

واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa با استفاده از بهینه‌سازی چندهدفه‌ی PSO و NSGA-II

حسین قلخانی^۱، فرهاد هوشیاری پور^{۲*}، فرشاد کوهیان افضل^۲، مهیار شفیعی حسن آبادی^۴

چکیده

مدل‌های بارش-رواناب مفهومی از جمله ابزارهای ساده و در عین حال کارآمد در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی هستند. 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. مدل بارش-رواناب WetSpa از جمله مدل‌های توزیعی است که در بلژیک توسعه داده شده است. این مقاله قابلیت الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و جامعه‌ی ذرات را در واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa به منظور شبیه‌سازی بارش - رواناب حوضه‌ی کارون بزرگ ارائه می‌نماید. الگوریتم‌های بهینه‌سازی فوق به صورت چند هدفه برای واسنجی ۱۱ پارامتر سراسری مدل WetSpa استفاده شده‌اند. توابع هدف در نظر گرفته شده در این مقاله شامل دو شاخص نش-ساتکلیف و نش-ساتکلیف لگاریتمی هستند تا به وسیله آنها عملکرد مدل در پیش بینی دبی‌های حداکثری و حداقلی بهبود یابد. نتایج نشان دادند که هر دو الگوریتم NSGA-II و PSO به ترتیب با ضریب رگرسیون ۰/۶۹ و ۰/۷۱ عملکردهای مناسبی را در واسنجی مدل داشته‌اند. مقدار شاخص RMSE در دوره‌ی واسنجی نیز به طور متوسط برابر با ۱۱۹/۸ و ۱۵۲/۳ اندازه‌گیری شده است. پس از واسنجی و صحت سنجی مدل، از آن برای شبیه‌سازی سیلاب در یک دوره یک ساله در حوضه مذکور استفاده گردیده و قابلیت مدل ارزیابی شده است. همچنین، آنالیز حساسیت پارامترهای موثر نشان داد که ضریب رواناب سطحی با ۴۰٪ تاثیر بر مقدار دبی جریان، حساس‌ترین پارامتر سراسری مدل WetSpa بوده است.

واژه‌های کلیدی: مدل بارش رواناب؛ واسنجی؛ الگوریتم ژنتیک؛ جامعه‌ی ذرات؛ WetSpa

^۱ دفتر مطالعات پایه منابع آب، شرکت مدیریت منابع آب ایران، وزارت نیرو، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تلفن: ۲۱۴۴۸۶۵۱۵۴؛ Email: Hooshyarypor@gmail.com

^۳ پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، ایران

^۴ گروه علوم زمین و محیط زیست، دانشگاه واترلو، کانادا

مقدمه

سیلاب، رهیافتی جدید را برای مدل WetSpa توسعه دادند که بر مبنای سیستم اطلاعات جغرافیایی و روش انتقال پخشی^۳ استوار است. بر اساس تحلیل عدم قطعیت صورت گرفته در این مطالعه، پارامترهای فراوانی سیلاب و ضریب زبری کانال تأثیرگذارتر از آستانه‌ی حداقل شیب^۴ و آستانه‌ی سطح زهکش^۵ بودند. آذین مهر (۲۰۱۲) از WetSpa برای شبیه‌سازی بارش - رواناب در حوضه‌ی آبریز دینور در بالادست سد کرخه استفاده کرد. کبیر و بهره‌مند (۲۰۱۳) عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa را با استفاده از روش مونت کارلو در حوضه‌ی آبریز گرگانرود بررسی نمودند. نتایج نشان داد که فاکتور تصحیح تبخیر-تعرق بیشترین حساسیت و فاکتور آب زیرزمینی کمترین حساسیت را دارا بوده‌اند. صابرچناری و همکاران (۲۰۱۵) کارایی این مدل را در حوضه‌ی آرازکوسه در استان گلستان بررسی کرده و بیان نمودند که مدل از توانایی زیادی برای پیش‌بینی دبی پیک جریان برخوردار است.

به دلیل عدم قطعیت‌های زیاد پارامترهای هیدرولوژیکی، واسنجی مدل یکی از مهمترین بخش‌های مدل‌سازی محسوب می‌شود که در آن عمدتاً از تکنیک‌های بهینه‌سازی استفاده می‌گردد. روش‌های متعددی برای بهینه‌سازی، آنالیز حساسیت و همچنین بررسی عدم قطعیت مدل‌ها وجود دارد. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته‌ی کلی تقسیم کرد (Saltelli 2000): (۱) روش‌های سراسری و (۲) 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 پیدا کردن جواب بهینه، جستجوی محلی تا جایی ادامه می‌یابد که در همسایگی جواب به دست آمده، جواب بهتری وجود نداشته باشد (Van Griensven 2002). در این میان از نرم‌افزار بهینه‌سازی PEST^۵ (Doherty 2005) در مطالعه‌ی بارش - رواناب بسیار استفاده شده است (Bahremand and De Smedt 2008) (Bahremand et al. 2009; Safari et al. 2010). در سال ۲۰۰۷، بهره‌مند و همکاران (Bahremand et al. 2007) با استفاده از مدل WetSpa در روی حوضه‌ی

مدل بارش-رواناب WetSpa^۱ یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی است که در سال ۱۹۹۷ در دانشگاه آزاد بروکسل توسعه یافته (Wang et al., 1997) و در طرح‌های متعدد پژوهشی و اجرایی مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل قابلیت انجام شبیه‌سازی‌ها در سطح پیکسل دارا بوده و به همین دلیل، امکان استفاده از عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای را به همراه اطلاعات دقیق اندازه‌گیری شده در سطح حوضه که دارای توزیع مکانی هستند در اختیار کاربر قرار می‌دهد. بازه‌ی 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، الحاقیه‌ی مدل WetSpa (De Smedt et al. 2000) که یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی در محیط GIS است، برای شبیه‌سازی بیلان آب و تخمین سیلاب در مقیاس حوضه توسعه داده شد. 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 (Liu and De Smedt 2004). کاربرد این مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی سیلاب توسط محققان زیادی بررسی شده است. به عنوان مثال دی‌اسمت و همکاران (De Smedt et al. 2000) مدل اولیه WetSpa را برای یکی از حوضه‌های بلژیک توسعه داده و رواناب رودخانه را شبیه‌سازی نمودند. لیوو همکاران (Liu et al. 2002) و دی‌اسمت و همکاران (De Smedt et al. 2000) مدل WetSpa را در حوضه‌های لوکزامبورگ به کار بردند. 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. لیوو همکاران (Liu et al. 2003) به منظور مدل‌سازی بارش و روندیابی

³ threshold of minimum slope⁴ drainage area threshold⁵ parameter estimation software¹ water and energy transfer between soil, plants and atmosphere² diffusive

بهینه سازی چند هدفه است که در آن از تکنیک‌های الگوریتم ژنتیک³ (GA) و جامعه‌ی ذرات⁴ (PSO) استفاده خواهد شد. با این دید که برای دستیابی به یک پیش بینی قابل اعتماد، مدل باید بتواند علاوه بر دبی‌های معمول، دبی‌های زیاد و کم (از جمله حداکثری و حداقلی) را با دقت مناسب پیش بینی نماید، لذا توابع هدف به نحوی انتخاب می‌شوند که بتوان طی فرآیند واسنجی بهترین تطابق بین مقادیر مشاهداتی و مقادیر محاسباتی را به دست آورد. برخی توابع خطا به جریان‌های بالا وزن بیشتری می‌دهند در حالی که برخی دیگر اهمیت بیشتری را به جریان‌های پائین می‌دهند. لذا در این مقاله سعی شده است در فرمول‌بندی چندهدفه تعادلی بین این دو در نظر گرفته شود.

مواد و روش‌ها

مدل هیدرولوژیکی WetSpa

WetSpa یک مدل پیوسته مکانی و زمانی است و تمامی شبیه‌سازی‌ها در آن به صورت پیوسته صورت می‌گیرد. مدل WetSpa 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 مد نظر قرار می‌دهد. سیستم هیدرولوژیکی شبیه‌سازی شده توسط این مدل، متشکل از چهار لایه‌ی پوشش گیاهی، سطح خاک، منطقه‌ی ریشه، و سفره‌ی اشباع آب زیرزمینی است (شکل ۱).

مهمترین فرضیاتی که در استفاده از مدل بارش-رواناب WetSpa مد نظر قرار می‌گیرند عبارتند از: (۱) مشخصه‌های خاک، پوشش گیاهی و توزیع بارندگی برای یک سلول محاسباتی از نقطه نظر فیزیکی مشابه و همگن هستند، (۲) هنگامی که رطوبت خاک از رطوبت پژمردگی پایین‌تر باشد، از تبخیر-تعرق صرف نظر می‌شود، (۳) هنگامی که خاک خشک بوده و یا توسط میزان ذخیره آب زیرزمینی موثر محدود گردد، تبخیر-تعرق عمیق رخ خواهد داد، (۴) روش روندیابی تقریب موج پخشی برای

هورناد¹ کشور اسلواکی، به ارزیابی تأثیر احیای جنگل بر سیلاب رودخانه‌ها پرداختند. در این مطالعه ۱۱ پارامتر سراسری مدل با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی PEST واسنجی شد. نتایج مدل‌سازی نشان دادند که بین میزان پوشش جنگلی و کاهش دبی اوج رودخانه همبستگی بالایی وجود دارد. بهره‌مند و دی‌اسمت (Bahremand and De Smedt 2010) عدم قطعیت مدل WetSpa را بررسی نمودند. صفری و همکاران (Safari et al. 2009) با استفاده از داده‌های بارندگی رادار نسل بعدی²، نقشه‌های رقومی توپوگرافی، نوع خاک، کاربری اراضی و نرم افزار PEST، مدل WetSpa را برای چندین حوضه واسنجی نمودند. ایشان از معیارهای مختلفی مثل معیار اریب مدل، ضریب همبستگی اصلاح شده، و معیار کارآمدی نش برای واسنجی مدل استفاده کردند. نتایج به دست آمده در مطالعه نشان می‌دهند شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط مدل WetSpa در دوره‌ی واسنجی و نیز در دوره‌ی صحت سنجی رضایت بخش بوده است.

مطالعات نشان داده اند که روش‌های بهینه سازی محلی در تعیین سری پارامترهای بهینه‌ی مدل، ممکن است در دام نقاط بهینه‌ی محلی گرفتار شوند زیرا توابع هدف یک مسئله بهینه سازی می‌تواند غیر خطی بوده و دارای چندین نقطه‌ی بهینه‌ی محلی باشد (Bate and Campbel 2001). روش‌های بهینه سازی سراسری مانند الگوریتم ژنتیک این مشکل را رفع نموده اند و به همین دلیل امروزه این روش‌ها، توسعه بسیار زیادی یافته و کاربرد آنها در مسائل مهندسی افزایش یافته است (Feyen et al. 2008). در سه دهه‌ی گذشته گزارش‌های متعددی در زمینه‌ی واسنجی اتوماتیک بارش-رواناب با استفاده از روش‌های بهینه یابی سراسری ارائه شده اند (Duan et al. 1992; Kuczera 1997; Madsen 2000; Sorooshian and Dracup 1980; Yapo et al. 1998) که نشان دهنده‌ی قابلیت این روش‌ها در واسنجی مدل WetSpa بوده است.

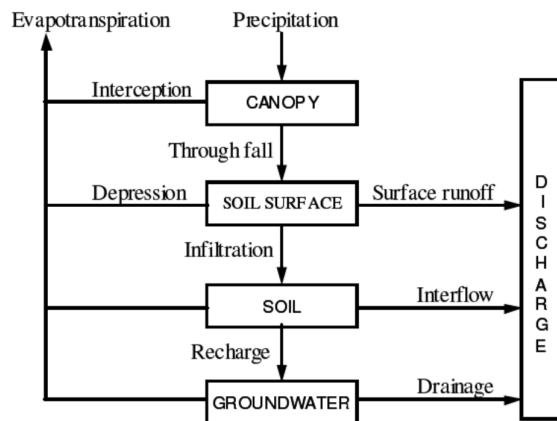
بر این اساس هدف مقاله‌ی حاضر واسنجی مدل هیدرولوژیکی WetSpa و تعیین مقدار بهینه‌ی پارامترهای مختلف آن با در نظر گرفتن بازه تغییرات آنها با رویکرد

³ genetic algorithm

⁴ particle swarm optimization

¹ hornad

² next generation radar



شکل ۱- ساختار مدل WetSpa در یک سلول محاسباتی

زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک از ظرفیت مزرعه بیشتر شده و گرادیان هیدرولیکی کافی برای حرکت آب موجود باشد. K_2 ضریب فروکش آب زیرزمینی است که در مدل WetSpa، ابتدا یک مقدار عمومی در نقطه‌ی خروجی حوضه تعیین می‌شود، سپس با همبستگی خطی بین نقطه‌ی 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 مولفه‌ی رطوبتی اولیه‌ی خاک یکی از المان‌های مهم در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که تاثیری مستقیم را 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 حوضه‌ی آبریز، رطوبت اولیه‌ی خاک از اهمیت کمتری برخوردار است. چون تنها بر مولفه‌های هیدرولوژیکی در ابتدای دوره شبیه‌سازی اثرگذار خواهد بود. یک راهکار حذف اثر رطوبت اولیه‌ی خاک، در نظر گرفتن بخشی از سری زمانی (مثلاً یک سال) در ابتدای دوره شبیه‌سازی به عنوان دوره‌ی warm up است که در این مقاله نیز در نظر گرفته شده است. K_4 ضریب اصلاحی تبخیر در واقع تاثیر کاربری اراضی، تراز و همچنین شرایط میکرو-هواشناسی شبکه‌ی سلول‌ها را در مقادیر تبخیر-تعرق

جریان دامنه و نیز جریان آبراهه استفاده می‌شود و (۵) جریان میان حوضه‌ای در حالی رخ می‌دهد که محتوای رطوبت خاک از ظرفیت مزرعه بیشتر باشد. این جریان با تقریب سینماتیک و از روی قانون داریسی برآورد می‌شود. الحاقیه‌ی مدل WetSpa در واقع همان مدل هیدرولوژیکی است که از قابلیت‌های GIS نیز در مدل‌سازی استفاده می‌کند. این مدل به منظور انجام کامل شبیه‌سازی‌ها نیاز به پارامترهای متفاوتی دارد که بیشتر آن‌ها یا با اندازه‌گیری‌های میدانی و یا به کمک معادلات تجربی به دست می‌آیند. جهت مدل‌سازی با WetSpa به نقشه‌ی 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^۱ 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 مولفه 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 الحاقیه‌ی مدل WetSpa، فرض بر این است که جریان دیواره‌ای

¹ global parameters

جدول ۱- پارامترهای سراسری مدل بارش-رواناب WetSpa

ردیف	پارامتر	واحد	عنوان پارامتر
۱	K ₁	[-]	جریان دیواره‌ای (inter flow scale factor)
۲	K ₂	[d ⁻¹]	ضریب فروکش آب زیرزمینی (groundwater recession coefficient)
۳	K ₃	[-]	مولفه‌ی رطوبتی اولیه‌ی خاک (initial soil moisture factor)
۴	K ₄	[-]	ضریب اصلاحی تبخیر (correction factor for PET)
۵	K ₅	[mm]	ضریب ذخیره‌ی اولیه‌ی آب زیرزمینی (initial groundwater storage)
۶	K ₆	[mm]	ظرفیت ذخیره‌ی آب زیرزمینی (groundwater storage scaling)
۷	K ₇	[°C]	دمای پایه‌ی ذوب برف (base temperature for snowmelt)
۸	K ₈	[mm/°C / day]	ضریب درجه-روز دما (Temperature degree-day coefficient)
۹	K ₉	[°C/day]	ضریب درجه-روز بارندگی (rainfall degree-day coefficient)
۱۰	K ₁₀	[-]	ضریب رواناب سطحی (surface runoff coefficient)
۱۱	K ₁₁	[mm]	آستانه‌ی حداکثر شدت بارش

برف را تعیین می‌کند. این ضریب برای محاسبه‌ی ذوب برف اضافی ناشی از بارش استفاده می‌شود. مقدار ضریب درجه-روز بارش بسیار پائین و در حدود ($mm / mm - °C - day$) 0.01 است. همچنین از آنجا که شدت بارندگی تاثیر بسزایی بر کنترل نسبت رواناب سطحی و تراوش دارد، در مدل WetSpa ضریب K₁₀ به عنوان ضریب رواناب سطحی در نظر گرفته می‌شود. بر مبنای مطالعات قبلی، مقدار این پارامتر حدوداً ۳ است (Liu and De Smedt 2004). در صورتی که 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 (Liu and De Smedt 2004). پارامتر K₁₁ بر اساس دقت زمانی شبیه‌سازی مدل، آستانه‌ی 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.

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

اندازه گیری شده نشان می‌دهد. 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 اختیار خواهد کرد. یکی دیگر از پارامترهای ورودی مدل WetSpa، K₅ یا ضریب ذخیره‌ی اولیه‌ی آب زیرزمینی در عمق و K₆ ظرفیت ذخیره‌ی آب زیرزمینی نیز پارامتری است که ارتباط مستقیم با رواناب حوضه دارد. حداکثر ظرفیت ذخیره‌ی پیشنهاد شده ۲۰۰۰ میلی‌متر و حداقل آن صفر در نظر گرفته می‌شود (Liu and De Smedt 2004). در صورتیکه دما از دمای پایه کمتر شود، بارش به صورت برف خواهد بود و هنگامی که 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 K₇ به نام دمای پایه‌ی ذوب برف در مدل در نظر گرفته شده است که بازه شدنی این پارامتر در محدوده‌ی [1 -1] است. بسته به شرایط ارتفاعی حوضه و فشار هوا، این پارامتر تغییرات جزئی خواهد داشت. محدوده‌ی تغییرات K₈ ضریب درجه-روز دما برای شرایط بدون بارش بین $1.8 °C - mm / day$ تا 3.7 در تغییر بوده و در زمان و مکان نیز متغیر است. K₉ 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

تاکید نموده‌اند. محققان دیگری نیز از روش‌های متفاوت واسنجی چند هدفه استفاده کرده‌اند (Boyle et al. 2000; Cheng et al. 2002; Seibert 2000; Vrugt et al. 2003; Yapo et al. 1998; Bahremand and De Smedt 2008). 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 مسئله واسنجی چندهدفه مدل‌های بارش-رواناب، در سالیان اخیر الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه^۱ نیز مورد استفاده محققان قرار گرفته‌اند (Boyle et al. 2000; Khu et al. 2005; Madsen 2000; Vrugt et al. 2003; Shafii and Smedt 2009). الگوریتم ژنتیک از جمله پرکاربردترین روش‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی شناخته می‌شود که توانایی حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه را نیز دارد. لذا در این مقاله از الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)^۲، که توسط دب و همکاران (Deb et al. 2002) توسعه داده شده، استفاده می‌شود. زیتلر و همکاران (Zitzler et al. 2000) نشان دادند که این الگوریتم در مسایل بهینه‌سازی چندهدفه مشابه و در مواردی به مراتب بهتر از روش‌های جستجوی دیگر شامل NPGA^۳ و SPEA^۴ رفتار می‌کند. در این الگوریتم، فرایند انتخاب در قسمت‌های مختلف مدل به گونه‌ای صورت می‌گیرد که منجر به دستیابی به رویه پارتو^۵ با توزیع منظم در فضای توابع هدف گردد. رویه پارتو چارچوبی است برای ارزیابی یک مجموعه جواب با خروجی‌های چند بعدی است که تنها برای شرایطی که یکی از جواب‌ها بهتر (یا حداقل به خوبی) سایر جواب‌ها است مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌دست آوردن رویه پارتو در NSGA II با اضافه شدن دو عملگر به الگوریتم ژنتیک تک هدفه معمولی انجام شده است (Deb et al. 2002):

- عملگری که یک معیار برتری (رتبه) بر اساس رتبه بندی نامغلوب به اعضای جمعیت اختصاص می‌دهد (۲)
- عملگری که تنوع جواب را در میان جواب‌های با رتبه برابر حفظ نگه می‌دارد. در یک مسئله حداقل سازی چند هدفه

دارند (Liu and De Smedt 2004) و از روی سوابق مطالعاتی بر روی حوضه‌های مشابه تعیین نمود. در WetSpa روندیابی جریان در کانال با استفاده از معادلات سنت ونانت انجام می‌گردد.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c_i \frac{\partial Q}{\partial x} - d_i \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

که در آن: Q : دبی جریان (m^3/s), t : زمان (s), x : مکان (m), $c_i = \frac{5}{3} u_i$: سرعت موج سینماتیک (m/s), $d_i = u_i R_i / (2 S_i)$: ضریب پخش (m^2/s), $u_i = \frac{1}{n_i} R_i^{2/3} S_i^{1/2}$: سرعت جریان (m/s), R : شعاع هیدرولیکی (m), S : شیب و n ضریب مانینگ ($s/m^{1/3}$) هستند (Liu and De Smedt 2004). ضریب زبری مانینگ کانال با روش درون‌یابی بین رتبه‌های مختلف آبراه‌ها (O) محاسبه می‌شود (معادله‌ی ۲).

$$= n_{r,max} - \left(\frac{O - O_{min}}{O_{max} - O_{min}} \right) (n_{r,max} - n_{r,min}) \quad (2)$$

که در آن: O_{min} و O_{max} به ترتیب کمترین و بیشترین رتبه‌ی آبراهه‌ها و $n_{r,max}$ و $n_{r,min}$ به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر ضریب زبری مانینگ متناظر با آبراهه با درجه‌ی O_{min} و O_{max} است. در نهایت، ضریب رواناب نیز با استفاده از کلیه‌ی اطلاعات موجود شامل توپوگرافی منطقه، پوشش گیاهی و بافت خاک تخمین زده شده و به صورت توزیعی به مدل وارد می‌گردد.

الگوریتم‌های بهینه‌سازی

با توجه به طبیعت فرایند واسنجی مدل‌های بارش-رواناب از نظر پیچیدگی فرآیند، اهمیت پیش بینی جریان‌ات حداقلی و حداکثری و تعداد و تنوع پارامترهای واسنجی، برخی محققان برای این کار از فرمول‌بندی چندهدفه استفاده کرده‌اند. گوپتا و همکاران (Gupta et al. 1998) برای اولین بار مزایای استفاده از رهیافت واسنجی چند هدفه، کاربرد، و مطلوبیت آن را بررسی و

⁴ strength pareto evolutionary algorithm

⁵ pareto front

¹ multi-objective evolutionary algorithms

² non-dominating sorting genetic algorithm

³ niched pareto genetic algorithm

اولیهی این الگوریتم توسط کندی و ابرهارت (Kennedy and Eberhart 1995) مطرح و توسعه یافت. از این جهت که PSO نیز با یک جمعیت تصادفی اولیه تحت عنوان ذرات شروع می‌شود، شبیه بسیاری دیگر از الگوریتم‌های تکاملی همچون الگوریتم ژنتیک پیوسته است. با این حال، برخلاف الگوریتم ژنتیک، PSO هیچ عملگر تکاملی همانند جهش و توزیع را ندارد. در این الگوریتم برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌گردد که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات، به صورت تکرار شونده ای حرکت می‌کنند تا با محاسبه‌ی مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بُعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه سازی است. یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت هر ذره در گذشته، و یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر تکرار، همه ذرات در فضای تصمیم مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری، پیدا شود. ذرات، سرعت و موقعیت‌شان را مطابق معادله‌های (۶) و (۷) بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به‌روز می‌کنند (Eberhart 1996).

$$v(t+1) = v(t) + b_1 r_1 (p_{best} - x(t)) + b_2 r_2 (g_{best} - x(t)) \quad (۶)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (۷)$$

که در آن: $v(t)$ و $v(t+1)$ به ترتیب سرعت قدیم و جدید ذره، p_{best} بهترین موقعیت ثبت شده ذره و g_{best} بهترین موقعیت ثبت شده در بین کل ذرات؛ r_1 و r_2 اعداد تصادفی مستقل بین صفر و یک با توزیع یکنواخت؛ و b_1 و b_2 فاکتورهای یادگیری (پارامتر ادراکی و پارامتر اجتماعی) هستند.

PSO به وفور در مطالعات منابع آب استفاده شده است: مثلاً استفاده از PSO در بهینه‌سازی ترتیب

گوییم X بر Y غالب است اگر و تنها اگر X از همه نظریه بر نقطه X برتری نداشته باشد و X حداقل از یک نظر بهتر از Y باشد (Lacomme et al. 2003):

$$\exists Y(X \text{ dominate } Y) \Leftrightarrow \forall i: f_i(X) \leq f_i(Y) \wedge \exists i: f_i(X) < f_i(Y) \quad (۳)$$

در این الگوریتم بر اساس تعداد مغلوب شدن یک نقطه نسبت به سایر نقاط، به هر جواب یک رتبه اختصاص داده می‌شود، و در پایان نقاطی که رتبه یک را دارا باشند به عنوان مجموعه جواب تشکیل دهنده رویه‌ی پارتو خواهند بود که در انتخاب جواب‌های نهایی از رویکرد حفظ تنوع استفاده می‌گردد؛ به این معنی که در حذف کردن چند عضو از یک مجموعه جواب سعی می‌شود طوری عمل گردد که در آن مجموعه، از هر بازه ای به طور منظم پاسخ وجود داشته باشد. برای این کار از مفهوم فاصله‌ی ازدحامی^۶ استفاده شده است. اگر d_i^1 و d_i^2 به ترتیب نسبت ناحیه مربوط به قلمرو نقطه i به کل ناحیه از تابع هدف اول و دوم باشند، آنگاه فاصله ازدحامی (CrD) برابر خواهد بود با (Deb et al. 2002):

$$CrD = d_i^1 + d_i^2 \quad (۴)$$

که در آن:

$$d_i^1 = \frac{|f_1^{i+1} - f_1^{i-1}|}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \text{ and } d_i^2 = \frac{|f_2^{i+1} - f_2^{i-1}|}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \quad (۵)$$

در این معادلات f_1^{i+1} و f_1^{i-1} مقدار تابع هدف اول به ترتیب در نقاط قبل و بعد از نقطه‌ی i ، f_2^{i+1} و f_2^{i-1} مقدار تابع هدف دوم به ترتیب در نقاط قبل و بعد از نقطه‌ی i ، f_1^{\max} و f_1^{\min} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر تابع هدف اول در رویه‌ی پارتو و f_2^{\max} و f_2^{\min} به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر تابع هدف دوم در رویه‌ی پارتو هستند. یکی دیگر از روش‌های بهینه‌سازی که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد، الگوریتم جامعه ذرات^۷ (PSO) نام دارد که به الگوریتم پرندگان نیز معروف است. ایده‌ی

⁷ particle swarm optimization

⁶ crowding distance

ایشان استفاده می‌شود. در این روش به توابع هدف وزن‌های مختلفی داده می‌شود؛ به‌طوری‌که جمع وزن‌ها برابر با یک باشد. در اجرای اول وزن تابع اول برابر با یک و وزن تابع دوم برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. در عمل، این مرحله تنها تابع هدف اول را بهینه می‌کند؛ لذا این اجرا منتهی به یک جواب بهینه خواهد شد. در اجرای دوم، وزن تابع اول به ۰٫۹۵ کاهش، و وزن تابع دوم به ۰٫۰۵ افزایش می‌یابد. این اجرا نیز به یک جواب منتهی می‌شود، که به جواب بهینه‌ی قبل می‌پیوندد. در ادامه، مدل با وزن‌های مختلف دیگر نیز اجرا می‌گردد و هر بار جواب بهینه به‌دست آمده به مجموعه جواب‌های بهینه اضافه می‌گردد. با این توصیف، در آخرین اجرا وزن تابع هدف اول صفر، و وزن تابع هدف دوم برابر با یک در نظر گرفته می‌شود؛ لذا تنها تابع هدف دوم مورد ارزیابی قرار گرفته و جواب به‌دست آمده به عنوان آخرین جواب بهینه به مجموعه جواب‌های بهینه می‌پیوندد.

توابع هدف و ارزیابی مدل

در مقاله‌ی حاضر به منظور ارزیابی مدل از پنج شاخص آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه‌ی متوسط مربعات خطا (RMSE)، متوسط قدرمطلق خطا (MAE)، شاخص نش-ساتکلiffe (Nash-Sutcliffe) و نش-ساتکلiffe لگاریتمی استفاده شده است:

$$r = \frac{\overline{Q_s Q_o} - \overline{Q_s} \overline{Q_o}}{\sqrt{(\overline{Q_o^2} - \overline{Q_o}^2) - (\overline{Q_s^2} - \overline{Q_s}^2)}} \quad (8) \text{ معادله}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{N}} \quad (9) \text{ معادله}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{s_i} - Q_{o_i}|}{N} \quad (10) \text{ معادله}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \overline{Q_o})^2} \quad (11) \text{ معادله}$$

$$NS - Log = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{s_i}) - \ln(Q_{o_i}))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(Q_{o_i}) - \ln(\overline{Q_o}))^2} \quad (12) \text{ معادله}$$

دستگاه‌های هیدرولوژیکی در سیستم خط لوله (Jung and Karney 2006)؛ آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین تراز سطح آب (Chau 2007)؛ بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های چندمخزنی (Kumar and Reddy 2007). ژنگ و همکاران (Zhang et al. 2008) پنج الگوریتم بهینه‌سازی شامل PSO، GA، SCE⁸، DE و AIS⁹ را برای واسنجی مدل SWAT استفاده کردند. بر طبق نتایج به‌دست آمده از آن تحقیق، هنگامی که مدل SWAT بیش از ۲۰۰۰ بار اجرا شود، بهترین جواب در میان پنج روش استفاده شده توسط الگوریتم ژنتیک ارایه می‌نماید. اگر محدودیت‌های زمان محاسبه وجود داشته و مدل کمتر از ۲۰۰۰ بار اجرا شود، PSO بهترین جواب را ارائه داده است. بنابراین، به نظر می‌رسد که استفاده از این دو الگوریتم در واسنجی مدل‌های بارش-رواناب توجیه پذیر است.

نسخه‌ی چندهدفه الگوریتم PSO نیز توسط جیل و همکاران (Gill et al. 2006) برای واسنجی مدل مفهومی بارش-رواناب Sacramento Soil Moisture Accounting Model استفاده شده و نتایج به‌دست آمده نشان دهنده‌ی قابلیت بالای الگوریتم PSO بوده است. هیو و ابرهات (Hu and Eberhart 2002) الگوریتم همسایگی پویای¹⁰ PSO را طراحی کردند که در آن علاوه بر برازندگی هر ذره (مقدار آن در تابع هدف)، نزدیکی آن به ذرات مجاور نیز محاسبه می‌شود. به این ترتیب، وقتی ذره‌ای در فضا حرکت می‌کند، با پدیدار شدن رویه پارتو، ذرات مجاور آن نیز تغییر می‌کنند. یکی دیگر از روش‌های ارزیابی هر ذره در توابع هدف، استفاده از جمع وزنی توابع هدف است که توسط بامگارتنر و همکاران (Baumgartner et al. 2004) صورت گرفت. در این روش، نکویی هر ذره از روی جمع وزنی چند تابع هدف تعیین می‌شود. بدین ترتیب، برای ارزیابی هر ذره، توابع هدف در قالب جمع وزنی به یک تابع تبدیل می‌شوند، و در نتیجه می‌توان از ساختار الگوریتم تک‌هدفه‌ی PSO در حل مسائل چندهدفه بهره جست.

سیرا و کوئلو کوئلو (Sierra and Coello Coello 2005) نیز روش دیگری را برای حل مسائل چندهدفه با PSO ارائه کردند که در مقاله‌ی حاضر از روش پیشنهادی

¹⁰ dynamic neighborhood strategy

⁸ differential evaluation

⁹ artificial immune systems

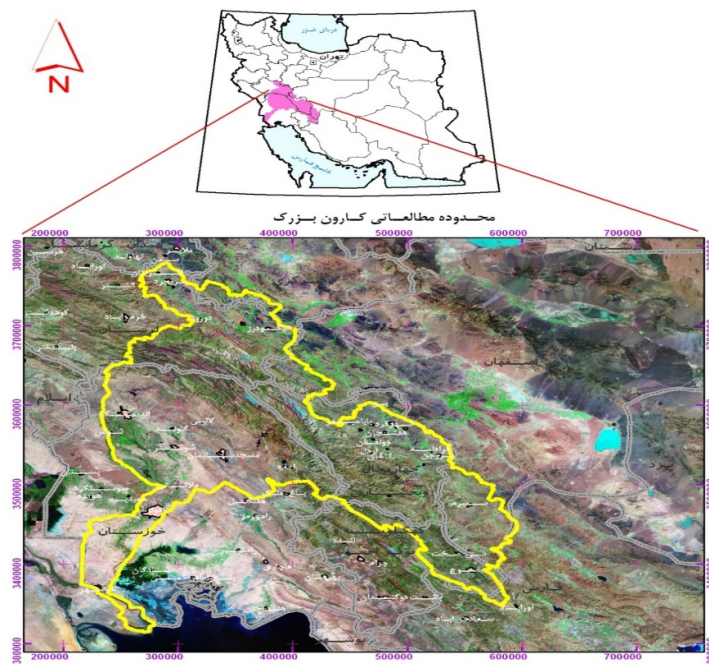
شده و سپس معیار NS را بر روی آنها اعمال شود (معادله ی ۱۲)، وزن بیشتری به جریان های پایین داده خواهد شد؛ زیرا در این حالت، به دلیل استفاده از تابع لگاریتم، بزرگی مقدار دبی های بالا در مقایسه با دبی های کم بسیار کاهش یافته و بنابراین مقدار خطای مدل در پیش بینی دبی های بالا تعدیل می گردد.

حوضه مطالعاتی کارون و داده های مدل

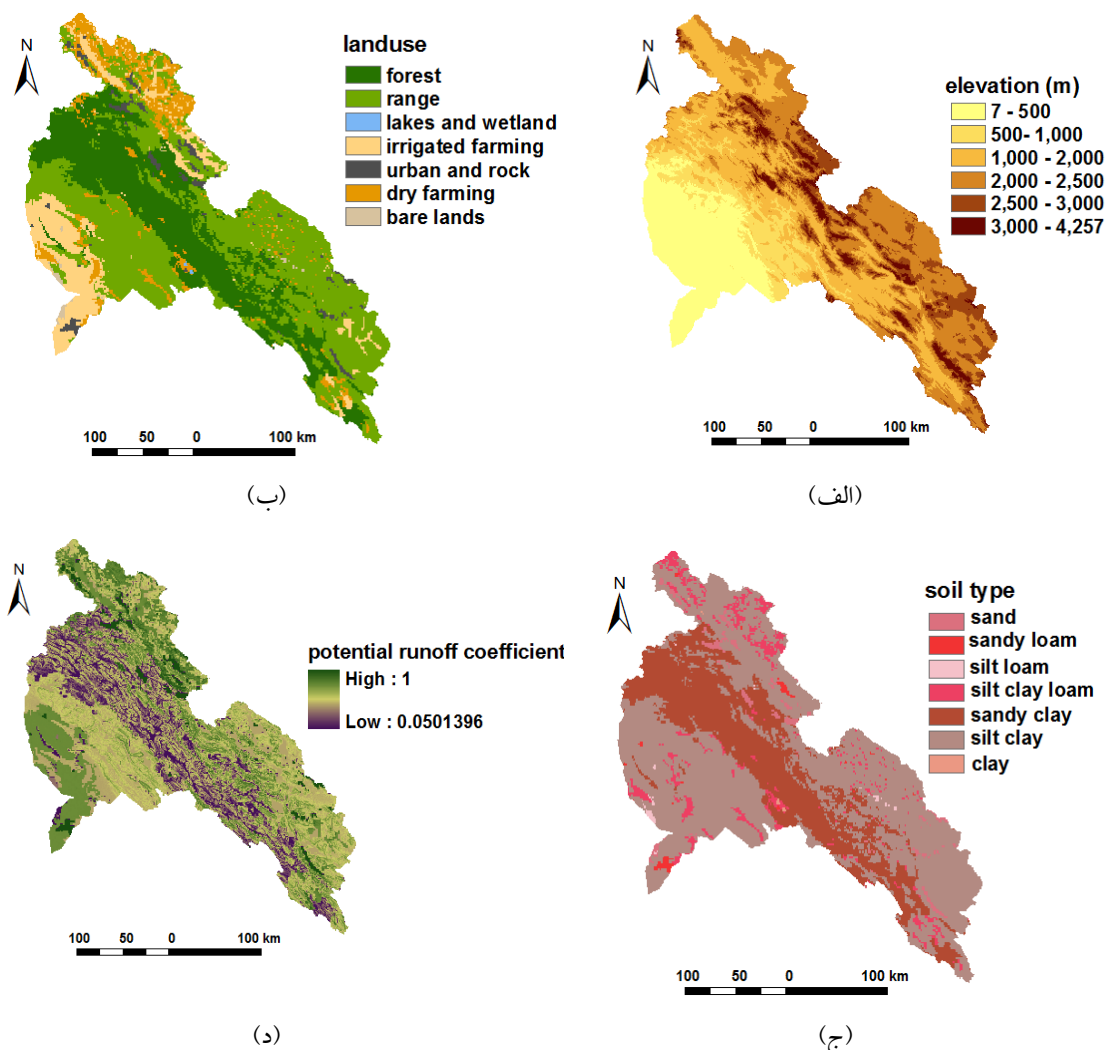
حوضه ی آبریز کارون بزرگ از دو زیر حوضه ی رودخانه های کارون و دز که مستقل از هم هستند تشکیل شده است (شکل ۲). از نظر تقسیم بندی هیدرولیک، حوضه ی آبریز کارون بخشی از حوضه ی آبریز خلیج فارس است. این حوضه با مساحت ۶۷۲۵۷ کیلومتر مربع متشکل از رودخانه های دز و کارون بوده که در ارتفاعات زاگرس میانی قرار داشته و محدود به مشخصات جغرافیایی ۴۸-۰۰ و ۵۲-۳۰ درجه طول شرقی و ۳۰-۰۰ و ۳۴-۰۵ درجه عرض شمالی هستند. ۶۷ درصد مساحت حوضه ی کارون بزرگ را کوهستان و ۳۳ درصد آن را دشت و کوهپایه تشکیل می دهد.

که در آنها Q_s و Q_o به ترتیب دبی شبیه سازی شده و مشاهداتی (m^3/s) ، \bar{Q}_s و \bar{Q}_o به ترتیب متوسط مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی (m^3/s) و N تعداد داده ها در دوره شبیه سازی است.

لازم به توضیح است که در این مقاله به منظور واسنجی مدل WetSpa در حوضه ی کارون از الگوریتم های تکاملی ژنتیک و جامعه ی ذرات استفاده می شود که در این فرآیند یک مسئله بهینه سازی چند هدفه به منظور بهینه کردن توابع هدف واسنجی بین خروجی های محاسباتی و مشاهدات حل می گردد. به منظور افزایش دقت مدل در پیش بینی جریان های حداقلی و حداکثری، از دو معیار نش-سوتکلیف و نش-سوتکلیف لگاریتمی (معادله های ۱۱ و ۱۲) استفاده خواهد شد. در این صورت، توابع هدف کیفیت هیدروگراف تولیدی توسط مدل WetSpa را به نسبت هیدروگراف مشاهداتی ارزیابی می کند. از آنجا که در روش نش-سوتکلیف مقادیر خطا با توان دو ارزیابی می شود، لذا خطاهای بزرگ که در پیش بینی جریانات بالا ایجاد می گردد، بزرگ تر شده و تاثیر بیشتری را در واسنجی مدل خواهند داشت؛ لذا، معیار نش-سوتکلیف وزن بیشتری را به جریان های بالا می دهد، در صورتی که ابتدا دبی ها به مقیاس لگاریتمی انتقال داده



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوضه ی آبریز کارون بزرگ در کشور



شکل ۳- الف) مدل تراز رقمی و طبقات ارتفاعی، ب) نقشه کاربری اراضی، ج) بافت‌های خاک و د) ضریب رواناب حوضه‌ی کارون

و با گام زمانی روزانه جمع‌آوری گردید. از داده‌های دما در ۱۷ ایستگاه دماسنجی به صورت پیوسته و با گام زمانی روزانه مورد استفاده شد. داده‌های تبخیر تنها در دو ایستگاه دو گنبدان و یاسوج ثبت شده بود که برای تکمیل آنها از روش هارگریوز-سامانی استفاده گردید و آمار ۸ ایستگاه تبخیر سنجی نیز فراهم شد. روش هارگریوز - سامانی روشی ساده است که به داده‌های اندکی نیاز دارد؛ به همین دلیل استفاده از آن در پروژه‌های منابع آب در مناطق با محدودیت آمار متداول است. این روش دمایی بوده و در آن عواملی چون رطوبت نسبی، باد و مدت و شدت تابش آفتاب دیده نشده است

مدل WetSpa مدلی توزیعی بوده و تمامی پارامترهای ثابت آن که نیاز به واسنجی ندارند نیز توزیعی هستند. به این ترتیب، تمامی پارامترها در موقعیت‌های مختلف روی حوضه‌ی آبریز مقادیر مختلفی خواهند داشت برای این کار، با انتخاب آستانه‌ی سلولی ۱۰۰ برای تعیین زیر حوضه‌ها، تعداد ۱۲۵۷ زیر حوضه به دست آمد که کلیه‌ی شبیه‌سازی‌ها در این ۱۲۵۷ زیر حوضه انجام شد. اطلاعات هیدرولوژیک حوضه و هیدرولیک آبراهه از دیگر پارامترهایی هستند که باید به مدل WetSpa وارد شوند. بدین منظور، آمار بارندگی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۸ در ۳۵ ایستگاه باران سنجی داخل حوضه به صورت پیوسته

وزن بیشتری می‌دهند، در حالی که برخی دیگر اهمیت بیشتری را برای جریان‌های پایین قائلند. لذا در این مقاله سعی شده است در فرمول‌بندی چندهدفه تعادل بین این دو در نظر گرفته شود؛ در این راستا از معیار NS-Log ساتکلیف (NS) و صورت لگاریتمی آن (NS-Log) استفاده گردیده است.

در این مقاله نتایج به‌دست آمده بر اساس این دو تابع ارائه خواهند شد. پس از تعیین تمامی شبکه‌های مکانی لازم در مدل سازی حوضه، اطلاعات بارش، تبخیر، دما، و دبی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۷ برای واسنجی مدل، و اطلاعات سال ۲۰۰۸ برای صحت‌سنجی نتایج استفاده شدند. به منظور تعیین محدوده‌ی اولیه پارامترها، از اطلاعات موجود در منطقه و مقادیر پیشنهادی در راهنمای مدل استفاده گردید؛ محدوده‌ی اولیه‌ی پارامترها مطابق جدول ۲ تعیین شدند.

(شریفان و همکاران ۲۰۱۲). در این مقاله ضریب زبری مانینگ متوسط برای حوضه برابر با $0.36 \text{ s/m}^{1/3}$ برآورد شده است. در نهایت ضریب رواناب نیز با استفاده از کلیه‌ی اطلاعات موجود مطابق شکل ۳-د تقریب زده شده است.

نتایج و بحث

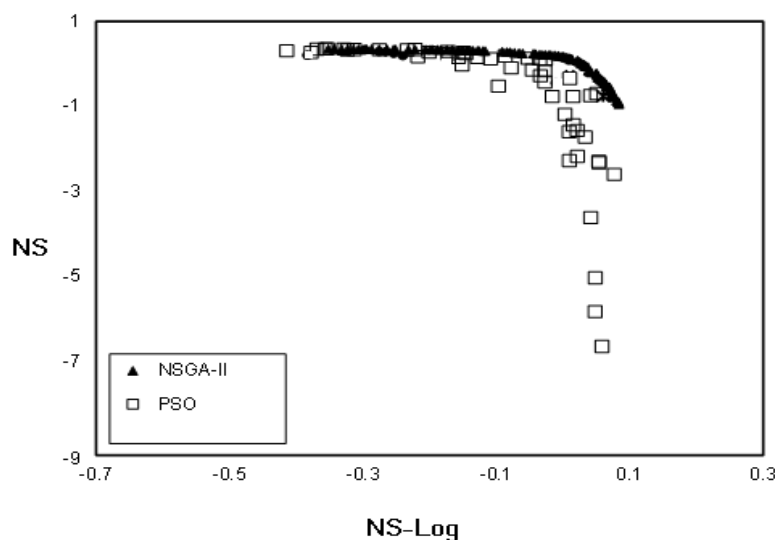
در این بخش از مقاله نتایج واسنجی مدل WetSpa با استفاده از الگوریتم‌های NSGA-II و PSO ارائه گردیده اند. لازم به ذکر است که کدهای مسئله در نرم افزار متلب تهیه شده است. متغیرهای تصمیم مسئله، پارامترهای سراسری ۱۱ گانه ارائه شده در جدول ۱ هستند. توابع هدف باید به نحوی انتخاب شوند که در انتهای فرآیند واسنجی بتوان بهترین تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسباتی را به‌دست آورد. برخی توابع به جریان‌های بالا

جدول ۲- محدوده‌ی اولیه‌ی پارامترها در واسنجی مدل WetSpa در حوضه‌ی کارون

پارامتر	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	K ₆	K ₇	K ₈	K ₉	K ₁₀	K ₁₁
حداقل	0	6e-7	1	0	400	1900	0.75	0	1e-6	4	400
حداکثر	1	9e-7	1.3	2	600	2100	1	0.5	5e-5	6	560

با ۱۰۰۰۰ است. بعد از انجام فرایند واسنجی، بهترین مقادیر دو تابع هدف (یعنی معیارهای NS و NS-Log) در دوره‌ی زمانی واسنجی در شکل ۴ نشان داده شده اند.

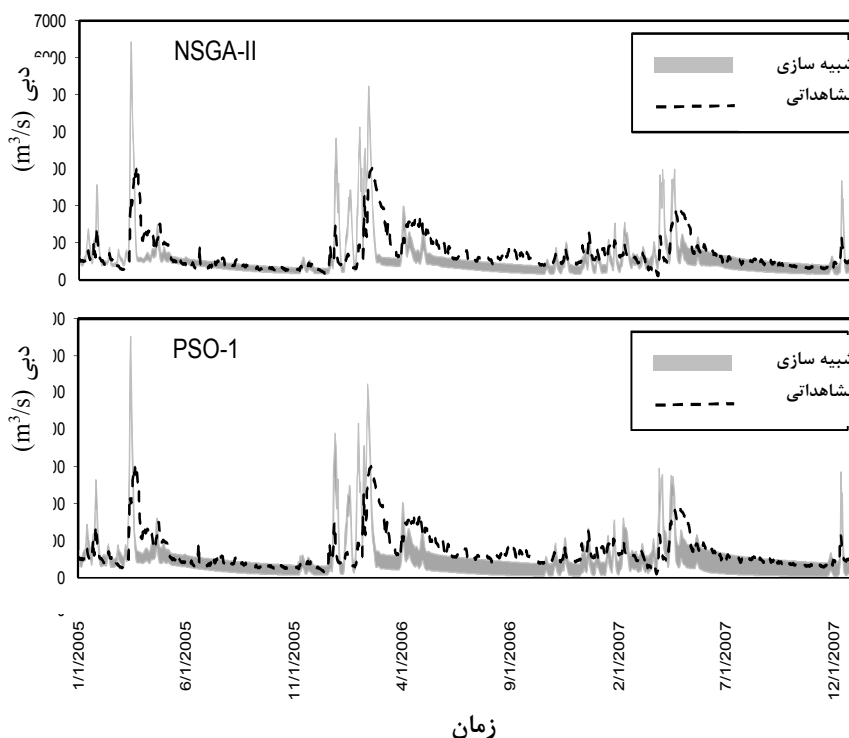
هر کدام از الگوریتم‌های بهینه سازی با اندازه‌ی جمعیت اولیه ۱۰۰ و در طول ۱۰۰ نسل (تعداد دفعات اجرای مدل بهینه سازی) اجرا شد؛ در نتیجه، تعداد کل شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در هر اجرا از الگوریتم برابر



شکل ۴- رویه‌ی پارتوی به‌دست آمده توسط الگوریتم‌های NSGA-II و PSO در دوره‌ی زمانی واسنجی

II و PSO به‌دست 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 مجموعه‌ی نقاط رویه پارتو، محاسبه شده و فاصله آنها به صورت یک باند در شکل ۵ ارائه شده است. لازم به توضیح است که هر نقطه از رویه پارتو متناظر با یک سری از متغیرهای تصمیم مسئله (۱۱ پارامتر سراسری مدل WetSpa) و یک مقدار دبی جریان در خروجی حوضه است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود عرض باند هیدروگراف به‌دست آمده از الگوریتم NSGA-II تا اندازه‌ای کمتر از عرض باند هیدروگراف PSO است. دلیل این مسئله به طور مشخص در کیفیت جستجو و پارامتریابی این دو الگوریتم بوده و نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-II در حل مسئله واسنجی مدل WetSpa در حوضه‌ی کارون بزرگ نسبت به الگوریتم PSO به گونه‌ای متفاوت رفتار می‌کند.

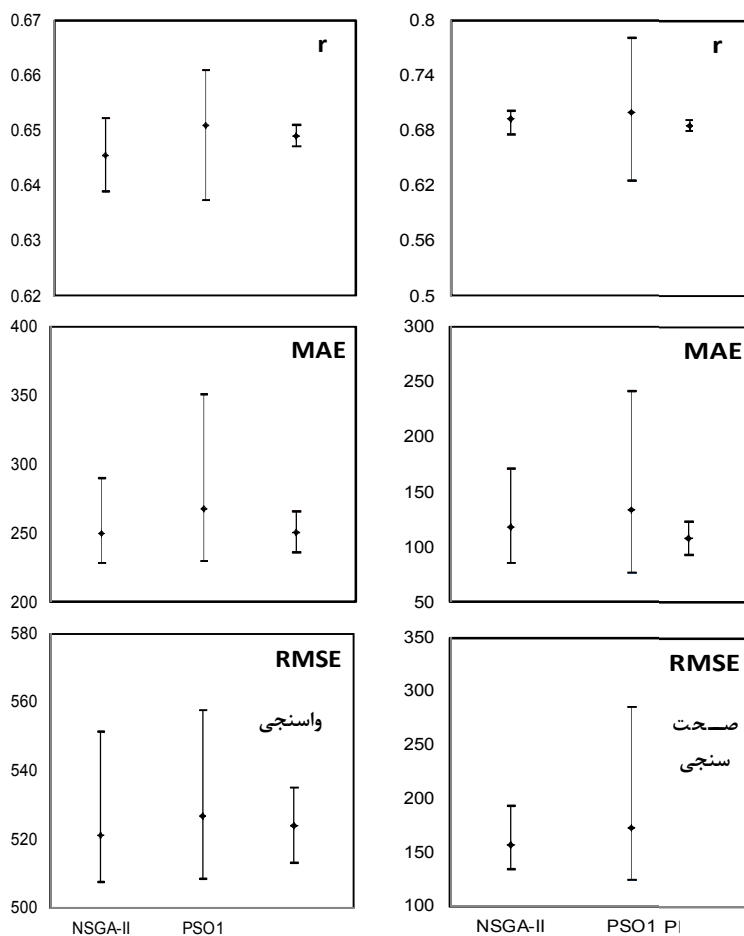
ملاحظه می‌شود که جواب‌های به‌دست آمده توسط NSGA-II بهتر از جواب‌های PSO هستند؛ زیرا مقادیر NS آن بالاتر است. مطابق نتایج به‌دست آمده، مقادیر NS عموماً بین ۰٫۵- و ۰٫۱، و مقادیر NS-Log بین ۷- و ۰٫۳۵ هستند. این مسئله نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی دبی‌های پایین موفق‌تر بوده است. هیدروگراف‌های خروجی به‌دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه کارون بزرگ در شکل ۵ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر دبی در این شکل مربوط به سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ است و از ارائه نتایج دبی جریان در سال ۲۰۰۴ صرف‌نظر شده است. در واقع، با توجه به اینکه مدل به صورت پیوسته اجرا گردیده، نتایج شبیه‌سازی در سال ۲۰۰۴ به عنوان دوره warm up منظور شده است. در این شکل، محدوده‌ی هیدروگراف‌های خروجی متناظر با جواب‌های بهینه موجود روی رویه‌ی پارتو که توسط الگوریتم‌های NSGA-



شکل ۵- هیدروگراف‌های خروجی به‌دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه‌ی کارون برای دوره‌ی واسنجی

می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، روش NSGA-II برای کلیه آماره‌های بررسی شده در مقایسه با روش PSO از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. این

شکل ۶ مقادیر به‌دست آمده برای معیارهای ضریب همبستگی، متوسط قدر مطلق خطا، و ریشه‌ی متوسط مربعات خطا را برای دو الگوریتم استفاده شده نشان

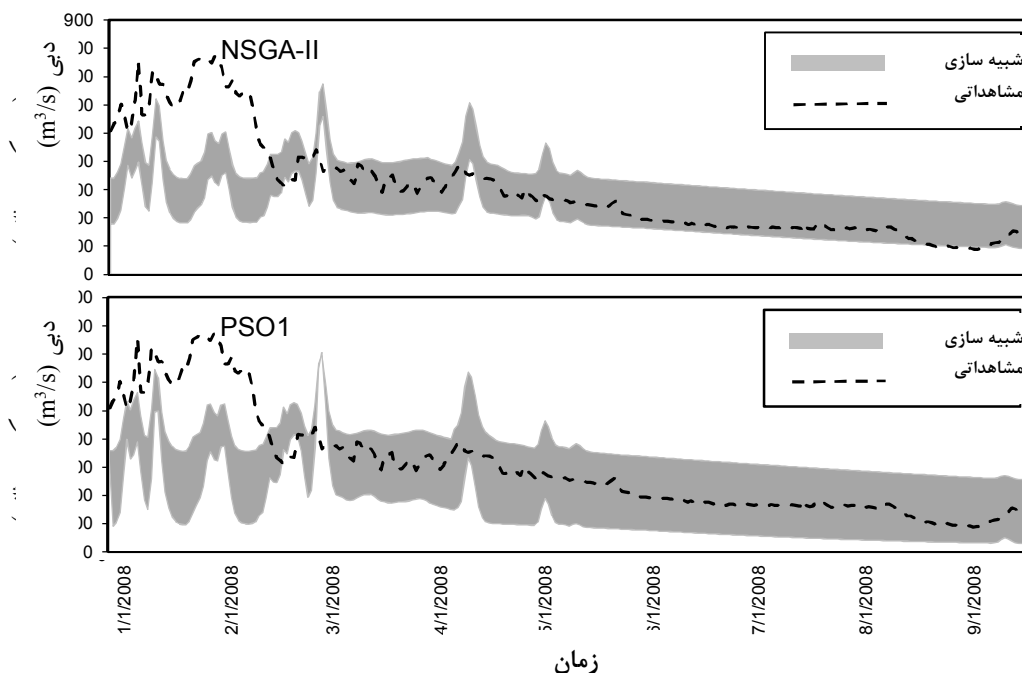


شکل ۶- مقادیر حداقل، حداکثر، و متوسط به دست آمده برای معیارهای سنجش کیفیت شبیه سازی ها در واسنجی مدل WetSpa با الگوریتم های مختلف (اشکال سمت چپ و راست به ترتیب مربوط به دوره واسنجی و صحت سنجی هستند)

۶ بعضاً کیفیت نتایج به دست آمده در دوره ی صحت سنجی بهتر از دوره ی واسنجی بود، لیکن در بین پاسخ های شکل ۷، جواب هایی نیز یافت می شود که از کیفیت مناسبی برخوردار نیستند؛ از جمله، دبی های حداکثر که در برخی موارد خارج از باند قرار گرفته اند. نتایج نشان می دهند که مدل، وقوع سیلاب ها (مخصوصاً در ابتدای دوره) را پیش بینی نموده است، ولی دقت پیش بینی در برخی زمان ها چندان رضایت بخش نیست. البته در مرحله ی واسنجی و صحت سنجی نیز اختلاف مقادیر دبی پیش بینی و مشاهداتی حتی در انتهای دوره (ماه های آخر سال ۲۰۰۷) به همین صورت وجود دارد، لکن به دلیل مقیاس گراف و محدوده ی تغییرات دبی روی محور قائم، این اختلافات کمتر دیده می شود؛ به جز در سه

الگوریتم جزء روش های مناسب برای حل مسائل چندهدفه است که در این مثال نیز از کارایی بالایی برخوردار بوده است.

هیدروگراف های خروجی شبیه سازی شده متناظر با الگوریتم های NSGA-II و PSO برای سال ۲۰۰۸ از دوره ی صحت سنجی در شکل ۷ نشان داده شده اند. همان طور که ملاحظه می شود، باند دبی شبیه سازی تا حد قابل ملاحظه ای عریض شده است. مقایسه نتایج حاکی از آن است که پهنای باند نتایج PSO از نتایج NSGA-II بیشتر است و همین مسئله باعث شده است که اکثر مقادیر مشاهداتی در باند نتایج قرار گیرند در حالی که نتایج NSGA-II در برخی زمان ها پوشش دهنده مقادیر مشاهداتی دبی جریان نیستند. اگرچه مطابق شکل



شکل ۷- هیدروگراف‌های خروجی به‌دست آمده از واسنجی مدل WetSpa در حوضه‌ی کارون برای دوره‌ی صحت‌سنجی (سال ۲۰۰۸)

در جدول ۳ حدهای مجاز تغییرات و مقادیر به‌دست آمده در فرآیند واسنجی یازده پارامتر سراسری مدل WetSpa با استفاده از الگوریتم NSGAII آمده‌اند.

ماه ابتدای دوره‌ی شبیه‌سازی، که کمی اختلاف بین نتایج وجود دارد، در مابقی دوره نتایج قابل قبول و رضایت بخش هستند.

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

پارامترشرح	K_{11}	K_{10}	K_9	K_8	K_7	K_6	K_5	K_4	K_3	K_2	K_1
min	401	4.01	1e-6	0.01	0.750	1906	400.5	0.010	1.00	6e-7	0.012
Max	558	5.93	5e-5	0.499	1.0	2100	592	2.00	1.29	9e-7	1.0
مقدار	454	5.631	1.6e-5	0.01	0.99	1992	525	1.814	1.21	6.63e-7	0.1666

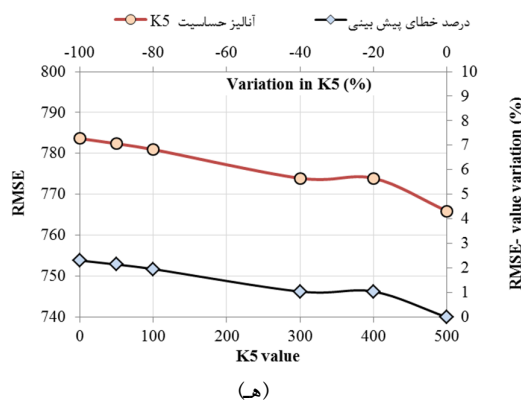
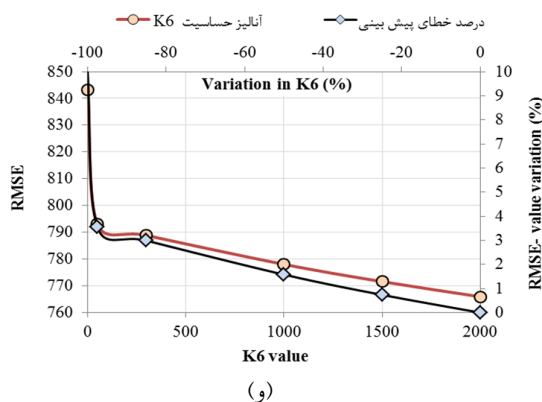
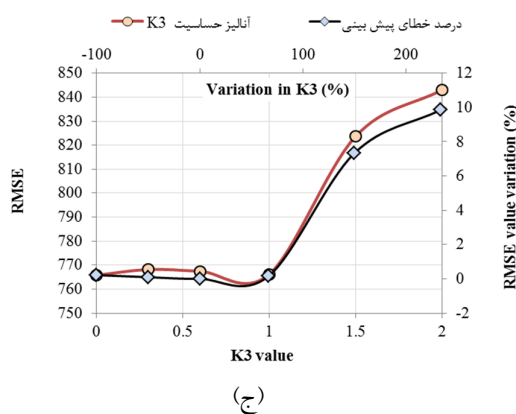
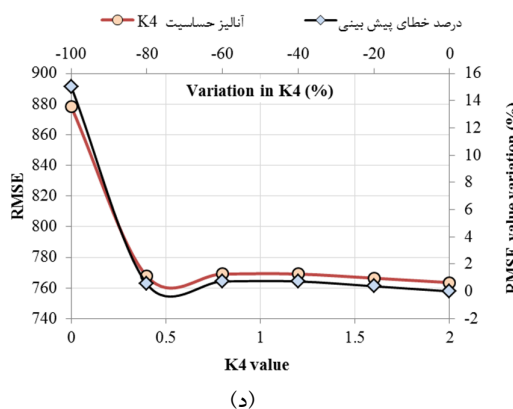
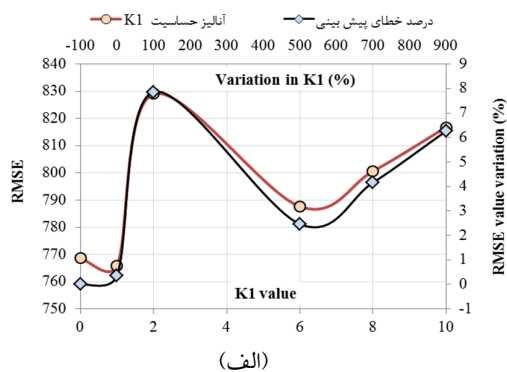
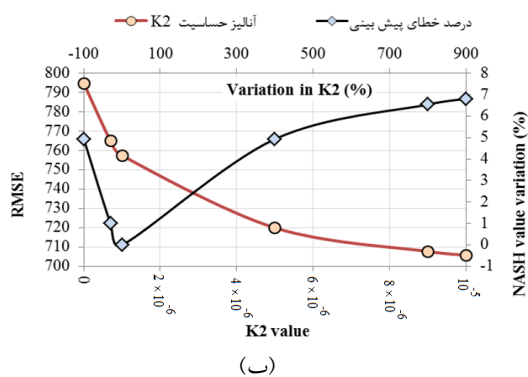
نشان داده شده است. به‌علاوه در هر یک از اشکال تغییرات به صورت درصدی نیز نشان داده شده است. به عنوان مثال شکل ۸-الف، آنالیز حساسیت پارامتر K_1 جریان دیواره‌ای را در مدل WetSpa نشان می‌دهد. محدوده‌ی ممکن این پارامتر در بازه‌ی [0 10] و محدوده‌ی جواب‌های رویه‌ی پارتو بین [0.012 1] برآورد شده است. در شکل ۸ منحنی‌هایی که با نشان • آمده‌اند، معرف خطای مدل (محور قائم در سمت چپ) در مقابل مقدار K_1 (محور افقی پایین) هستند که با منحنی قرمز نشان داده شده است. منحنی‌هایی که با نشان ■ آمده

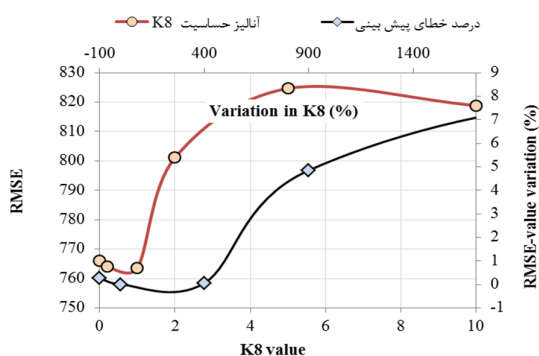
آنالیز حساسیت مدل‌ها

به منظور آنالیز حساسیت، ابتدا مدل با توجه به داده‌های جدول ۳ تنظیم گردید و با تغییر هر یک از پارامترها در بازه‌ی 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 NASH-HF و RMSE در نظر گرفته شدند. در این تحلیل ارزیابی خطا به ازای کل داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی انجام شده است. در شکل ۸ نحوه‌ی تغییرات RMSE به ازای تغییر پارامترهای مدل

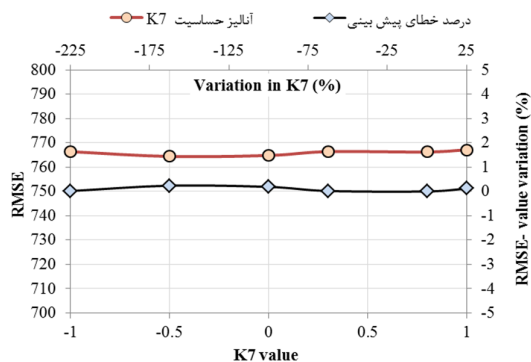
سازی حوضه‌ی کارون نداشته است به طوری که با ۵ برابر شدن مقدار K_1 ، تغییرات RMSE از ۱۰٪ فراتر نرفته است. با توجه به منحنی شکل ۸-الف، با افزایش مقدار K_1 از صفر تا دو، خطا حدود ۸٪ افزایش می‌یابد و به مقدار حداکثر خود نزدیک می‌شود و بالعکس، با افزایش مقدار K_1 از دو تا ۶، خطا کاهش می‌یابد تا اینکه در نهایت به ازای $K_1=8$ به دو درصد کاهش می‌یابد.

اند، معرف حساسیت مدل نسبت به تغییر پارامتر K_1 هستند به طوری که درصد افزایش یا کاهش RMSE (محور قائم سمت راست) نسبت به درصد تغییرات K_1 (محور افقی بالا) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که خطاهای نسبی (درصد تغییرات RMSE) با توجه به پیش بینی دبی جریان به ازای مقادیر بهینه ۱۱ پارامتر سراسری مدل سنجیده شده اند. نتایج شکل ۸-الف نشان می‌دهد که افزایش پارامتر K_1 تأثیر زیادی در نتایج شبیه

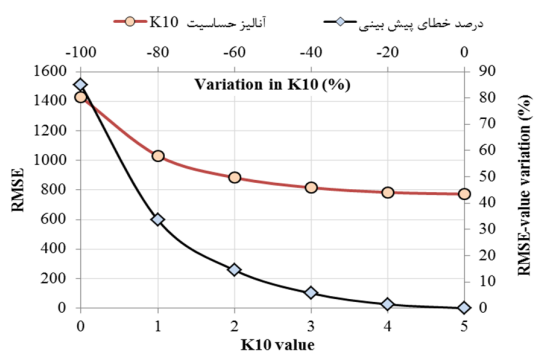




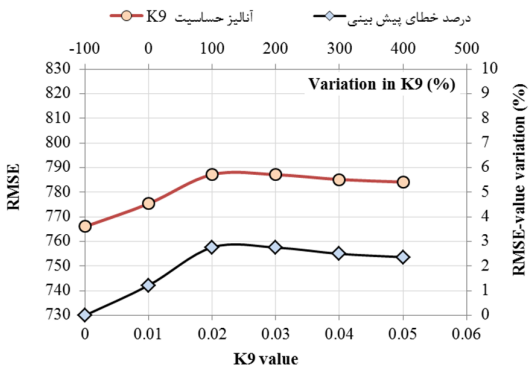
(ح)



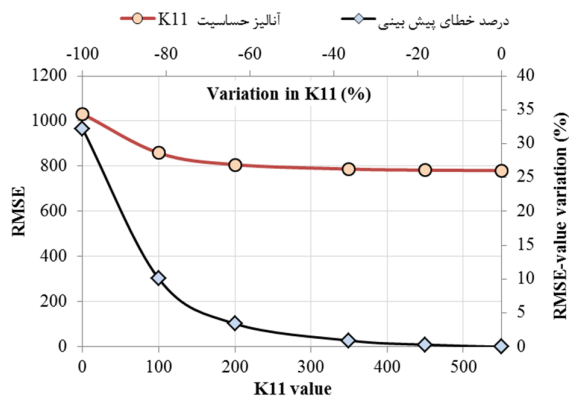
(ز)



(ی)



(ط)



(ک)

شکل ۸- آنالیز حساسیت مدل WetSpa نسبت به پارامترهای سراسری یازده گانه

صفر را تولید کند. بهترین جواب در همسایگی بسیار کوچکی از $4.4E-5$ است. مطابق شکل ۸-ج، مقدار بهینه‌ی K_3 مولفه رطوبتی اولیه‌ی خاک حدود 0.7 است. محدوده‌ی جواب‌های رویه پارتو برابر محدوده‌ی شدنی این پارامتر در بازه‌ی [0 2] است.

ضریب فروکش آب زیرزمینی به عنوان دومین پارامتر سراسری مدل، اهمیت زیادی در حوضه‌ی کارون دارد. محدوده‌ی شدنی این پارامتر در بازه‌ی [0 0.05] و محدوده‌ی جواب‌های رویه پارتو بین $[4E-5 7E-7]$ است. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد، افزایش این پارامتر منجر به بالارفتن مقدار دبی پایه‌ی رودخانه و افزایش خطای RMSE تا ۷٪ می‌گردد. در حوضه‌ی کارون، مدل به تغییرات این پارامتر بسیار حساس بوده و می‌تواند دبی

استفاده شد. نتایج به دست آمده از کاربرد مدل در این حوضه نشان دهنده قابلیت رضایت بخش این الگوریتم‌ها در واسنجی مدل WetSpa است. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از الگوریتم NSGA-II و PSO نشان داد که در مسئله‌ی واسنجی چندهدفه، الگوریتم NSGA-II اندکی موفق‌تر از مدل PSO عمل نموده است. ضعف مدل توسعه داده شده در پیش بینی برخی سیلاب‌ها، می‌تواند ناشی از محدودیت داده‌های استفاده شده در حوضه‌ی پهناور کارون باشد؛ لذا افزایش طول دوره‌ی شبیه سازی 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 هیدرولوژیک در شرایط سیلابی در حوضه‌ی کارون بزرگ دانست؛ زیرا ضریب ذخیره‌ی موقت آب زیرزمینی (K_5) مقدار بزرگی را به خود اختصاص داده است که می‌تواند موجب تاثیر مستقیم در کاهش رواناب سطحی گردد. از طرفی، ضعف نتایج در پیش بینی برخی دبی‌های کم، می‌تواند به مقدار بهینه‌ی ضریب فروکش آب زیرزمینی (K_2) مرتبط باشد که در فرآیند واسنجی، مقدار کوچکی را اختیار نموده است؛ 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 کارون بزرگ، با داشتن مقادیر بهینه‌ی پارامترهای سراسری، آنالیز حساسیت مدل انجام شد؛ بدین صورت که تاثیر هر یک از پارامترهای مدل بر دقت نتایج ارزیابی گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تاثیر 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٪ متغیر برآورد شده است.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از نتایج حاصل از یک طرح تحقیقاتی را ارائه می‌دهد که با حمایت دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت مدیریت منابع آب ایران در موسسه

در حوضه‌ی کارون مقدار بهینه K_4 ، ضریب اصلاحی تبخیر در حدود 0.5 بوده و برای مقادیر کمتر از آن، خطای نسبی می‌تواند تا حدود ۱۴٪ افزایش یابد.

مقادیر K_5 یا ضریب ذخیره اولیه آب زیرزمینی در عمق در بازه‌ی [0 500] پیشنهاد شده است. مطابق شکل ۸-۸ در حوضه‌ی کارون مقدار خطای ناشی از تغییرات این پارامتر ناچیز، و حساسیت مدل به مقدار این پارامتر بسیار کم ارزیابی شده است.

مطابق نتایج شکل ۸-۸ و با افزایش مقدار این پارامتر، خطای محاسباتی کمتر شده و به عبارتی حساسیت مدل نسبت به ابتدای بازه، کمتر می‌گردد.

در حوضه‌ی کارون، مدل نسبت به تغییرات K_7 دمای پایه ذوب برف حساسیت چندانی ندارد.

بازه‌ی شدنی K_8 ضریب درجه-روز دما در محدوده‌ی [0 10] در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ۸-۸ ز در حوضه‌ی کارون در همسایگی مقدار صفر، RMSE حداقل است و با زیاد شدن این پارامتر مقدار خطا تا حدود ۹٪ افزایش می‌یابد.

بازه شدنی K_9 ضریب درجه-روز بارندگی در محدوده [0 0.05] است. مطابق شکل ۸-۸ ح در حوضه کارون، خطای مدل در همسایگی صفر برای این پارامتر کمترین بوده و با تغییر آن، نتایج مدل آنچنان تغییر نمی‌کند.

بازه‌ی شدنی K_{10} ضریب رواناب سطحی در محدوده‌ی [0 5] پیشنهاد شده است که در حوضه‌ی کارون 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.

بازه‌ی شدنی K_{11} آستانه‌ی شدت بارش در محدوده‌ی [0 500] در نظر گرفته شده است. در حوضه‌ی کارون، RMSE در همسایگی مقدار 500 کمترین بوده و با کم شدن آن مقدار خطا در آن حوضه تا حدود ۳۵٪ افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

مقاله‌ی حاضر به واسنجی مدل بارش-رواناب توزیعی WetSpa می‌پردازد. برای واسنجی مدل از دو الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی، NSGA-II و PSO در حوضه‌ی کارون

11) 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.

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

13) Doherty, J. 2005. PEST: model independent parameter estimation, user manual, 5th edn. Watermark Numerical Computing, Brisbane.

14) Duan, Q., Gupta, V.K. and Sorooshian, S. 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resour Res. 28: 1015-1031.

15) Eberhart, R.C. 1996 Computational intelligence: a perspective evolutionary programming, pp. 239-245.

16) Feyen, L., Kalas, M., and Vrugt, J.A. 2008. Semi-distributed parameter optimization and uncertainty assessment for large-scale streamflow simulation using global optimization. Hydrol. Sci. J. des Sciences Hydrol. 53(2): 293-308.

17) Gill, M.K., Kaheil, Y.H., Khalil, A., McKee, M. and Bastidas, L. 2006. Multiobjective particle swarm optimization for parameter estimation in hydrology. Water Resources Research. 42(7):1-14.

18) 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.

19) Hu, X. and Eberhart, R.C. 2002. Multiobjective optimization using dynamic neighbourhood particle swarm optimization. In: Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation (CEC 2002), Honolulu, Hawaii, USA.

20) Jung, B.S. and Karney, B.W. 2006. Hydraulic optimization of Transient protection devices using GA and PSO approaches. Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE). 132(1): 44-52.

21) Kabir, A. and Bahremand, A. 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).

تحقیقات آب به انجام رسیده است که بدینوسیله قدردانی می‌گردد.

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 (In Persian).

2) 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

3) 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

4) Bahremand, A., De Smedt, F., Corluy, J., Liu, Y.B., Poórová, J., Velcická, L. and Kuniková, E. 2007. WetSpa model application for assessing reforestation impacts on floods by in Margecany-Hornad watershed, Slovakia. Water Resources Management 21: 1376-1391.

5) Bates, B.C. and Campbell, E.P. 2001. Runoff modeling. Water Resour. Res. 37(4): 937-947.

6) Baumgartner, U., Magele, C. and Renhart, W. 2004. Pareto optimality and particle swarm optimization. IEEE Trans Magn. 40(2):1172-1175.

7) 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.

8) Chau, K.W., 2007. Application of a particle swarm optimization algorithm to hydrological problems, Water Resources Research Progress, Liam N. Robinson (ed.), Nova Science Publishers. pp. 3-12.

9) Cheng, C.T., Ou, C.P. and Chaw, K.W. 2002. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration. J. Hydrol. 268(1-4): 72-86.

10) Criss, R.E. and Winston W.E. 2008. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals, Hydrol. Process 22: 2723-2725.

- distributed model intercomparison project (DMIP2). *Journal of Hydrology* 419: 78-89.
- 34) Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E.M. 2000. *Sensitivity analysis*, Wiley, Chichester, UK. pp: 3-13.
- 35) Seibert, J. 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(2): 215-224.
- 36) 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.
- 37) Sharifan, H., Dehghani, A.A. and Karimi Rad, A. 2012. Correlation coefficient for Hargreaves-Samani method for estimation of reference evapotranspiration (Case study: Synoptic Station of Gorgan). *Journal of Water and Soil Conservation Studies* 19(3): 227-235 (In Persian).
- 38) Sierra, M.R. and Coello Coello, C.A. 2005. Improving PSO-based multi-objective optimization using crowding, mutation and e-dominance. In: Coello Coello CA, Aguirre HA, Zitzler E (eds) *Evolutionary multicriterion optimization*. Third International Conference, EMO 2005. *Lecture notes in computer science*, vol 3410. Springer, Guanajuato, Mexico, pp 505-519.
- 39) Sorooshian, S. and Dracup, J.A. 1980. Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: correlated and heteroscedastic error cases. *Water Resour. Res.* 16(2):430-442.
- 40) Van Griensven, A. 2002. *Developments towards integrated water quality modeling for river basins*, PhD Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) Yapo, P.O., Gupta, H.V. and Sorooshian, S. 1998. Multi-objective global optimization of hydrological models. *Journal of Hydrology* 204:83-97.
- 22) Kennedy, J. and Eberhart, R.C. 1995. Particle swarm optimization. In *Proceedings of the IEEE international conference on neural networks IV* (pp. 1942-1948). Piscataway: IEEE.
- 23) Khu, S.T., Savic, D. and Liu, Y. 2005. Evolutionary-based multi-objective meta-model approach for rainfall-runoff model calibration, *Geophysical Research Abstracts*. 7:09858.
- 24) Kuczera, G. 1997. Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models. *Water Resour. Res.* 33(1):177-185.
- 25) Kumar, D.N. and Reddy, M.J. 2007. Multipurpose reservoir operation using particle swarm optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE*. 133: 192-201.
- 26) Lacomme, P., Prins, C. and Sevaux, M. 2003. Multiobjective capacitated arc routing problem, *Second International Conference, EMO 2003*, Faro, Portugal, April 8-11, 2003.
- 27) 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.
- 28) Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F. and Pfisher, L. 2002. Flood prediction with the WetSpa model on catchment scale, in: *Flood Defence '2002*, Eds: Wu et al., Science Press, New York Ltd, ISBN: 1-880132-54-0.
- 29) 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.
- 30) Madsen, H. 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology* 235:276-288.
- 31) Makhdom Farkhondeh, M. 2014. *The foundation of spatial planning*. Tehran University Publication, Tehran, Iran.
- 32) Saberchary, K., Bahremand, A. and Salmani, H. 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 (In Persian).
- 33) Safari, A., De smedt, F. and Moreda, F. 2009. WetSpa model application in the

- 44) Zhang, X., Srinivasan, R., Zhao, K. and Van Liew, M. 2008. Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model. *Hydrological Processes* 23(3):430-441.
- 45) Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. 2000. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: empirical results. *Evolutionary Comput.* 8(2):173-195, 2000.