردد (Deb et al., 2002):

$$CD[i] = \frac{(f_m^{i+1} - f_m^{i-1})}{(f_m^{max} - f_m^{min})} \quad (۱)$$

که در آن $CD[i]$ فاصله ازدحامی فرد iام بر روی جبهه F، f_m^i مقدار تابع هدف mام در iمین فرد جبهه F و f_m^{max} و f_m^{min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار تابع هدف m در جبهه F است. لذا جوابی بهتر است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد (Deb et al.,2002).

الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه[2]

عنکبوت‌های بیوه سیاه، گروهی از عنکبوتیان زهردار می‌باشند که جزو گروه حشرات نبوده چراکه فاقد بال هستند. جنس ماده این عنکبوت، اندازه‌ای بین ۳۶-۸ میلی‌متر دارد و از روی علامتی شبیه ساعت شنی که روی شکمش است شناخته می‌شود. عنکبوت‌های بیوه سیاه ماده و نر بالغ، به تنهایی زندگی می‌کنند و تنها برای تولید مثل همدیگر را ملاقات می‌کنند. عنکبوت‌های بیوه سیاه ماده تقریباً

1- Crowding distance

2- Black Widow Optimization Algorithm

۲۰۰ تخم می‌گذارند. تخم‌ها برای ۲۰ روز در یک کیسه کاغذی گرد و کوچک که آویزان به تار مادر است می‌مانند و بعد از این که از تخم بیرون آمدند بچه عنکبوت‌ها بیش از یک ماه در یک پیله می‌مانند (شکل ۱). جفت‌گیری در این نوع با جفت‌گیری در دیگر گونه‌های عنکبوت بیوه سیاه مشابه است، عنکبوت نر دور خودش می‌چرخد و اسپرم‌ها را در اسپرم وب[1] قرار می‌دهد، عضو تناسلی جنس نر پر از اسپرم می‌شود و بعد، او لانه را برای یافتن عنکبوت ماده ترک می‌کند. جنس ماده این نوع از عنکبوت پس از جفت‌گیری شریک مذکر خود را می‌کشد و آن را به مصرف غذایی می‌رساند. سپس تخم‌ها را به کیسه تخم[2] خود منتقل می‌کند. عنکبوت‌های نوزاد نیز پس از خروج از کیسه به همنوع‌خواری[3] روی می‌آورند و این چرخه باعث بقای افراد متناسب و قویشده که به نوعی بیانگر بهینه‌سازی تابع هدف می‌باشد (Hayyolalamand Pourhaji Kazem, 2020).

الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه (BWO) همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، با تخمینی از یک جمعیت اولیه از عنکبوت‌ها آغاز می‌شود، به‌طوری‌که هر عنکبوت یک راه حل بالقوه را نشان داده و با جفت‌گیری، سعی در تولید مثل و ایجاد نسل جدید را دارد. عنکبوت بیوه سیاه ماده در حین جفت‌گیری یا بعد از آن عنکبوت نر را می‌خورد. در این هنگام اسپرم‌های ذخیره‌شده در حفره‌های اسپرم عنکبوت نر در کیسه‌های تخم آزاد می‌شود. به‌طوری‌که ۱۱ روز پس از عمل لقاح، عنکبوت‌ها از کیسه‌های تخم مرغ خارج شده و به مدت چندین روز تا یک هفته در شبکه تاری تنیده شده توسط مادر خود زندگی می‌کنند و در این مدت مشغول فرایند همنوع‌خواری بوده و از عنکبوت‌های نوزاد دیگر که تازه متولد شده‌اند تغذیه می‌نمایند. سپس بوسیله باد محل تولد خویش را ترک می‌کنند. برای حل یک مسأله بهینه‌سازی، متغیرهای مسأله باید با یک ساختار مناسب برای حل مسأله فعلی تشکیل شوند؛ که در الگوریتم‌های GA و PSO، این ساختار به ترتیب "کروموزوم" و "موقعیت ذره" نامیده می‌شود، اما در الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت سیاه به آن "بیوه" گفته می‌شود. در BWO، هر بیوه مقادیر متغیرهای مسأله را نشان می‌دهد به‌گونه‌ای‌که، برای حل توابع هدف، ساختار آرایه‌ای برای آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Widow} = [x1, x2, \ldots, \text{Nvar}] \qquad (۲)$$

هریک از مقادیر ($x1, x2, \ldots, \text{Nvar}$) یک متغیر شناور است.

برازندگی عنکبوت ماده با ارزیابی عملکرد برازندگی تابع f در یک عنکبوت ($x1, x2, \ldots, x\text{Nvar}$) بدست می‌آید. بنابراین برای شروع

$$\text{Fitness} = (\text{widow}) = f(x1, x2, \cdots, x\text{Nvar}), \qquad (۳)$$

بهینه‌سازی، ابتدا ماتریسی با اندازه Npop × Nvar با جمعیت اولیه عنکبوت‌ها تولید می‌شود. سپس جفت والد به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود تا مرحله جفت‌گیری را انجام دهند، با این فرض که عنکبوت ماده در حین جفت‌گیری یا بعد از آن عنکبوت نر را می‌خورد (Hayyolalamand Pourhaji Kazem,2020).

از آنجا که این جفت‌ها از یکدیگر مستقل هستند، هرکدام به طور موازی و جدا از بقیه جفت‌ها اقدام به جفت‌گیری می‌نمایند. در دنیای واقعی، در هر جفت‌گیری تقریباً ۱۰۰۰ تخم تولید می‌شود، اما تنها آن دسته از نوزادان که قوی تر هستند باقی می‌مانند. لذا جهت اجرای الگوریتم مذکور ضروری است که آرایه‌ای به نام α بر اساس رابطه ۲ تعریف شود تا نوزادان عنکبوت با استفاده از آن بر اساس رابطه ۴ تولید شوند بطوریکه در آن $x1$ و $x2$ والدین و $y1$ و $y2$ فرزندان هستند.

$$y1 = \alpha \times x1 + (1 - \alpha) \times x2 \qquad (۴)$$
$$y2 = \alpha \times x2 + (1 - \alpha) \times x1$$

این روند به تعداد نصف مقدار Nvar تکرار می‌شود، با این شرط که اعداد تصادفی انتخاب شده نباید تکرار شوند. سرانجام، ضمن اضافه شدن نوزادان و مادران به آرایه، براساس ارزش برازندگی، آن‌ها مرتب می‌شوند، پس از آن، با توجه به نتایج رتبه‌بندی همنوع‌خواری، برخی از بهترین افراد به جمعیتتازه تولید شده اضافه می‌شوند و این مراحل برای همه جفت‌ها اعمال می‌شود. در این الگوریتم، جهت درجه‌بندی همنوع‌خواری پارامتری به نام CR تعریف می‌شود که بر اساس آن تعداد بازماندگان تعیین می‌شوند. در مرحله بعد تعداد جمعیت جهش‌یافته (Mutepop) به طور تصادفی از جمعیت اولیه انتخاب و مجدداً مراحل از ابتدای الگوریتم تکرار می‌گردد (شکل ۲). درنهایت شرط توقف اعمال می‌شود. همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، سه شرط توقف اعم از رسیدن به تعداد تکرار از پیش تعریف شده، رعایت عدم تغییر در مقدار برازندگی بهترین عنکبوت برای چندین تکرار و رسیدن به سطح مشخصی از دقت را می‌توان درنظر گرفت (Hayyolalamand Pourhaji Kazem,2020). در شکل (۳) شبه‌کد الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه نمایش داده شده است.

توابع هدف و ارزیابی مدل

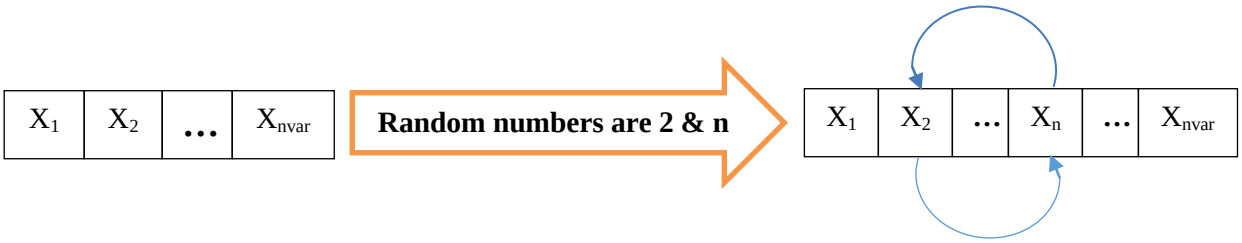
در پژوهش‌حاضر به منظور ارزیابی مدل از چهار شاخص آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه متوسط مربعات خطا (RMSE)، شاخص نش–ساتکلیف و نش–ساتکلیف لگاریتمی استفاده شده است (Moazami Goudarzi et al., 2020):

$$r = \overline{Q_s.Q_o} - \overline{Q_s}.\overline{Q_o} \Big/ \sqrt{\left(\overline{Q_o^2} - \overline{Q_o}^2\right) - \left(\overline{Q_s^2} - \overline{Q_s}^2\right)} \qquad (۵)$$

1- sperm web
2- egg sac
3- sibling cannibalism

(ب) (الف)

شکل ۱- یک عنکبوت بیوه سیاه ماده در تار خود به همراه کیسه تخم (الف) و عنکبوت‌های نوزاد در حال خروج از کیسه تخم (ب)



شکل ۲- نمایش شماتیک از نحوه عملکرد عملگر جهش در الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه (Hayyolalamand Pourhaji Kazem, 2020)

```
Input: Maximum number of iteration, Rate of procreating, rate of cannibalism, rate of mutation
Output: near-optimal solution for the objective function
//initialization
1 .The initial population of black widow spiders
        Each pop is a D-dimensional array of chromosomes for a D-dimensional problem
//Loop until the terminal condition
1 .Based on procreating rate, calculation the number of reproduction "nr";
2. Select the best nr solutions in pop and save them in pop l; // Procreating and cannibalism
3. For i=1 to nr do
4. Randomly select two solutions as parents from pop l;
5. Generate D children using equation l;
6. Destroy father;
7. Based on the cannibalism rate, destroy some of the children (new achieved solutions);
8 .Save the remain solutions into pop2;
9. End for // Mutation
10. Based on the mutation rate, calculate the number of mutation children "nm";
11. For i=1 to nm do
12 .Select a solution from pop l;
13. Mutate randomly one chromosome of the solution and generate a new solution;
14 .Save the new one into pop3;
15. End for // Updating
16. Update pop = pop2+pop3;
17. Returning the best solution;
18. Return the best solution from pop;
```

شکل ۳- شبه کد الگوریتم بهینه‌سازی عنکبوت بیوه سیاه (Hayyolalamand Pourhaji Kazem, 2020)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{s_i} - Q_{o_i}\right)^2 \Big/ N} \quad (۶)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{s_i} - Q_{o_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_{o_i} - \overline{Q_O}\right)^2} \quad (۷)$$

$$Ln(NS) = -\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Ln(Q_{s_i}) - Ln(Q_{o_i})\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Ln(Q_{o_i}) - Ln(\overline{Q_O})\right)^2} \quad (۸)$$

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 (Afkhamifar and Sarraf, 2020).

لازم به ذکر است که در این پژوهش به منظور واسنجی مدل WetSpa در حوضه گرگانرود از الگوریتم‌های تکاملی ژنتیک چندهدفه (NSGA –II) و عنکبوت بیوه سیاه (MOBWO) استفاده شده که در این فرآیند یک مساله بهینه‌سازی چندهدفه به منظور بهینه کردن توابع هدف واسنجی بین خروجی‌های محاسباتی و مشاهداتی حل می‌گردد. به منظور افزایش دقت مدل در پیش‌بینی جریان‌های حداقلی و حداکثری، از دو معیار نش- ساتکلیف و نش- ساتکلیف لگاریتمی (روابط ۷ و ۸) استفاده خواهد شد. در این صورت، توابع هدف کیفیت هیدروگراف تولیدی توسط مدل WetSpa را به نسبت هیدروگراف مشاهداتی ارزیابی می‌کند. از آنجا که در روش نش- ساتکلیف مقادیر خطا با توان دو ارزیابی می‌شود، لذا خطاهای بزرگ که در پیش‌بینی جریانات بالا ایجاد می‌گردد، بزرگ‌تر شده و تاثیر بیشتری را در واسنجی مدل خواهند داشت؛ لذا، معیار نش-ساتکلیف وزن بیشتری را به جریان‌های بالا می‌دهد، درصورتی‌که ابتدا دبی‌ها به مقیاس لگاریتمی انتقال داده شده و سپس معیار NS را بر روی آن‌ها اعمال شود (رابطه ۸)، 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.

حوضه آبریز مطالعاتی گرگانرود و داده‌های مدل‌سازی

حوضه آبریز گرگانرود در قسمت جنوب شرقی دریای خزر قرار داشته و یکی از زیر حوضه های حوضه آبریز دریای خزر تلقی می‌گردد. حوضه آبریز گرگانرود در محدوده طول جغرافیایی ۵۴°۰۰ تا ۵۶°۲۹` شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶°۳۶` تا ۳۷°۴۷` شمالی واقع شده و از شمال و شرق به حوضه اترک، از جنوب به حوضه کویر نمک و از جنوب غربی به حوضه نکارود متصل است. مساحت حوضه ۱۲۹۳۵ کیلومتر مربع بوده که بیش از نیمی از آن را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد. گرگانرود یکی از مهم‌ترین رودخانه حوضه آبریز دریای خزر است. از منتهی‌الیه غرب کوه‌های خراسان سرچشمه گرفته و وارد منطقه کلاله شده و نهایتاً پس از عبور از ترکمن‌صحرا و شمال گرگان وارد خلیج گرگان می‌شود (Donyaii and Sarraf, 2020). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را مشخص کرده است. ازجمله شاخه‌های مهم گرگانرود می‌توان به رودخانه‌های زاو، دوغ، اوغان، قلی‌تپه، چهل‌چای، نرماب، خرمالو، قره‌چای، سیاه‌جوی، سرمه‌رود، زرینگل، کبودوال، محمدآباد و جعفرآباد اشاره کرد. گرگانرود، رودخانه‌ای دائمی بوده در حدود ۶۰ رودخانه را در طول مسیر به خود ملحق می‌کند. در حال حاضر، سه سد مخزنی به ترتیب از بالادست به نام‌های بوستان، گلستان و وشمگیر بر روی گرگانرود ساخته شده‌اند. با عنایت به پتانسیل خاک‌های مرغوب، این منطقه، سهم قابل ملاحظه‌ای در تولیدات کشاورزی در کشور دارد. آورد رودخانه گرگانرود بستگی کامل به بارش منطقه داشته که غالباً در فصول زمستان و بهار به وقوع می‌پیوندد (Donyaii et al., 2020b). متوسط بارندگی این حوضه بالغ بر ۴۲۳ میلیمتر در سال بوده؛ به‌طوریکه این مهم خود بر تنوع گونه‌های گیاهی و جانوری مؤثر بوده است (شکل ۴).

مدل WetSpa مدلی توزیعی بوده و تمامی پارامترهای ثابت آن که نیاز به واسنجی ندارند نیز توزیعی هستند. به این‌ترتیب، تمامی پارامترها در موقعیت‌های مختلف روی حوضه آبریز مقادیر مختلفی خواهند داشت برای این کار، با انتخاب آستانه سلولی ۱۰۰ برای تعیین زیرحوضه‌ها، تعداد ۲۵۱ زیرحوضه به‌دست آمد که کلیه شبیه‌سازی‌ها در این ۲۵۱ زیرحوضه انجام شد. اطلاعات هیدرولوژیک حوضه و هیدرولیک آبراهه از دیگر پارامترهایی هستند که باید به مدل WetSpa وارد شوند. بدین منظور، آمار بارندگی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۹ در ۱۷ ایستگاه باران‌سنجی داخل حوضه به صورت پیوسته‌و با گام زمانی روزانه جمع آوری گردید. همچنین از داده‌های دما و تبخیر در ۱۷ ایستگاه دماسنجی به صورت پیوسته و با گام زمانی روزانه برای سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۹ مورد استفاده شد. در این پژوهش ضریب زبری مانینگ متوسط برای کل حوضه آبریز برابر با $۰/۳۶ s/m^{1/3}$ برآورد شد (Sarraf & donyaii, 2020).

نتایج و بحث

در این بخش نتایج واسنجی مدل WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های NSGA–II و MOBWO ارائه گردیده اند. لازم به ذکر است که کدهای مساله درنرم افزار متلب تهیه شده است. متغیرهای تصمیم مساله، پارامترهای سراسری یازده‌گانه ارائه شده در جدول شماره ۱ هستند. توابع هدف باید به نحوی انتخاب شوند که در انتهای فرآیند واسنجی بتوان بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی را به‌دست آورد.

شکل ٤- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز گرگانرود و حوضه‌های همجوار در استان گلستان

برخی توابع به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهند، در حالی که برخی دیگر اهمیت بیشتری را برای جریان‌های پایین قائلند. لذا در این پژوهش سعی شده است 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؛ بنابراین، پس از تعیین تمامی شبکه‌های مکانی لازم در مدل‌سازی حوضه، اطلاعات بارش، تبخیر، دما و دبی سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۸ برای واسنجی مدل، اطلاعات سال ۱۳۹۹ برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شدند. به منظور تعیین محدوده اولیه پارامترها، از اطلاعات موجود در منطقه و مقادیر پیشنهادی در راهنمای مدل استفاده گردید؛

این اطلاعات در منطقه شامل مطالعات حوضه هیدرولوژی، هواشناسی، خاکشناسی، زمین شناسی، هیدروژئولوژی و خصوصیات فیزیکی حوضه آبریز گرگانرود بوده به‌گونه‌ای که هم با مقادیر پیشنهادی در راهنمای مدل تطابق داشته و هم تغییرات این پارامترها را در نقاط مختلف حوضه پوشش دهد، محدوده اولیه پارامترها مطابق جدول ۲ تعیین شد.

جدول ۲- محدوده اولیه پارامترها در واسنجی مدل Wetspa در حوضه گرگانرود

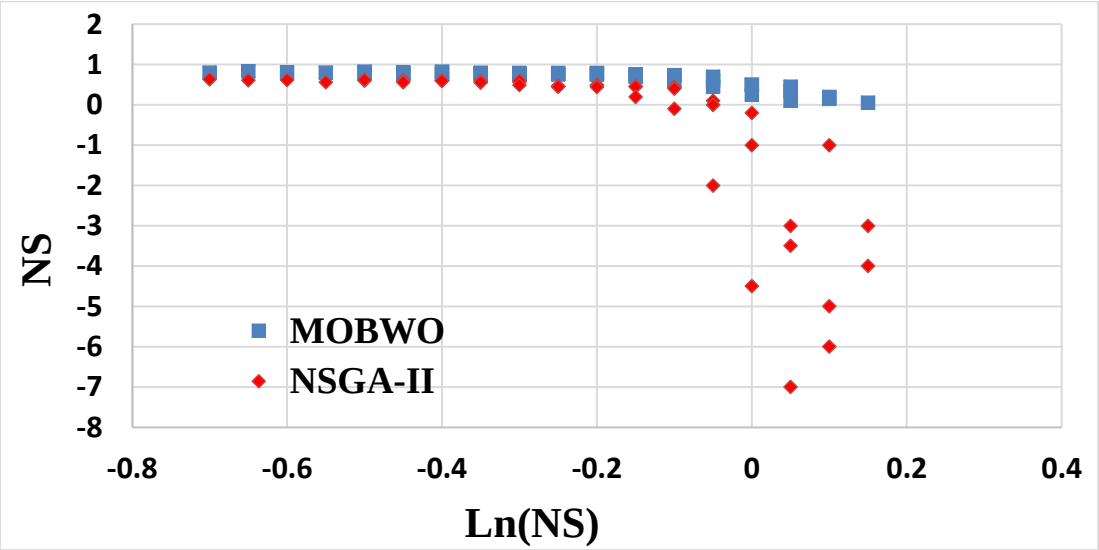
پارامتر	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
حداقل	صفر	۳×۱۰^{-۷}	۰/۹	صفر	۳۰۰	۱۸۰۰	۰/۸	صفر	۱×۱۰^{-۶}	۳	۳۰۰
حداکثر	۱	۸×۱۰^{-۷}	۱/۲۵	۲	۵۰۰	۲۲۰۰	۰/۹۵	۰/۴۵	۶×۱۰^{-۵}	۵	۵۰۰

هر کدام از الگوریتم‌های بهینه‌سازی با اندازه جمعیت اولیه ۱۰۰ و در طول ۱۰۰ نسل (تعداد دفعات اجرای مدل بهینه سازی) اجرا شد؛ در نتیجه، تعداد کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر اجرا از الگوریتم برابر با ۱۰۰۰۰ است. بعد از انجام فرآیند واسنجی، بهترین مقادیر دو تابع هدف یعنی معیارهای NS و Ln(NS) در دوره زمانی واسنجی در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

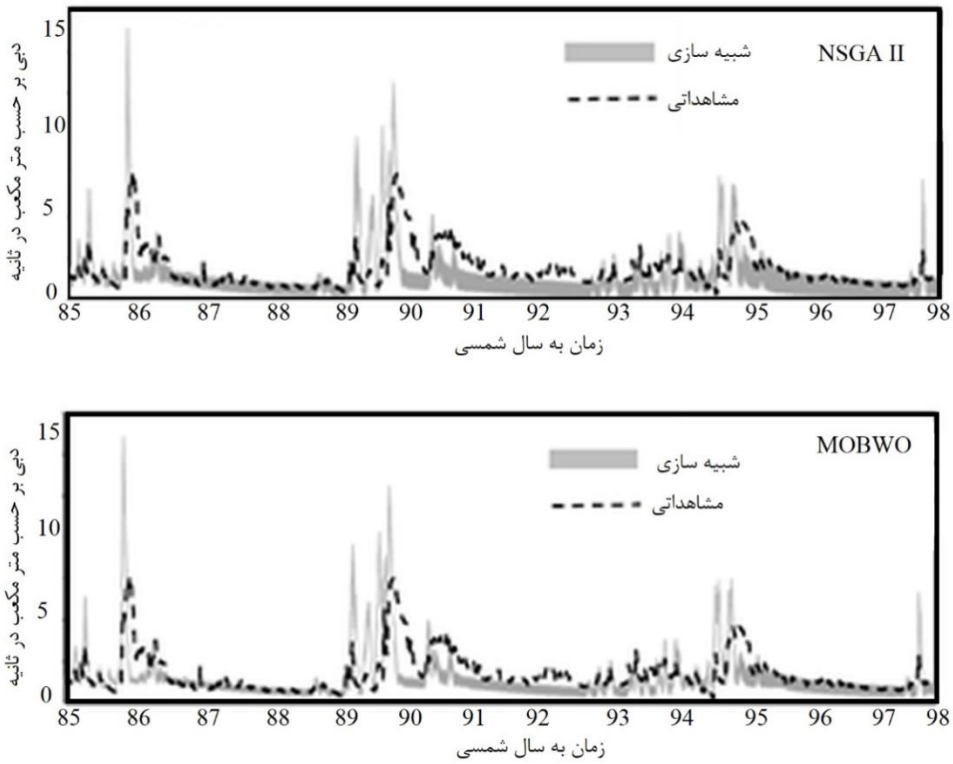
شکل ۵ نشان می‌دهد که جواب‌های به‌دست آمده توسط MOBWO بهتر از جواب‌های NSGA-II هستند؛ زیرا مقادیر NS آن بالاتر است. هیدروگراف‌های خروجی به‌دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه آبریز گرگانرود در شکل ۵ ارائه شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر دبی در این شکل مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۸ است و از ارائه نتایج دبی جریان در سال ۱۳۸۴ صرفنظر شده است. در واقع، با توجه به اینکه مدل به صورت پیوسته اجرا گردیده، نتایج شبیه‌سازی در سال ۱۳۸۴ به عنوان دوره Warm up منظور شده است. در این شکل، محدوده هیدروگراف‌های خروجی متناظر با جواب‌های بهینه موجود روی جبهه پرتو که توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOBWO به‌دست آمده‌اند، برای کل دوره واسنجی نشان داده شده است، به‌این‌صورت که به ازای هر زمان، مقادیر حداقل و حداکثر دبی شبیه‌سازی شده متناظر با مجموعه نقاط جبهه پرتو، محاسبه شده و فاصله آن‌ها به صورت یک باند در

شکل ۶ ارائه شده است. لازم به توضیح است که هر نقطه از جبهه پرتو متناظر با یک سری از متغیرهای تصمیم مسأله (۱۱ پارامتر سراسری مدل WetSpa) و یک مقدار دبی جریان در خروجی حوضه است. همان‌گونه‌که ملاحظه می‌شود عرض باند هیدروگراف به‌دست آمده از الگوریتم MOBWO تا اندازه‌ای کمتر از عرض باند هیدروگراف NSGA-II بوده و مقادیر شبیه‌سازی نیز بسیار نزدیک‌تر به مقادیر مشاهده‌ای می‌باشند. دلیل این مساله به طور مشخص در کیفیت جستجو و پارامتریابی این دو الگوریتم بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم MOBWO در حل مساله واسنجی مدل WetSpa در حوضه آبریز گرگانرود بهتر از الگوریتم NSGA-II رفتار می‌کند.

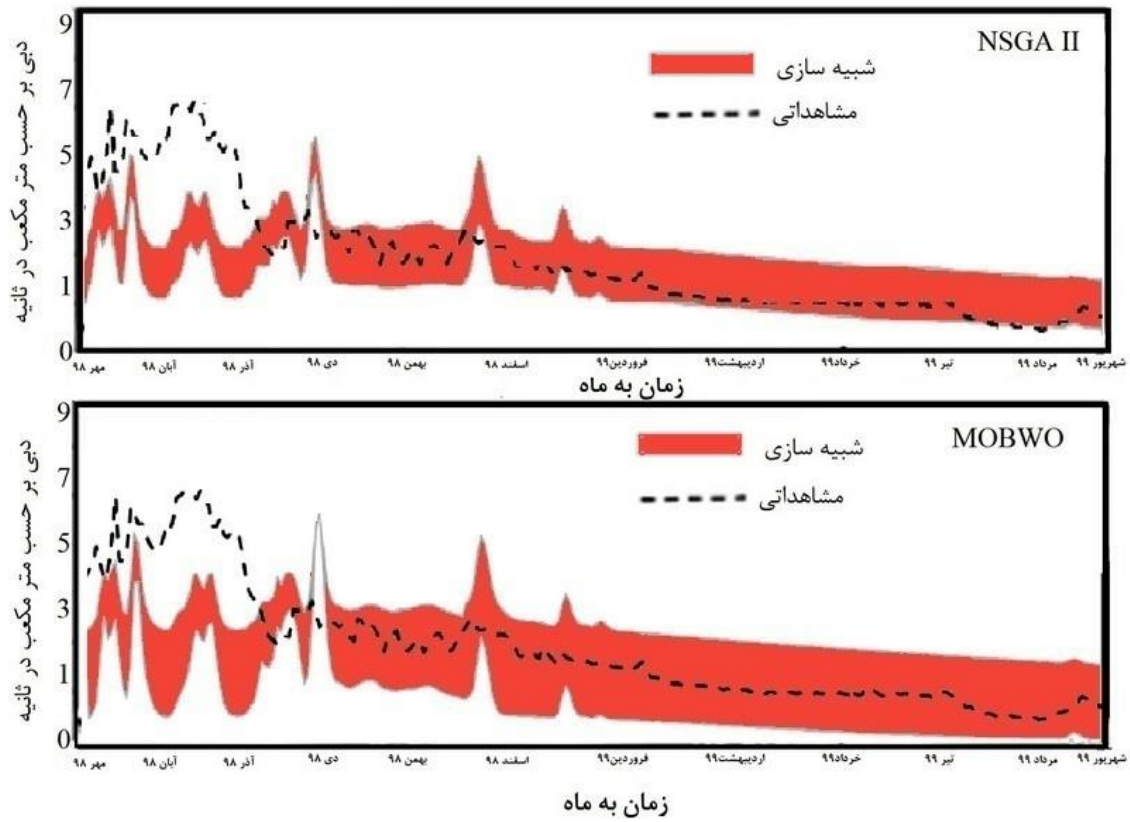


شکل ۵- جبهه پرتوی به‌دست آمده توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOBWO در دوره زمانی واسنجی



شکل ٦- هیدروگراف‌های خروجی به دست‌آمده از واسنجی مدل توسط الگوریتم‌های IINSGA و MOBWO

هیدروگراف‌های خروجی شبیه‌سازی شده متناظر با الگوریتم‌های NSGA-II و MOBWO برای سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ از دوره صحت‌سنجی در شکل شماره ۷ نشان داده شده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌شود، باند دبی شبیه‌سازی تا حد قابل ملاحظه‌ای عریض شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که نه تنها پهنای باند نتایج MOBWO از نتایج NSGA-II بیشتر است بلکه الگوریتم NSGA-II در بسیاری از موارد فاقد توانایی پوشش کامل داده‌های مشاهداتی است؛ بنابراین مشاهده می‌گردد که الگوریتم MOBWO توانایی بیشتری در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی داشته به نحوی‌که اکثر مقادیر مشاهداتی در باند نتایج آن قرار می‌گیرند. اگرچه می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت نتایج به‌دست آمده در دوره صحت سنجی بهتر از دوره واسنجی می‌باشد، لیکن در بین پاسخ‌های شکل ۶ 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 را پیش‌بینی نموده است، ولی دقت پیش‌بینی در برخی زمان‌ها چندان رضایت بخش نیست.



شکل ۷- هیدروگراف‌های خروجی به‌دست‌آمده از صحت‌سنجی مدل‌توسط الگوریتم‌های NSGA-II و MOBWO (سال آبی ۹۹-۹۸)

جدول ۳- پارامترهای سراسری حاصل از واسنجی مدل در حوضه گرگانرود

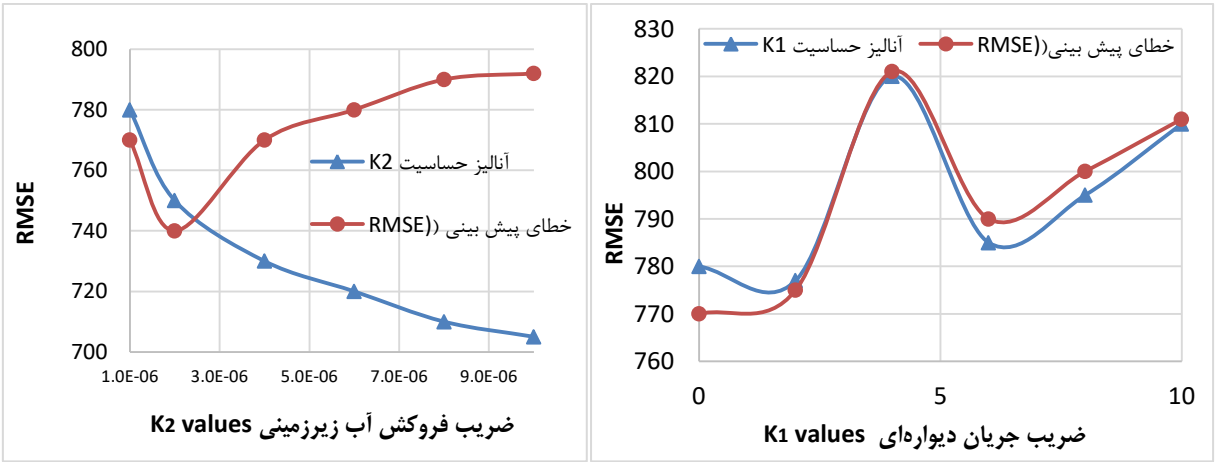
پارامتر	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8	K_9	K_{10}	K_{11}
حداقل	۰/۰۱	۳×۱۰^{-۷}	۰/۹	۰/۰۱	۳۰۰	۱۸۰۶	۰/۸	۰/۰۱	۱×۱۰^{-۶}	۳/۰۱	۳۰۱
حداکثر	۱	۸×۱۰^{-۷}	۱/۲۵	۲	۴۹۵	۲۲۰۰	۰/۹۵	۰/۴۴	۶×۱۰^{-۵}	۴/۹۳	۴۹۸
مقدار	۰/۲۱	$۳/۳\times۱۰^{-۷}$	۱/۱۹	۱/۷۵	۵۱۲	۲۰۲۰	۰/۹۴	۰/۱	$۱/۷\times۱۰^{-۵}$	۴/۶۳	۴۲۵

آنالیز حساسیت مدل‌ها

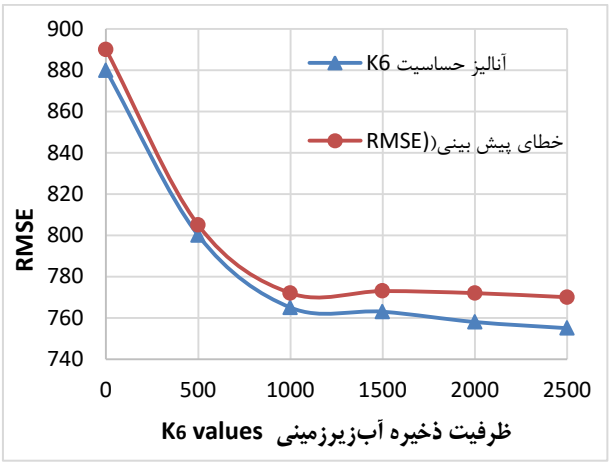
به منظور آنالیز حساسیت، ابتدا مدل با توجه به داده‌های جدول ۳ تنظیم گردید. با تغییر هر یک از پارامترها در بازه ممکن آن و ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها، شبیه‌سازی‌های مکرر صورت گرفت. در هر شبیه‌سازی جمعیت اولیه و تعداد نسل‌ها برابر ۱۰۰ و توابع هدف به ترتیب نش - ساتکلیف و RMSE در نظر گرفته شدند. در این تحلیل

ارزیابی خطا به‌ازای کل داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی انجام شده است. در شکل ۸ نحوه تغییرات RMSE به ازای تغییر پارامترهای مدل نشان داده شده است. به‌عنوان مثال شکل ۸-الف، آنالیز حساسیت پارامتر K_1 جریان دیواره‌ای را در مدل WetSpa نشان می‌دهد. محدوده ممکن این پارامتر در بازه [۱۰- ۰] و محدوده جواب‌های جبهه پَرِتو بین [۱- ۰/۰۱۲] برآورد شده است.

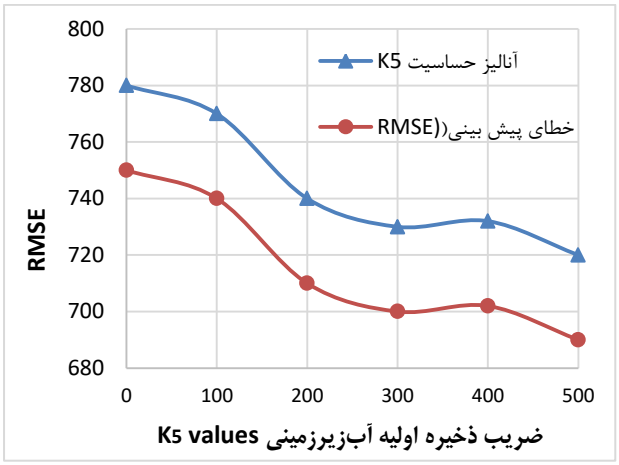
لازم به ذکر است که خطاهای نسبی (تغییرات RMSE) با توجه به پیش‌بینی دبی جریان به ازای مقادیر بهینه ۱۱ پارامتر سراسری مدل سنجیده شده‌اند. نتایج شکل ۸-الف نشان می‌دهد که افزایش پارامتر K_1 تأثیر زیادی در نتایج شبیه‌سازی حوضه گرگانرود نداشته است به‌طوریکه با ۵ برابر شدن مقدار K_1، تغییرات RMSE از ۱۰ درصد فراتر نرفته است. با توجه به منحنی شکل ۸-الف، با افزایش مقدار K_1 از صفر تا چهار، خطا حدود ۶٪ افزایش می‌یابد و به مقدار حداکثر خود نزدیک می‌شود و بالعکس، با افزایش مقدار K۱ از چهار تا شش، خطا کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت به ازای K_1=۱۰ به پنج درصد می‌رسد. ضریب فروکش آب زیرزمینی به‌عنوان دومین پارامتر سراسری مدل، اهمیت زیادی در حوضه گرگانرود دارد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، افزایش این پارامتر منجر به بالارفتن مقدار دبی پایه رودخانه و افزایش خطای RMSE تا ۶٪ می‌گردد. در حوضه‌گرگانرود، مدل به تغییرات این پارامتر بسیار حساس بوده و می‌تواند دبی صفر را تولید کند. بهترین جواب در همسایگی بسیار کوچکی از 2×10^{-6} است. مطابق شکل‌شماره ۸-ج، مقدار بهینه K_3 مولفه رطوبت اولیه خاک حدود ۰/۸ است. محدوده جواب‌های جبهه پَرِتو برابر محدوده ممکن این پارامتر در بازه [۲/۵ -۰] است.



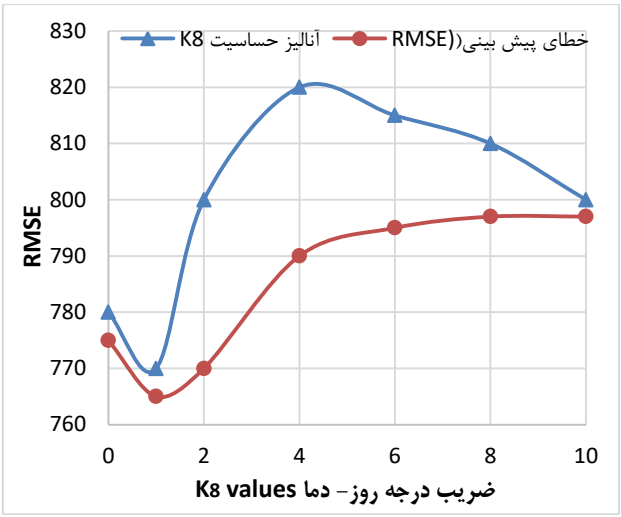
(الف) (ب) (ج) (د)


آنالیز حساسیت K6
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K6 values ظرفیت ذخیره آب‌زیرزمینی

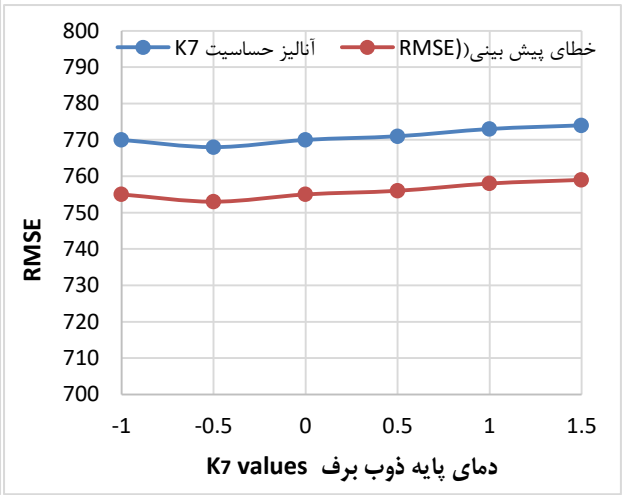
(و)


آنالیز حساسیت K5
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K5 values ضریب ذخیره اولیه آب‌زیرزمینی

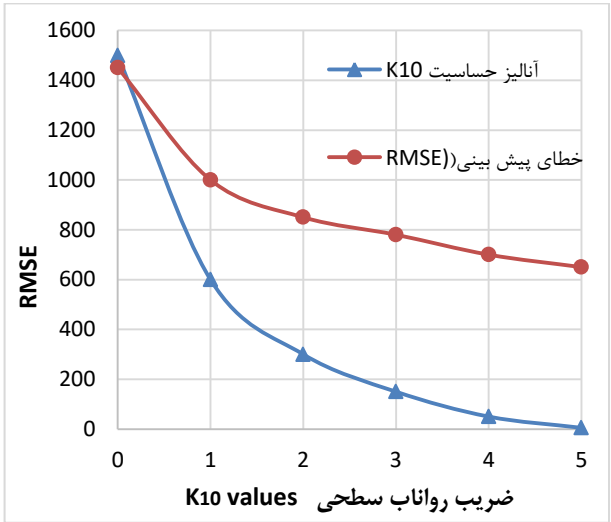
(ه)


آنالیز حساسیت K8
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K8 values ضریب درجه روز- دما

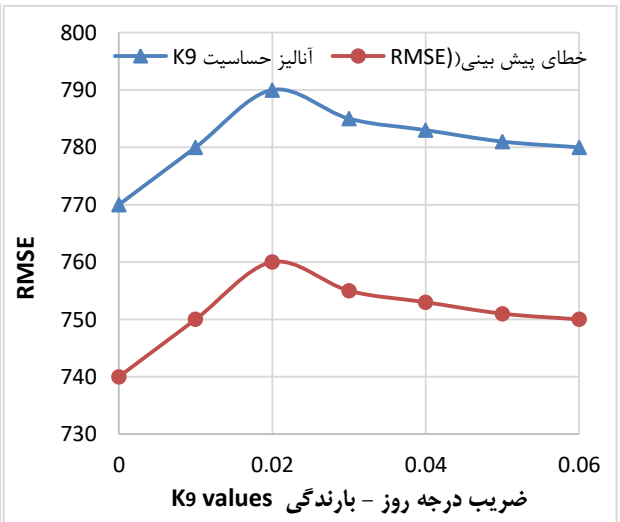
(ح)


آنالیز حساسیت K7
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K7 values دمای پایه ذوب برف

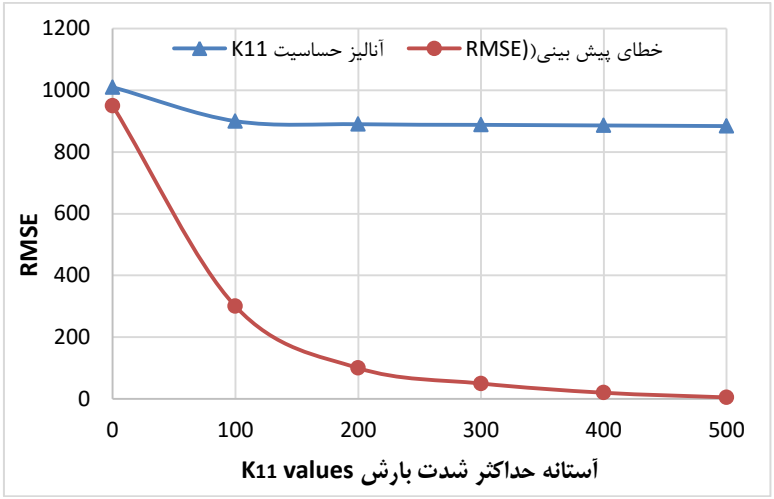
(ز)


آنالیز حساسیت K10
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K10 values ضریب رواناب سطحی

(ی)


آنالیز حساسیت K9
خطای پیش بینی(RMSE)
RMSE
K9 values ضریب درجه روز - بارندگی

(ط)



(ک)

شکل ۸- آنالیز حساسیت مدل WetSpa نسبت به پارامترهای سراسری یازده‌گانه

در حوضه‌گرگانرود مقدار بهینه K_4، ضریب اصلاحی تبخیر در حدود ۰/۶ بوده و برای مقادیر کمتر از آن، خطای نسبی می‌تواند تا حدود درصد افزایش یابد. مقادیر K۵ یا ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی در عمق در بازه [۵۰۰ - ۰] پیشنهاد شده است. مطابق شکل ۸-ه در حوضه گرگانرود مقدار خطای ناشی از تغییرات این پارامتر ناچیز و حساسیت مدل به مقدار این پارامتر بسیار کم ارزیابی شده است. مطابق نتایج شکل ۸-و با افزایش مقدار این پارامتر، خطای محاسباتی کمتر شده و به‌عبارتی حساسیت مدل نسبت به ابتدای بازه، کمتر می‌گردد. در حوضه گرگانرود، مدل نسبت به تغییرات K_7 (دمای پایه ذوب برف) حساسیت چندانی ندارد. بازه ممکن K_8 (ضریب درجه-روز دما) در محدوده [۱۰- ۰] در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۸-ح در حوضه گرگانرود در همسایگی مقدار صفر، RMSE حداقل است و با زیاد شدن این پارامتر مقدار خطا تا حدود ۷ درصد افزایش می‌یابد. بازه ممکن K_9 (ضریب درجه- روز بارندگی) در محدوده [۰/۰۶- ۰] است. مطابق شکل ۸-ط در حوضه گرگانرود، خطای مدل در همسایگی صفر برای این پارامتر کمترین بوده و با تغییر آن، نتایج مدل آنچنان تغییر نمی‌کند. بازه ممکن K_{10}. (ضریب رواناب سطحی) در محدوده [۵-۰] پیشنهاد شده است که در حوضه گرگانرود خطای مدل در همسایگی عدد چهار و پنج مناسب است. حساسیت مدل نسبت به کم شدن این پارامتر، به خصوص برای اعداد کمتر از یک، زیاد است و منجر به جواب‌های غیر قابل قبول می‌گردد. بازه ممکن K_{11} (آستانه شدت بارش) در محدوده [۵۰۰ - ۰] در نظر گرفته شده است. در حوضه گرگانرود، RMSE در همسایگی مقدار ۵۰۰ کمترین بوده و با کم شدن آن مقدار خطا در این حوضه به‌طرز چشمگیری افزایش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جهت واسنجی مدل بارش- رواناب توزیعی (WetSpa) حوضه گرگانرود از دو الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری، NSGA-II و عنکبوت بیوه سیاه (BWO) استفاده شد. نتایج به دست آمده از کاربرد مدل در این حوضه، حاکی از این مطلب است که استفاده از این الگوریتم‌ها در واسنجی مدل WetSpa رضایت بخش بوده است. مقایسه نتایج به دست آمده از الگوریتم NSGA-II و عنکبوت بیوه سیاه (BWO) نشان داد که در مساله واسنجی چندهدفه، الگوریتم عنکبوت بیوه سیاه (BWO) موفق‌تر از مدل NSGA-II عمل نموده است. ضعف مدل توسعه داده شده در پیش‌بینی برخی سیلاب‌ها، می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های استفاده شده در حوضه پهناور گرگانرود باشد؛ لذا افزایش طول دوره شبیه‌سازی می‌تواند منجر به افزایش دقت مدل استفاده شده گردد.

همچنین نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی دبی‌های پایین، بهتر از دبی‌های بالا عمل نموده که این امر می‌تواند به‌دلیل به فراوانی کمتر دبی‌های بالا در مجموعه داده‌های بررسی شده باشد. زیرا ضریب ذخیره موقت آب زیرزمینی (K_5) مقدار بزرگی را به خود اختصاص داده است که می‌تواند باعث گردد تا رواناب سطحی کاهش یابد. از سوی دیگر، ضعف نتایج در پیش‌بینی برخی دبی‌های کم را، می‌تواند به مقدار بهینه ضریب فروکش آب زیرزمینی (K_2) مرتبط دانست که در فرآیند واسنجی، مقدار کوچکی را به خود اختصاص داده است؛ چراکه آب‌های زیرزمینی بالاترین تأثیر را در تولید دبی‌های پایین در حوضه دارد.

به‌منظور ارزیابی حساسیت مدل واسنجی شده به پارامترهای سراسری و ارزیابی اهمیت آن‌ها در حوزه آبریز گرگانرود، با داشتن مقادیر بهینه پارامترهای سراسری، آنالیز حساسیت مدل انجام شد؛

بدین‌صورت که تاثیر هر یک از پارامترهای مدل بر دقت نتایج ارزیابی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که تأثیر ضریب رواناب سطحی بر نتایج مدل به نسبت سایر پارامترها بسیار بیشتر است. این درحالی‌است که حساسیت مدل نسبت به سایر پارامترها از یک تا ۱۶ درصد متغیر برآورد شده است.

سپاسگزاری

بدینوسیله از شرکت آب منطقه‌ای گلستان به جهت در اختیار قرار دادن داده‌های مورد استفاده در فرآیند مدل‌سازی صـمیمانه قـدردانی می‌شود.

منابع

Afkhamifar, S and Sarraf, A. P. 2020. Comparative study of groundwater level forecasts using hybrid neural network models. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management. https://doi.org/10.1680/jwama.20.00062.

Bahremand, A. and De Smedt, F. 2008.Distributed hydrological modeling and sensitivity analysis in Torysa watershed, Slovakia. Water Resources Management Journal. 22(3): 393-408.

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.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. 2002. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA‗II, IEEE Trans. Evol. Computation. 6(2): 182-197.

De Smedt, F., Liu, Y.B. and Gebremeskel, S. 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.

Donyaii A. R. and Sarraf A. P. 2020. Optimization of Reservoir Operation using a Bioinspired Metaheuristic Based on the COVID-19 Propagation Model. NMCE. 5(1): 15-28 URL: http://nmce.kntu.ac.ir/article-1-289-en.html.

Donyaii, A. R., Sarraf, A. P. 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. R., Sarraf, A. P., 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. R., Sarraf, A. P. 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.

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.

Hayyolalam, V. and Pourhaji Kazem, A. A. 2020. Black Widow Optimization Algorithm: A novel meta-heuristic approach for solving engineering optimization problems. Eng. Appl. Artif. Intell. 87, 103249.https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.103249.

Kuczera, G. 1997. Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. Water Resour. Res. 33(1): 177–185.

Liu, Y.B. and De Smedt, F. 2004. WetSpa Extension, A GIS‗based hydrologic model for flood prediction and watershed management documentation and user manual, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel.

Liu, Y.B., Gebremeskel. S., De Smedt, F., Hoffmann, L. and Pfister, L. 2003. A diffusive transport approach for flow routing in GIS‗ based flood modelling. Journal of Hydrology 283:91-106.

Moazami Goudarzi. F., Sarraf A. P. and Ahmadi H. 2020.Prediction of runoff within Maharlu basin for future 60 years using RCP scenarios. Arabian Journal of Geosciences, 13:605, 1-17.

Safari, A., De smedt, F. and Moreda, F. 2009. WetSpa model application in the distributed model intercomparison project (DMIP۲). Journal of Hydrology 419: 78-89.

Sarraf, A.P. and Donyaii, A.R. 2020. Optimization of multi-objective operation of the Vashmgir Dam reservoir in Golestan province, based on the climate change conditions. Research project conducted by Golestan Water Company.

Shafii, M. and Smedt, F.D. 2009. Multi‗ objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. Hydrology and Earth System Sciences. 13: 2137-2149.

Van Griensven, A. 2002. Developments towards

integrated water quality modeling for river basins, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Wang, Z.M., Batelaan, O. and De Smedt, F. 1997.A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). Phys. Chem. Earth. 21(3): 189-193.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 3, Vol. 15, Aug.-Sep. 2021, p. 721-736

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۵، مرداد - شهریور ۱۴۰۰، ص. ۷۳۶-۷۲۱

Calibration of WetSpa Distributed Hydrological Model using NSGA-II and Black Widow Multi-Objective Optimization Algorithms

A. Donyaii[1] and A. Sarraf[2*]

Recived: Feb.26, 2021 Accepted: Apr.21, 2021

Abstract

Conceptual rainfall-runoff (RR) models are one of the simple and efficient tools in hydrological modeling. These models simulate the flow regime using mathematical equations using input data such as precipitation, evapotranspiration and measured temperature, and basin topographic information. Calibration of RR models, e.g. WetSpa which has been developed in Belgium, is a process in which parameter adjustment are made so as to match the dynamic behavior of the RR model to the observed behavior of the catchment. This research presents an application of the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II) and Black Widow Optimization (BWO) for multi-objective calibration of WetSpa in Gorganroud river basin, Iran to optimize 11 global parameters of the WetSpa model. The objective functions are Nash–Sutcliffe and logarithmic Nash–Sutcliffe efficiencies in order to improve the model's performance. The WetSpa model then was applied for a period of 1-year flood simulation in the basin and the results were analyzed. Results showed that the evolutionary NSGA-II and BWO algorithms are capable of locating optimal parameter sets in the search space. The measured correlation coefficient in the calibration process was 0.69 and 0.81 for the NSGA-II and BWO algorithms, respectively. Moreover, a sensitivity analysis was conducted on the global parameters in which the surface runoff coefficient was the most sensitive parameter of the model.

Keywords: Black Widow Optimization Algorithm, NSGA-II Optimization Algorithm, Rainfall-runoff model, Calibration, WetSpa Hydrological Model

1- Ph.D. of Civil Engineering, Water Resources Expert, Golestan Regional Water Company, Gorgan, Iran
2- Assistant Professor of Civil Engineering Department, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.
(*****- Corresponding Author Email: sarraf@riau.ac.ir)