

بهبود عملکرد یک مدل هیدرولوژی ساده با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه و داده‌های گرانی سنجی ماهواره‌ای

عبدالرضا صفری^۱، عبدالرحمان مصطفائی^{۲*}

^۱ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
asafari@ut.ac.ir

^۲ استادیار گروه نقشه‌برداری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه زابل
a.mostafaie@uoz.ac.ir

(تاریخ دریافت مهر ۱۳۹۵، تاریخ تصویب دی ۱۳۹۶)

چکیده

امروزه استفاده از مدل‌های هیدرولوژی، عمدتاً برای شبیه‌سازی تغییرات منبع آب و سیلان (شامل رواناب و تبخیر) ضروری به نظر می‌رسد. مدلسازی خوب فرآیندهای هیدرولوژیکی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژی نیازمند تعیین پارامترهای مدل می‌باشد. در فرآیند واسنجی (کالیبراسیون) مقادیر پارامترهای مدل طوری برآورد می‌شوند که مدل به خوبی بتواند سیستم طبیعی را شبیه‌سازی نماید. موفقیت مدل‌های موجود در شبیه‌سازی واقعیت به پیچیدگی و تعداد پارامترهای آن بستگی ندارد. ساختار مدل، تشخیص پارامترهای تأثیرگذار و نحوه واسنجی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد شبیه‌سازی داشته باشد. روش‌های بهینه‌سازی از جمله روش‌های اتوماتیک واسنجی این مدل‌ها می‌باشد. تجربه‌های عملی واسنجی مدل‌های هیدرولوژی نشان داده است که روش‌های تک هدفه اغلب جهت اندازه‌گیری همه ساختارهای مهم داده‌های مشاهداتی کافی نیست. در این تحقیق الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه SPEA-II، PESA-II، MPPO، NSGA-II جهت واسنجی اتوماتیک یک مدل هیدرولوژیکی ساده (GR4J)، متشکل از ۴ پارامتر، برای حوضه دانوب با استفاده از داده‌های رواناب و ذخیره کلی آب حاصل از داده‌های روزانه ثقل سنجی ماهواره‌ای به کار گرفته می‌شوند. در این الگوریتم‌ها با ماکزیمم کردن ضرایب بهره‌وری نش-ساتکلیف (NS) مربوط به رواناب و تغییرات ذخیره آب، پارامترهای مدل برآورد شده و با معیارهای ارزیابی تعداد جواب آرشیو پرتو (NPS)، فاصله نسلی (GD)، فاصله گذاری (SP) و بیشترین گسترش (MS) عملکرد الگوریتم‌ها در فرآیند واسنجی مقایسه می‌شود. تمامی الگوریتم‌ها توانسته‌اند در پایان الگوریتم تعداد جواب آرشیو پرتو یکسانی داشته باشند. با توجه به معیارهای SP و MS الگوریتم NSGA-II عملکرد بهتری داشته و الگوریتم MPPO با توجه به تمامی معیارها عملکرد بهتری نسبت به روش‌های PESA-II و SPEA-II و با معیار GD نیز بهتر از الگوریتم NSGA-II ارزیابی شده است. با توجه به نتایج محاسبه ضریب NS، مشخص شد که مدل در دوره‌های واسنجی و ارزیابی (اعتبار سنجی) دارای عملکرد قابل قبولی است و استفاده همزمان رواناب و تغییرات ذخیره آب منجر به بهبود عملکرد مدل شده است یعنی علاوه بر شبیه‌سازی قابل قبول رواناب، شبیه‌سازی قابل قبولی از تغییرات ذخیره آب نیز صورت گرفته است.

واژگان کلیدی: مدل هیدرولوژی، منابع آب، ثقل سنجی ماهواره‌ای، واسنجی چند هدفه

۱- مقدمه

نمایش پدیده‌های طبیعی از طریق مدل‌های هیدرولوژی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت در منابع آب بسیار مهم است، چرا که این مدل‌ها امکان بررسی فرآیندهای طبیعی و ارزیابی مدل‌سازی طبیعت در طرح‌های مختلف را فراهم نموده و در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی اهمیت فراوانی دارند. بطور کلی مدل‌سازی، پروسه توصیف یک سیستم بر مبنای تعدادی متغیر ورودی، پارامترهای مدل و مقادیر اولیه می‌باشد. از میان مدل‌های مختلف، مدل‌های بارش-رواناب که فرآیندهای طبیعی رخ داده در یک حوضه را نشان می‌دهد بطور گسترده‌ای در مطالعه اثر طرح‌های مختلف مدیریت منابع آب در پیش‌بینی حوضه‌های آبخیز فاقد اطلاعات و همچنین بررسی اثر تغییرات آبی در آب و هوا و کاربری اراضی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]. مدل‌های مفهومی بارش-رواناب که عمدتاً با چند فرآیند بهم پیوسته به بیان المان‌های فیزیکی یک حوضه می‌پردازند از پرکاربردترین مدل‌های موجود در هیدرولوژی هستند. پارامترهای اینگونه مدل‌ها تعریف کننده رفتار المان‌های مفهومی مختلف و نحوه ارتباط آنها به یکدیگر است. وظیفه المانهای مفهومی مدل هدایت خروجی‌های مدل به نحوی است که متوسط فرآیندهای موجود در زیر حوضه‌های مختلف، به خوبی شبیه سازی شود، لذا پارامترهای مدل را نیز می‌توان خلاصه خصوصیات حوضه دانست که گاهی با اندازه‌گیری‌های مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و از طریق فرآیند واسنجی (کالیبراسیون) و بصورت غیرمستقیم تعیین می‌شوند [۲]. در فرآیند واسنجی مقادیر پارامترها به نحوی تعیین می‌شوند تا مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل تا حد ممکن به مقادیر مشاهداتی نزدیک باشند و در حقیقت موفقیت شبیه‌سازی فرآیندهای طبیعی بوسیله مدل‌های بارش-رواناب به شدت به تعیین پارامترهای مدل بستگی دارد [۳].

بطور کلی روش‌های واسنجی را می‌توان به دو دسته دستی و اتوماتیک تقسیم بندی نمود. در روش‌های دستی یا سعی و خطا، انتخاب مقادیر مختلف برای پارامترها، کمیت‌های شبیه سازی شده و مشاهداتی از طریق بررسی بصری یا سایر عوامل کنترلی مقایسه می‌شوند. اگر چه گاهی اوقات واسنجی دستی منجر به نتایج خوبی می‌شود ولی زمانبر بودن، خسته کننده بودن و همچنین وابسته

بودن به تجربه، مهارت و دانش شخص مدل‌کننده از فرآیند مورد مدل‌سازی باعث شده است تا تکنیک‌های اتوماتیک واسنجی بطور وسیعی مورد مطالعه قرار گیرند [۴]. در این تکنیک‌ها مسئله واسنجی به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌شود که منجر به بهینه شدن (ماکزیمم یا مینیمم) یک یا چند تابع هدف می‌شود. تصمیم‌گیری در مورد خوب یا بد بودن مجموعه پارامترها نیز با استفاده از تابع یا توابع هدف انجام می‌شود. توابع هدف، معادلات عددی منتخب وابسته به پارامترهای مدل هستند و نشان‌دهنده توافق عددی رفتار شبیه‌سازی شده و مشاهداتی حوضه می‌باشند. خلاصه اولین تلاش‌های صورت گرفته در مورد کاربردهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی در این زمینه را می‌توان در [۵] مطالعه نمود.

استفاده از یک تابع هدف در واسنجی از یک طرف ممکن است با بارز نمودن خصوصیات خاصی از یک سیستم، موجب افزایش خطاها در برخی جنبه‌های دیگر شبیه سازی شود، از طرف دیگر ادغام باقیمانده‌ها در یک متغیر می‌تواند موجب پنهان شدن یا ناچیز شمردن محتوای اطلاعاتی داده‌های موجود شده و از همه اطلاعات موجود در داده‌ها بهره‌برداری نشود [۶]. از این‌رو استفاده از چندین تابع هدف در بهبود واسنجی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی چند هدفه شامل تبدیل چند هدف به یک تابع است. رایج‌ترین روش، ایجاد تابعی جدید با مجموع وزندار از توابع اولیه است که وزن‌ها توسط کاربر تعیین می‌شود [۷]. بهینه‌سازی چند هدفه در واسنجی، زمانی از بیشترین اطلاعات موجود در داده‌ها استفاده می‌کند که جهت شناسایی مجموعه پارامترهای بهینه پارتو^۱ یا نامغلوب^۲ به کار گرفته شود [۸]. برای اولین بار گوپتا و همکاران در سال ۱۹۹۸ میلادی [۲] مزایای واسنجی چند هدفه مدل را مطرح کردند و نشان دادند که این طرح‌ها قابل اجرا بوده و دارای نتایج مطلوبی هستند. تا کنون تحقیقات فراوانی با تکیه بر روش‌های چند هدفه برای واسنجی مدل‌ها صورت گرفته است، به عنوان مثال در وزن‌دهی به توابع هدف مختلف می‌توان به [۲ و ۹-۱۱] و همچنین در رابطه با الگوریتم-های شناسایی مجموعه پارتو و به خصوص جستجو بر

^۱ Pareto

^۲ nondominated

مبنای جمعیت می‌توان به [۱۵-۱۲] اشاره نمود. افسترایس و کوتسویانیس [۱۶] خلاصه جامعی از سیر تحقیقات در زمینه واسنجی‌های چند هدفه تا سالهای اخیر را بررسی کرده‌اند.

جهت واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی غالباً از رواناب استفاده می‌شود و کمتر به ذخیره آب توجه شده است. استفاده از ذخیره آب در واسنجی می‌تواند مقادیر پارامترهای مدل را تحت تأثیر قرار دهد. مثلاً شوماخر و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۶ میلادی نشان دادند که داده‌گذاری مقادیر مشاهداتی ذخیره آب (که از گریس بدست می‌آید) می‌تواند خروجی یک مدل کالیبره شده با رواناب را بهبود بخشد. ورث و همکاران [۱۸] برای اولین بار از داده‌های ماهانه گریس بطور مستقیم جهت بهبود عملکرد مدل هیدرولوژیکی WGHM^۱ در شبیه‌سازی چرخه آب قاره‌ای استفاده نمودند. آنها روش ε-NSGAI را در سه حوضه رودخانه‌ای بزرگ، آمازون، می‌سی‌سی‌پی و کنگو به کار گرفته و پیش‌بینی‌های مدل از رواناب مشاهداتی و تغییرات ذخیره آب را بهبود دادند. پس از آنها ژی و همکاران [۱۹] از داده‌های ده روزه گریس در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۹ و دبی جهت واسنجی و ارزیابی یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی (SWAT) استفاده کرده و با همان روش ε-NSGAI در منطقه Sub-Saharan آفریقا پارامترهای بهینه مدل را بدست آوردند.

در تحقیق حاضر یک مدل ساده به نام GR4J برای اولین بار به طور چندهدفه با استفاده از داده‌های روزانه ذخیره کلی آب حاصل از گریس در کنار رواناب در قالب الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه (NSGA-II^۲، MPMO^۳، PESA-II^۴ و SPEA-II^۵) واسنجی، پارامترهای بهینه مدل محاسبه و کارایی مدل در روش‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

در ادامه این مقاله پس از بیان مشخصات کلی منطقه مورد مطالعه، در بخش سوم ساختار و پیشینه مدل GR4J تشریح شده است. پس از معرفی منطقه مورد مطالعه این تحقیق در بخش ۲، کلیات مدل GR4J و داده‌های مورد استفاده در این تحقیق به ترتیب در بخش‌های ۳ و ۴

توضیح داده شده‌اند. بخش ۵ به چگونگی محاسبه تغییرات ذخیره آب با استفاده از مدل پرداخته است. پس از توضیح مفهوم بهینه‌سازی چندهدفه در بخش ۶، روش‌های واسنجی چند هدفه و تابع هدف مورد استفاده جهت برآورد پارامترهای بهینه مدل در هفتمین بخش تحقیق ارائه شده و پس از ارائه نتایج عددی و ارزیابی‌ها در بخش ۸، نتیجه‌گیری تحقیق در بخش ۹ صورت گرفته است.

۲- منطقه مورد مطالعه

حوضه رودخانه دانوب با مساحتی حدود ۸۰۱۴۶۳ کیلومترمربع، بزرگترین حوضه رودخانه‌ای اروپا پس از ولگا است که در اروپای مرکزی و شرقی قرار گرفته و بین-المللی‌ترین حوضه رودخانه‌ای دنیاست چرا که میان ۱۹ کشور تقسیم می‌شود. اکوسیستم این حوضه از نظر محیط زیستی، اقتصادی، تاریخی و اجتماعی بسیار با ارزش است و در محدوده حوضه این رودخانه بالغ بر ۸۳ میلیون نفر زندگی می‌کنند. رودخانه دانوب از کوه‌های جنگل سیاه در آلمان به صورت دو رود کوچک به نام‌های بریچاچ^۶ و برگ^۷ شروع شده و پس از یکی شدن این دو رود و طی مسیری عمدتاً در جهت جنوب شرقی، به طول حدود ۲۷۸۰ km و با تغذیه از حدود ۳۰۰ انشعاب و عبور از کشورهای اتریش، اسلواکی، مجارستان، کرواسی، صربستان، بلغارستان، مولداوی و اوکراین در سواحل رومانی پس از تقسیم به سه شاخه اصلی کیلیا، سولینا و سن جورجیا، در یک دلتای پهن‌آور به دریای سیاه می‌ریزد. این رودخانه تنها رودخانه اصلی اروپاست که از غرب به شرق جریان دارد [۲۰]. ارتفاع متوسط حوضه حدود ۴۷۵ متر بالای سطح دریا و میانگین سالانه بارش بین ۲۳۰۰ میلیمتر در کوه‌های مرتفع تا ۴۰۰ میلیمتر در منطقه دلتا نوسان دارد. اختلافات دمای هوا نیز ناشی از گستردگی منطقه و کشیدگی حوضه از غرب به شرق است. میانگین سالانه دما در کل حوضه از ۶.۲°C- (در ارتفاعات کوه‌ها، رصدخانه سانلیک^۸ در کوه‌های آلپ در اتریش) تا ۱۲°C+ (در زمین-های پست میانه و پایین حوضه) تغییر می‌کند [۲۱]. بیشترین تبخیر در نواحی میانی حوضه است که بیشترین

^۶ Brigach
^۷ Breg
^۸ Sonnblick

^۱ WaterGAP Global Hydrology Model
^۲ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II
^۳ Multi-objective Particle Swarm Optimization
^۴ Pareto Envelope-Based Selection Algorithm II
^۵ Strength Pareto Evolutionary Algorithm II

بارندگی با بیشترین دما ترکیب می‌شود. دره ساوا^۱ در شمال دیناریدز^۲ و دامنه‌های کوه‌های کارپاتیان^۳ به ترتیب دارای 725 mm year^{-1} و 700 mm year^{-1} تبخیر هستند. بیشترین بخش‌های حوضه تبخیر با نرخ سالانه بین ۵۰۰ تا ۶۵۰ میلیمتر در سطح را داراست و پایین‌ترین نرخ تبخیر درون حوضه که در کوه‌های بسیار مرتفع آلپ مرکزی اتفاق می‌افتد برابر ۱۰۰ میلیمتر در واحد سطح است و میانگین بلند مدت مولفه‌های بیلان آب در حوضه بصورت جدول ۱ ارائه شده است [۲۲] و شکل ۱ وضعیت توپوگرافی، شکل حوضه و مسیر رودخانه را در بین کشورهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱- میانگین بلند مدت مولفه‌های بیلان آب حوضه دانوب، [۲۲]

خطای بالانس $d=(P-E-R)/P$	ضریب رواناب $a=R/P$	دبی m^3s^{-1}	مقادیر متوسط بلند مدت (mm year^{-1})		
			رواناب	تبخیر	بارش
+۰/۶۰	+۰/۳۲	۶۸۴۱	۲۶۴	۵۴۷	۸۱۶



شکل ۱- نمای کلی حوضه دانوب شامل توپوگرافی منطقه، مسیر اصلی رودخانه دانوب و سرشاخه‌های آن و کشورهای منطقه

۳- مدل GR4J

مدل GR4J (مخفف duGénie Rural à 4 paramètres Journalier) یک مدل پیوسته بارش-رواناب یکپارچه‌ی روزانه‌ی ساده و قابل اعتماد است که فقط دارای چهار پارامتر واسنجی بوده و از خانواده مدل‌های محاسبه رطوبت خاک محسوب می‌شود [۲۳]. GR4J آخرین نسخه اصلاح شده مدل GR3J می‌باشد که نخستین بار بوسیله ادیجانتو و میشل [۲۴] ارائه شد و

توسط ناسیمنتو [۲۵] و ادیجانتو [۲۳] بهبود یافته است. استفاده از مدل‌های با پایه فیزیکی نظیر SWAT جهت اجرا نیاز به اطلاعات فراوانی دارند که در اکثر مواقع این اطلاعات در دسترس نبوده و همچنین با توجه به تعدد پارامترهای مؤثر مدل‌های فیزیکی، فرآیند پیچیده و زمانبری جهت واسنجی و تعیین پارامترها در پیش رو خواهد بود. GR4J مدلی است که با داده‌های ورودی بارش و تبخیر-تعرق به سرعت قابل کالیبره بوده و از طرفی پیرین و همکاران [۲۶] نشان داده اند که کارایی این مدل با بهترین مدل‌های موجود و دارای تعداد پارامترهای بیشتر از خودش قابل مقایسه است. GR4J و ورژن‌های مختلف آن در چندین کشور و توسط محققان مختلفی در مطالعات هیدرولوژیکی متفاوتی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰-۲۸].

ساختار و عملکرد مدل GR4J بسیار ساده شامل یک مخزن محاسبه رطوبت خاک و یک تابع تبادل آب در ماژول تولید، و دو هیدروگراف واحد و یک روندیابی غیر خطی مخزن در بخش انتقال مدل است. مطالعه پیرین و همکاران [۲۶]، تطبیق‌پذیری رضایت بخش و قوی مدل نشان داده است که بخشی از آن ناشی از تعداد کم پارامترهای مورد نیاز جهت بهینه سازی در مدل است. از چهار پارامتر مدل، دو پارامتر X1 (ماکزیمم ظرفیت مخزن تولید) و X2 (ضریب تبادل آب زیرزمینی) مربوط به توازن آب و دو پارامتر دیگر برای انتقال آب (X3: ماکزیمم ظرفیت مخزن روندیابی غیرخطی و X4: زمان پایه هیدروگراف واحد) است. ۴ پارامتر مذکور اعدادی حقیقی بوده و دو پارامتر X1 و X3 در محدوده اعداد مثبت، X4 بزرگتر از ۰/۵ و X2 علاوه بر اعداد مثبت و منفی مقدار صفر را نیز می‌تواند داشته باشد [۳۱].

مراحل فرآیند مدل‌سازی GR4J از بارش تا رواناب در یک رودخانه را با در نظر گرفتن شکل ۲ بصورت زیر می‌توان بیان نمود. مخزن تولید (X1)، مخزنی در سطح خاک هست که می‌تواند بارش را در خود نگه دارد. تبخیر-تعرق و نفوذ در این مخزن صورت می‌گیرد. ظرفیت این مخزن بستگی به نوع بستر و خاک حوضه رودخانه دارد. تخلخل پایین خاک می‌تواند منجر به مخزن تولید بزرگتر شود. X2 تابعی از مبادله آب‌های زیرزمینی است که مخزن روندیابی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقادیر منفی این ضریب به معنی ورود آب به عمق آبخوان و مقادیر مثبت

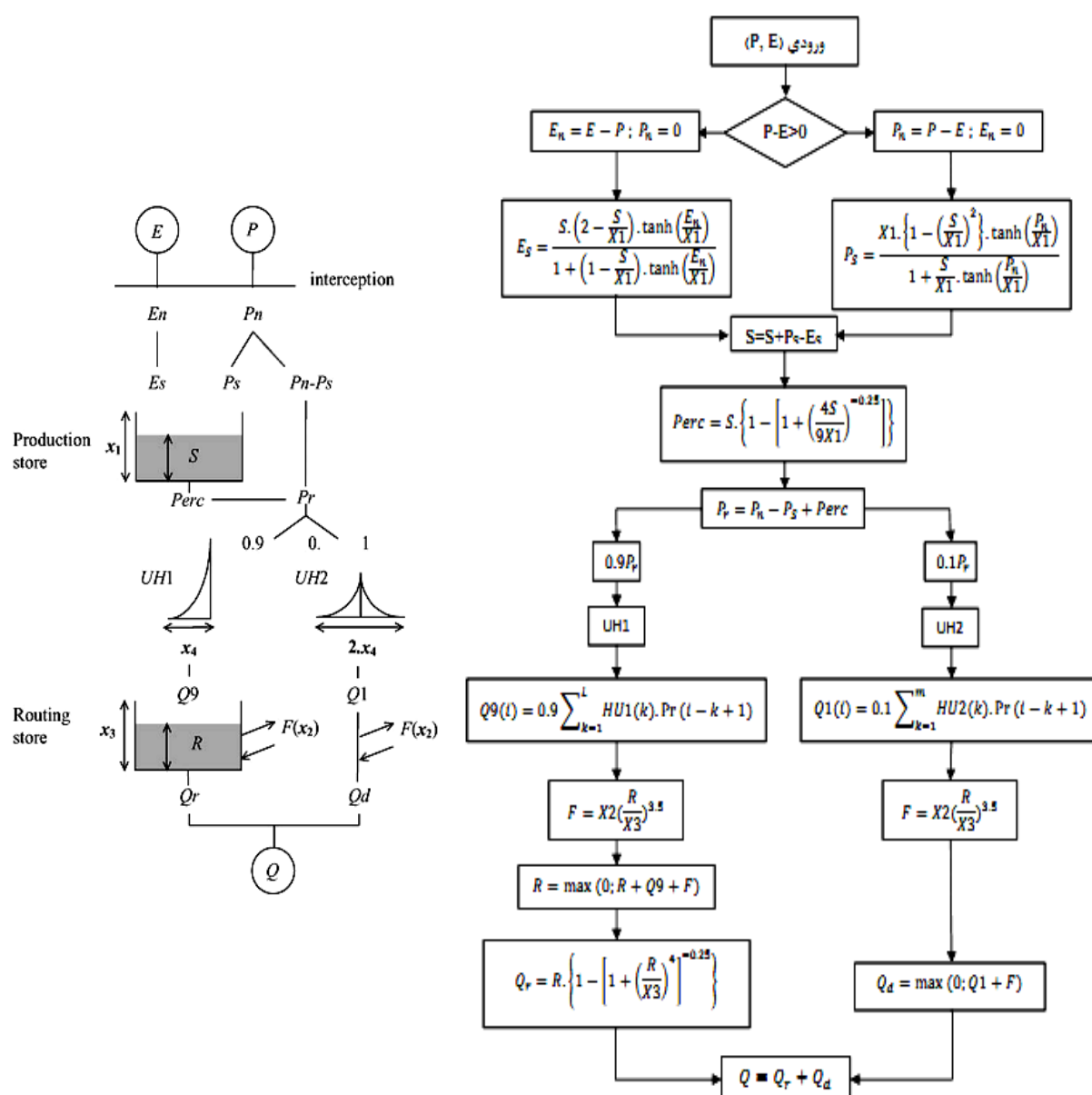
^۱ Sava

^۲ Dinarides

^۳ Carpathians

طریق پارامتر X_2 وجود دارد و این باعث کم شدن جریان آب بوسیله نشت به حوضه‌های همسایه از طریق شبکه کارستیکی یا نفوذ مستقیم به آبخوان پایین دستی بدون انتقال از خروجی حوضه می‌شود که می‌تواند فرآیندی مهم محسوب شود. جزئیات محاسباتی و دیاگرام کلی مدل در شکل ۲ ارائه شده است (برای مطالعه بیشتر جزئیات و روابط مدل رجوع شود به [۳۱]). تعداد کم پارامترهای مدل، استفاده از روش‌های متنوع در واسنجی مدل را ممکن می‌سازد. که در بخش ۷ این مقاله روش‌های مورد استفاده جهت واسنجی این مدل روی حوضه دانوب ارائه شده است.

به معنی خروج آب از آبخوان به مخزن روندیابی است. مخزن روندیابی (X_3) مقدار آب قابل ذخیره در خلل و فرج خاک است. مقدار این پارامتر به نوع و رطوبت خاک بستگی دارد. زمان اوج (X_4)، زمان ایجاد ماکزیمم هیدروگراف سیل در مدلسازی است. رواناب بعد قائل این هیدروگراف را تشکیل می‌دهد و جریان آهسته ۹۰٪ جریان است که به درون زمین نفوذ کرده و ۱۰٪ باقیمانده جریان، جریان سریع است که روی سطح خاک جریان می‌یابد و از طریق یک هیدروگراف واحد با زمان تأخیر X_4 به سمت خروجی حوضه هدایت می‌شود. ذخیره عمقی نیز پس از نفوذ، روانابی را با تأخیر ایجاد می‌کند. برای مخزن روندیابی و رواناب، قابلیت نفوذ به خارج از سیستم از



شکل ۲- فرآیند محاسباتی (سمت راست) و دیاگرام کلی (سمت چپ) [۵۸] مربوط به مدل GR4J

۴- داده‌های مورد استفاده

در این مطالعه از داده‌های اقلیمی بارش و پتانسیل تبخیر-تعرق جهت اجرای مدل هیدرولوژی و جهت واسنجی مدل از داده‌های رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی (TWS^۱) بدست آمده از مشاهدات گریس استفاده شده است. اطلاعات کلی داده‌های مورد استفاده در جدول ۲ ارائه و در ادامه به اختصار توضیح داده شده‌اند.

۴-۱- داده‌های اقلیمی

جهت استفاده از مدل‌های هیدرولوژی بسته به نوع مدل مورد استفاده داده‌های متفاوتی مورد نیاز است. جهت به کارگیری مدل GR4J، داده‌های بارش و تبخیر-تعرق منطقه مورد نظر بایستی در دسترس باشد. بدین منظور از مجموعه داده‌های E-OBS پروژه مجموعه داده و ارزیابی آب و هوایی اروپا^۲ استفاده شده است و جهت واسنجی و ارزیابی مدل از اطلاعات مربوط به رواناب ایستگاه سیتال ایزمیل^۳، در ابتدای دلتای رود دانوب با موقعیت (45.22°N , 28.73°E) واقع در کشور رومانی استفاده شده است (Global Runoff Data Center, Germany, <http://grdc.bafg.de/>).

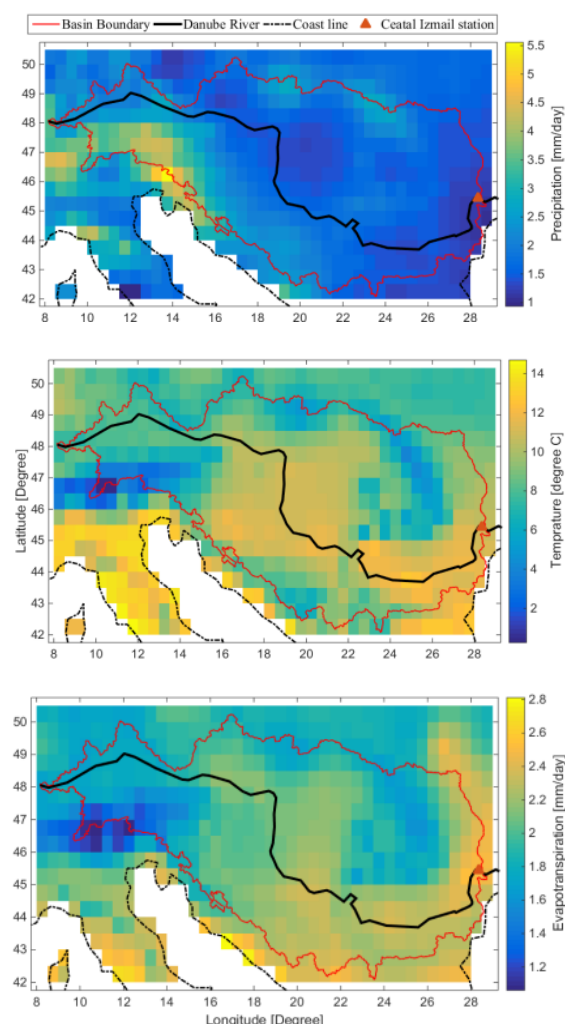
جدول ۲- خلاصه مشخصات داده‌های مورد استفاده در واسنجی مدل

GR4J

داده	اقلیمی		گرانی سنجی ماهواره‌ای
	رواناب	باز تحلیل شده	
منبع	GRDC	E-OBS	ITSG-Grace2016
وضعیت مکانی	مشاهده ایستگاهی	گرید 0.5° × 0.5°	گرید 0.5° × 0.5°
قدرت تفکیک زمانی	روزانه	روزانه	روزانه
پوشش	ایستگاه سیتال-ایزمیل	اروپا	جهانی
دوره مورد استفاده	۲۰۰۰-۲۰۱۰	۲۰۰۰-۲۰۱۰	۲۰۱۰-۲۰۰۳

۴-۲- داده‌های ثقل سنجی ماهواره گریس

پدیده‌هایی نظیر تغییرات در اتمسفر، هیدروسفر، پوشش سطح زمین و یخچال‌های موجود در زمین از جمله عوامل تأثیرگذار بر چرخه‌های آب در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت می‌باشند. ایجاد مدل‌های دقیق جهت شبیه‌سازی یا پیش‌بینی تغییرات آب با توجه به عوامل فراوان اثرگذار بر آن امری دشوار است. مأموریت ماهواره-ای گریس به صورت جهانی میدان ثقل زمین و تغییرات زمانی آن را اندازه‌گیری می‌کند که جهت محاسبه تغییرات ذخیره آب کلی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کمیت فرصت منحصر به فردی را جهت بررسی تغییرات مکانی-زمانی آب با سنجنده‌های فضایی در سیستم زمین را فراهم می‌کند [۳۲].



شکل ۳- متوسط بارندگی، دما و تبخیر-تعرق در سطح حوضه دانوب (به ترتیب از بالا به پایین) با استفاده از داده‌های مورد استفاده در این تحقیق. خط قرمز نشان‌دهنده مرز حوضه و خط مشکی مسیر رودخانه دانوب و مثلث قرمز رنگ محل ایستگاه سیتال-ایزمیل جهن اندازه-گیری رواناب است

^۱ Total Water Storage

^۲ European Climate Assessment & Dataset project

^۳ Ceatal Izmail

مینیمم‌های جریان به خوبی با تغییرات ذخیره کلی آب گریس بیان می‌شود. این کورولیشن قوی حاکی از این است که آب رودخانه در بخش بزرگی از تغییر ذخیره آب روزانه در لحظات ماکزیمم‌های رواناب سهم دارد، زمانیکه سایر ذخایر در حد ماکزیمم یا نزدیک ماکزیمم بوده و امکان جذب بیشتر از رواناب یا بارش وجود ندارد.

۵- تغییرات ذخیره آب با استفاده از مدل

هر مدل هیدرولوژیکی با توجه به ساختارش دارای ورودی‌ها و خروجی‌های خاص خود می‌باشد. برای استفاده از داده‌های ثقل سنجی بایستی بتوان از مدل هیدرولوژیکی کمیتی معادل تغییرات ذخیره آب را برآورد کرد. در این تحقیق، برای حوضه مورد مطالعه، بر اساس خروجی‌های مدل مقدار TWS را می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود.

$$TWS_t = S_t + R_t + V_t + W_t \quad (1)$$

که t مبین زمان، S_t و R_t به ترتیب مقدار ذخیره در مخازن تولید و روندیابی، V_t و W_t میزان آب موجود در هیدروگراف‌های واحد ۱ و ۲ مدل در زمان t است. سری زمانی تغییرات TWS حاصل از مدل برای حوضه از تفاضل TWS در زمان t و متوسط مقادیر TWS_t حاصل از مدل در بازه زمانی نظیر با داده‌های مورد استفاده گریس از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$dTWS_t = TWS_t - \overline{TWS} \quad (2)$$

که $\overline{TWS}$ متوسط مقادیر TWS_t مدلی در بازه‌ای متناظر با داده‌های گریس است. مقایسه‌ی صورت گرفته در شکل ۵ بین سری زمانی تغییرات ذخیره آب کلی حاصل از داده‌های ثقل سنجی و شبیه‌سازی شده توسط مدل کالیبره شده GR4J با تغییرات TWS گریس در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ حاکی از رفتار مشابه بین خروجی این مدل و مقادیر ذخیره آب گریس می‌باشد.

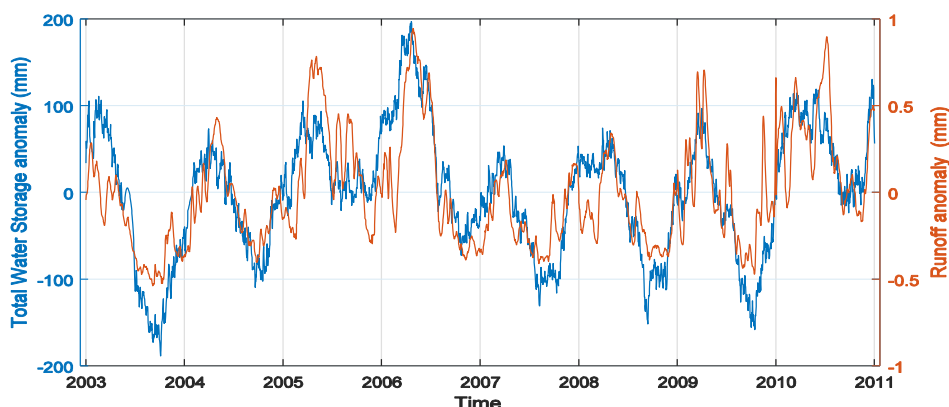
در این تحقیق مدل روزانه میدان ثقل حاصل از گریس (ITSG-Grace2016) محاسبه شده تا درجه و مرتبه ۴۰ در دانشگاه صنعتی گراتز^۱ استفاده شده است [۳۳]. این داده‌ها کل دوره زمانی فعالیت مأموریت گریس از آوریل ۲۰۰۴ تا کنون را شامل شده و بطور پیوسته به روزرسانی می‌شود. جهت افزایش قدرت تفکیک زمانی میدان گرانی حاصل از گریس و محاسبه میدان‌های روزانه از اطلاعات الگوهای کورولیشن زمانی مستخرج از مدل‌های ژئوفیزیکی در غالب فرآیندی به نام هموارساز کالمن استفاده شده که طی آن اطلاعات مکانی نیز حفظ می‌شود [۳۳]. مدل هیدرولوژیکی جهانی WGHM، مدل اتمسفریکی ECMWF^۲ و مدل گردش اقیانوسی OMCT^۳ جهت محاسبه کورولیشن‌های زمانی در کنار مشاهدات گریس به عنوان اطلاعات پایه جهت محاسبه مدل‌های گرانی روزانه استفاده شده است. مدل‌های روزانه گرانی گریس ترکیبی از مشاهدات گریس و مدل‌های فیزیکی بوسیله روش فیلترکالمن است. این مدل‌ها با توجه به ماکزیمم درجه و مرتبه محاسباتی، دارای قدرت تفکیک مکانی حدوداً ۴۵۰ کیلومتر هستند و به طور کلی معادل مساحت آستانه‌ای 150,000km² برای یک حوضه رودخانه‌ای است که در آن سیگنال هیدرولوژیکی گریس از نویز بیشتر است. جزئیات محاسباتی مدل‌های روزانه گریس را می‌توان [۳۳] مطالعه نمود.

برتری مدل‌های روزانه نسبت به مدل‌های ماهیانه در مطالعات هیدرولوژیکی در این است امکان بازیابی تغییرات سریع میدان ثقل (مخصوصاً ارتفاع آب معادل) با رزولیشن زمانی مناسب با جزئیات کافی را فراهم می‌سازد [۳۳]. برای این مطالعه پس از دانلود مدل‌های گرانی روزانه گریس برای بازه سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ از وب سایت دانشگاه فناوری گراتز، متوسط مکانی تغییرات TWS با روش وار و همکاران [۳۴] برای حوضه دانوب محاسبه شد. در شکل ۴ آنامولی‌های ذخیره کلی آب حاصل از گریس و رواناب رودخانه در خروجی حوضه دانوب در ایستگاه سیتال ایزمیل در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۰ نشان داده شده است. به وضوح دیده می‌شود که اگرچه مشاهدات دارای دامنه-های متفاوتی هستند ولی دارای کورولیشن خوبی با همدیگر می‌باشند، ضریب کورولیشن ۰/۷۸، و ماکزیمم و

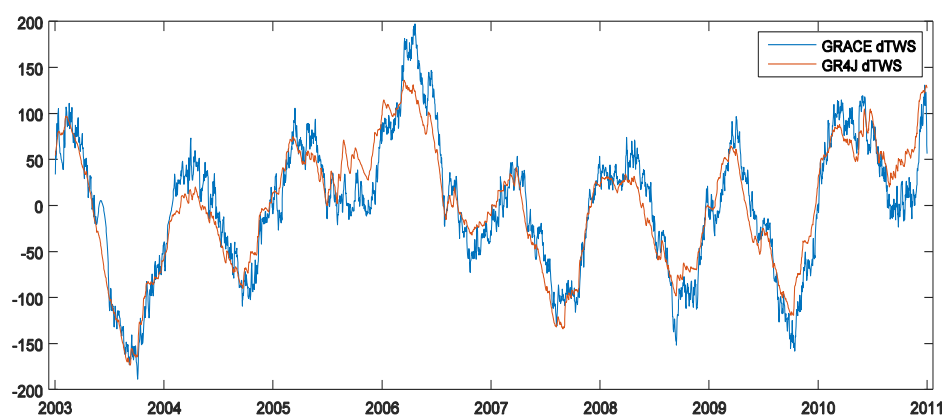
^۱ Graz University of Technology

^۲ European Center for Medium range Weather Forecasting

^۳ Ocean Model for Circulation and Tides



شکل ۴- آنامولی ذخیره آب کلی محاسبه شده توسط داده‌های روزانه ITSG-Grace2016 (آبی، محور y سمت چپ) در مقایسه با تغییرات رواناب مشاهداتی ایستگاه Ceatal Izmail (قرمز، محور y سمت راست)



شکل ۵- مقایسه سری‌های زمانی تغییرات ذخیره آب کلی حاصل از گریس و مدل GR4J

۶- واسنجی با بهینه سازی چند هدفه

واسنجی‌های چند هدفه به سه نوع قابل دسته‌بندی هستند. یعنی اهداف چندگانه می‌توانند ۱- بر اساس اندازه‌گیری‌های چند متغیره، ۲- بر اساس اندازه‌گیری‌های چند سایتی و ۳- حالت‌های چند پاسخده دسته بندی شوند [۱۱]. بصورت کلی مسئله واسنجی چند هدفه را می‌توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\min[F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_m(\theta)] \quad , \quad \theta \in \Theta \quad (3)$$

که F_i ($i=1,2,\dots,m$) توابع هدف می‌باشند. واسنجی مدل نوعی مسئله واسنجی مقید است چرا که بردار پارامترهای θ منتخب از فضای پارامتر Θ که $\Theta \subseteq \mathcal{R}^n$ می‌باشند که n تعداد پارامترها است. برای هر پارامتر مدل یک حد پایین و بالا در نظر گرفته می‌شود که این حدود با توجه به اطلاعات ساختاری سیستم و تجربه‌های مدلسازی با آن مدل مشخص می‌شوند [۱۱].

جهت واسنجی مدل هیدرولوژی در این مطالعه با توجه به دسته اول روش‌های واسنجی چند هدفه،

الگوریتم‌های فراابتکاری (تکاملی) زیرمجموعه‌ای از محاسبات تکاملی هستند که قابلیت دستیابی به جواب‌های بهینه/نزدیک بهینه را در مسائل خطی/غیر خطی، پیوسته/گسسته و محدب/غیرمحدب با استفاده از تئوری‌های بیولوژیکی را فراهم می‌کنند [۳۵]. جهت برآورد پارامترهای بهینه در اجرای مدل هیدرولوژیکی از تکنیک‌های فراابتکاری^۱ می‌توان استفاده نمود.

با توجه به مسئله مورد نظر، الگوریتم‌های بهینه سازی را به دو صورت کلی تک هدفه و چند هدفه می‌توان بکار گرفت. در دسته اول یافتن بهینه یک تابع هدف با استفاده از الگوریتم مورد نظر مدنظر است. بهینه سازی چند هدفه فرآیندی جهت جستجوی مجموعه‌ای از جواب‌های بهینه یک مسئله با دو یا چند هدف است. به طور کلی،

^۱ mate-heuristic

۷-۱- روش مرتب سازی نامغلوب الگوریتم ژنتیک NSGA-II

نوعی از الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه و از معروف-ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی چند هدفه، الگوریتم NSGA-II است که در سال ۲۰۰۲ توسط دب و همکاران [۳۹] ارائه شد که بر ضعف‌های روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی از قبیل پیچیدگی محاسبات، غیر نخبه‌گرا بودن و نیاز به مشخص کردن یک پارامتر تسهیم فائق آمد. این الگوریتم از نخبه‌گرایی جهت ایجاد یک جبهه پارتو-بهینه متنوع استفاده می‌کند. روش نخبه‌گرایی منجر به نگهداری اعضای خوب نسل قبل در هنگام تولید نسل جدید در زمان اعمال عملگرهای الگوریتم ژنتیک می‌باشد که علاوه بر تسریع در همگرایی به جواب بهینه، فرآیند جستجو را نیز کاراتر می‌کند. این الگوریتم با رعایت اصل نخبه‌گرایی و با عملکردی انتخابی جمعیت جدید را از ترکیب جمعیت‌های والد^۲ و فرزند^۳ با اعمال عملگرهای جهش^۴ و آمیزش^۵ (ترکیب) ایجاد کرده و بهترین جواب‌ها را با توجه به برازش، گستردگی و پراکندگی جواب‌ها انتخاب می‌کند. در واقع در این الگوریتم پاسخ‌ها ابتدا بر اساس غلبه رتبه‌بندی شده و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند.

۷-۲- روش ازدحام ذرات چند هدفه (MPSO)

جهت استفاده از الگوریتم PSO در بهینه‌یابی چند هدفه، ساختار الگوریتم طوری تغییر یافته است که برای مسئله مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب حاصل شود. MPSO مورد استفاده در این مطالعه از جمله روش‌های برپایه پارتو است که ایده اساسی آن در انتخاب ذرات نامغلوب گروه به عنوان پیش‌رو می‌باشد. در حقیقت استفاده از الگوریتم اصلی روش NSGA-II در کنار PSO است [۴۰]. هنگام به روز رسانی موقعیت یک ذره، بجای فقط مقایسه موقعیت جدید با بهترین موقعیت کلونی ذرات در هر تکرار، همه ذرات با بهترین موقعیت و همه موقعیت‌های جدید حاصله تنها در یک مجموعه

مشاهدات رواناب و تغییرات ذخیره کلی آب به کار گرفته شدند و با آنها آماره کمی ضریب بهره‌وری نش-ساتکلیف^۱ (NS) جهت سنجش و ارزیابی مدل و به عنوان توابع هدف نیز محاسبه شدند (NSQ: ضریب نش-ساتکلیف حاصل از رواناب، NS_{dTWS}: نش-ساتکلیف حاصل از dTWS). ضریب NS که به طور وسیع در واسنجی مدل‌های هیدرولوژی به کار می‌رود، آماره‌ای نرمالیزه شده جهت نمایش اندازه نسبی واریانس باقیمانده (نویز) در مقایسه با واریانس مشاهدات بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۶].

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \quad (4)$$

Y_i^{sim} و Y_i^{obs} به ترتیب مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده کمیتی است که قرار است مدل بر اساس آن کالیبره شود. Y_{mean} نیز مبین متوسط مقادیر مشاهداتی این کمیت است. عملگر سیکما در رابطه فوق از یک تا تعداد مشاهدات مورد استفاده در واسنجی اعمال می‌شود. کمیت NS بین مقادیر $-\infty$ تا ۱ تغییر می‌کند. مقدار بهینه این ضریب، $NS=1$ ، نشان دهنده انطباق کامل مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. بطور کلی مقادیر بین ۰ تا ۱ سطوحی قابل قبول از کارایی است و مقادیر کمتر از ۰ مبین این است که مقادیر مشاهداتی نسبت به مقادیر شبیه‌سازی شده پیش‌بینی کننده بهتری است و کارایی قابل قبولی ندارد [۳۷].

۷- روش‌های واسنجی چند هدفه

الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه زیرمجموعه‌ای از محاسبات تکاملی هستند که قابلیت دست‌یابی به جواب‌های بهینه (یا نزدیک بهینه) را در مسائل خطی (یا غیر خطی)، پیوسته (یا گسسته)، محدب (یا غیر محدب) غالباً با استفاده از تئوری‌های بیولوژیکی را دارا هستند [۷]. در این نوع مقاله از چهار نوع الگوریتم فراابتکاری چند هدفه به عنوان ابزارهایی جهت واسنجی مدل هیدرولوژیکی GR4J استفاده شده است که توضیحات آنها به صورت مختصر در زیر بیان شده است.

^۲ parent
^۳ offspring
^۴ mutation
^۵ crossover

^۱ Nash-Sutcliffe

(مجموعه‌ای 2N تای که N اندازه کلونی است) ترکیب می‌شوند. سپس جهت تشکیل کلونی جدید بهترین جواب‌ها به روش مرتب سازی نامغلوب انتخاب می‌شوند. در این روش جهت ادامه الگوریتم ذرات بصورت اتفاقی از بین بهترین‌های مجموعه پیش‌روهای ذخیره شده در یک آرشیو خارجی انتخاب می‌شود و در انتهای هر تکرار عملگر جهش به بهترین ذره اعمال می‌شود (جهت اطلاعات بیشتر مطالعه [۴۱] به خواننده پیشنهاد می‌شود).

۷-۳- انتخاب مبتنی بر شکل دهی پرتو II (PESA-II)

PESA-II همانند همه الگوریتم‌های تکاملی دارای یک آرشیو جمعیت داخلی با اندازه ثابت است، در کنار این آرشیو یک آرشیو جمعیت خارجی با اندازه متغیر نیز دارد. آرشیو داخلی جواب‌های جدید حاصل از اعمال عملگرهای جهش و ترکیب به اعضای آرشیو خارجی را ذخیره می‌کند، و مجموعه آرشیو خارجی فقط شامل جواب‌های نامغلوب کشف شده در فرآیند جستجو می‌باشد. در این الگوریتم از یک تقسیم‌بندی شبکه‌ای فضای هدف جهت ایجاد تنوع استفاده می‌شود. تعداد جواب‌های درون یک فضای چند وجهی^۱ به عنوان چگالی آن فضا معرفی شده و جهت مشخص کردن جواب‌ها در دو فرآیند انتخاب آمیزشی^۲ و انتخاب محیطی^۳ در یک بهینه سازی چند هدفه به کار می‌رود.

برخلاف بسیاری از الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه (از جمله PESA) که فرآیند آمیزش بصورت فرد-مبنا^۴ صورت می‌گیرد در PESA-II این عمل منطقه-مبنا^۵ انجام می‌شود. یعنی ابتدا یک فضای چند وجهی انتخاب شده و سپس بصورت تصادفی از این چند وجهی عضوی برای اعمال عملگرهای ژنتیک انتخاب می‌گردد، بنابراین فضاهای چند وجهی بسیار شلوغ‌تر نسبت به چند وجهی‌های کم ازدحام‌تر سهم کمتری خواهند داشت.

در فرآیند انتخاب محیطی، اعضای کاندید موجود در آرشیو داخلی یکی یکی به مجموعه آرشیو خارجی وارد و

محیط گزیدی گام به گام به روزرسانی می‌شود. زمانی‌که کاندید جدیدی به آرشیو وارد می‌شود، تعدیل مناسب آرشیو و محیط گزیدی اجرا می‌شود. ابتدا، اعضای از آرشیو خارجی که مغلوب هستند از آرشیو حذف شده تا اعضای نامغلوب در این آرشیو باقی بمانند. در گام دوم، تغییر حدود محیط گزیدی پس از افزودن اعضای جدید در آرشیو کنترل می‌شود. در نهایت، اگر افزودن یک کاندید موجب شود اعضای آرشیو از حد تعیین شده بیشتر شود، به دلخواه یک عضو از پرازدحام ترین چند وجهی حذف خواهد شد. جهت مطالعه بیشتر به [۴۲] رجوع شود.

۷-۴- الگوریتم تکاملی مبتنی بر قوت پارتو (SPEA-II)

الگوریتم SPEA-II تکامل یافته الگوریتم SPEA است که برای نخستین بار در سال ۲۰۰۱ ارائه شد [۴۳]. این الگوریتم از دو آرشیو جمعیت داخلی و خارجی بهره می‌گیرد. آرشیو خارجی در ابتدای کار خالی است. پس از ارزیابی توابع هدف جمعیت داخلی، همه جواب‌های نامغلوب جمعیت فعلی آرشیو داخلی به آرشیو خارجی منتقل می‌شود. آرشیو خارجی به تکرار بعدی انتقال می‌یابد. در هر تکرار در صورتیکه تعداد اعضای آرشیو خارجی کمتر از اندازه از پیش تعیین شده برای الگوریتم باشد برای تکمیل مابقی جمعیت از جواب‌های مغلوب آرشیو داخلی آن تکرار و آرشیو خارجی تکرار قبل استفاده می‌شود. در SPEA-II تابع هدفی برای اعضای آرشیو داخلی و خارجی محاسبه شده و جهت رتبه دهی به جواب‌های با مقادیر مطلوبیت مشابه، از چگالی اطلاعات استفاده می‌شود. با توجه به ثابت بودن اندازه آرشیو خارجی در این روش از یک طرف در فرآیند اجرای الگوریتم هرگاه تعداد اعضای نامغلوب کمتر از میزان از پیش تعیین شده باشد از اعضای مغلوب نیز استفاده می‌شود و از طرف دیگر برای حذف اعضای مازاد آرشیو، نوعی روش انقطاع بدون استفاده از نقاط مرزی بکار می‌رود. همچنین در این روش فقط اعضای آرشیو خارجی در فرآیند آمیزش شرکت داده می‌شوند.

۷-۵- بررسی عملکرد روش‌ها

کشف جواب‌هایی هر چه نزدیک‌تر به جواب‌های پرتو بهینه (صحت^۶) و همچنین یافتن جواب‌هایی تا حد امکان

^۱ hyperbox
^۲ mating selection
^۳ environmental selection
^۴ individual-based
^۵ region-based

^۶ Accuracy

۳- معیار فاصله گذاری (spacing): این متریک با فاصله نسبی بین جواب‌های متوالی در مجموعه نامغلوب حاصل بدست آمده و معیاری است که برای اندازه‌گیری پراکندگی پاسخ‌های یافت شده نامغلوب در طول جبهه پرتو به کار می‌رود. این معیار با رابطه زیر قابل محاسبه است [۴۵].

$$SP = \sqrt{\frac{1}{nS} \sum_{i=1}^{nS} (d_i - \bar{d})^2} \quad (7)$$

که در رابطه بالا مقادیر d_i و $\bar{d}$ از روابط زیر بدست می‌آید.

$$d'_i = \min_{k \in nS/k \neq i} \left\{ \sum_{m=1}^M |f_m^i - f_m^k| \right\} \quad (8)$$

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^{nS} d'_i / nS \quad (9)$$

d'_i مقدار مینیمم مجموع قدرمطلق اختلاف در مقدار تابع هدف بین i امین جواب و سایر جواب‌ها در مجموعه نامغلوب حاصله بوده و متفاوت از کمترین فاصله اقلیدسی بین دو جواب است. با استفاده از این معیار الگوریتمی مطلوب‌تر است که جواب‌های نامغلوب آرشیو پرتو آن معیار فاصله‌گذاری کوچکتری داشته باشد.

۴- بیشترین گسترش (MS): اندازه‌ای از طول قطر مکعبی فضایی که توسط مقادیر انتهایی مجموعه جواب‌های نامغلوب در فضای هدف ساخته می‌شود را بیان می‌کند. هر چه این معیار دارای مقدار بزرگتری باشد، نشان‌دهنده گسترش بیشتر جواب‌های آرشیو پرتو است.

$$MS = \sqrt{\sum_{m=1}^M (\max_{i=1:nS} f_m^i - \min_{i=1:nS} f_m^i)^2} \quad (10)$$

۸- نتایج

جهت انجام این تحقیق داده‌های روزانه بازه‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۰، ۲۰۰۷-۲۰۰۳ و ۲۰۱۰-۲۰۰۸ از مجموعه داده‌های پیش‌گفته به ترتیب جهت آماده سازی، واسنجی و ارزیابی مدل به کارگرفته شد و به طور همزمان هر دو نوع داده وارد الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه شده که محدوده تغییرات پارامترهای X1، X2، X3 و X4 جهت جستجو و

متنوع در جبهه نامغلوب حاصل (تنوع)^۱، دو هدف متمایز و متعامد در فرآیند الگوریتم‌های چندهدفه می‌باشند. علاوه بر این، تعداد بیشتر جواب‌های مجموعه جواب نهایی الگوریتم‌های چند هدفه نیز نشان از قدرتمندی^۲ الگوریتم است [۷]. در [۷] معیارهای عملکرد متفاوتی در مورد الگوریتم‌های چند هدفه تکاملی بررسی شده است. در این مطالعه جهت مقایسه کارایی الگوریتم‌های مختلف، معیارهای تعداد جواب‌های بدست آمده پرتو^۳ (NPS)، فاصله نسلی^۴ (GD)، فاصله گذاری^۵ (SP)، بیشترین گسترش^۶ (MS) مورد استفاده قرار گرفتند که اولین بیانگر قدرتمندی، GD بیانگر صحت و دو معیار دیگر مبین خصوصیت تنوع هستند. هر یک از این معیارها در ادامه توضیح و نتایج محاسبه آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

۱- تعداد جواب‌های به دست آمده پرتو (NPS): این پارامتر مبین تعداد جواب‌های بهینه پارتوی به دست آمده می‌باشد و هر چه تعداد این جواب‌ها بیشتر باشد الگوریتم مناسب‌تر عمل کرده است.

۲- فاصله نسلی (GD): این کمیت مبین متوسط فاصله یک سری جواب‌های پارتو از یک پارتوی بهینه ایده آل بوده با توجه به این معیار، الگوریتمی عملکرد بهتری دارد که مقدار فاصله نسلی کمتری داشته باشد [۴۴].

$$GD = \frac{1}{nS} \left(\sum_{i=1}^{nS} d_i^p \right)^{1/p} \quad (5)$$

که اگر $p=2$ باشد، d_i فاصله اقلیدسی (در فضای هدف) بین جواب i ام پرتو تا پرتو واقعی و nS تعداد جواب‌های نامغلوب پرتو است و

$$d_i = \min \sqrt{\sum_{m=1}^M (f_m^{(i)} - f_m^{*(i)})^2} \quad (6)$$

که $f_m^{(i)}$ ، $f_m^{*(i)}$ i امین تابع هدف واقعی و $f_m^{(i)}$ تابع هدف i ام پرتو و M تعداد توابع هدف است.

^۱ Diversity
^۲ Cardinality
^۳ Number of Pareto Solutions
^۴ Generation Distance
^۵ SPacing
^۶ Maximum Spread

انتخاب مقدار بهینه به ترتیب (۴۰۰ : ۵۰)، (۱۵ : -۱۵)، (۳۵۰۰ : ۲۰) و (۳۰ : ۰/۱) در اجرای این الگوریتم‌ها به کار گرفته شده است. جزئیات به کارگیری روش‌های NSGA-II، MPSO، PESA-II و SPEA-II جهت پیدا کردن مقادیر پارامترهایی که موجب عملکرد بهینه مدل GR4J می‌شود و نتایج حاصله در ادامه آمده است.

جهت پیاده سازی الگوریتم‌های بهینه سازی برای واسنجی مدل GR4J پارامترهای الگوریتم‌های مورد استفاده

جدول ۳- پارامترهای اولیه الگوریتم‌های مورد استفاده و مقادیر آنها

الگوریتم	پارامترهای اولیه	مقادیر پارامترها	الگوریتم	پارامترهای اولیه	مقادیر پارامترها
NSGA-II	اندازه جمعیت	۵۰	PESA-II	جمعیت اولیه	۵۰
	نرخ جهش	۰/۹		نرخ جهش	۰/۸
	نرخ آمیزش	۰/۱		آمیزش	۰/۲
	تعداد تکرارها	۶۰		اندازه آرشیو خارجی	۵۰
MPSO	اندازه جمعیت	۵۰	SPEA-II	جمعیت اولیه	۵۰
	پارامتر فردی	۱		نرخ جهش	۰/۷
	پارامتر اجتماعی	۲		آمیزش	۰/۳
	اندازه آرشیو خارجی	۵۰		اندازه آرشیو خارجی	۵۰
	تعداد تکرارها	۶۰		تعداد تکرارها	۶۰

در معیار فاصله گذاری (SP)، که میزان چگالی جواب-های آرشیو پرتو را اندازه گیری می‌کند، NSGA-II بهتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است. معیار بیشترین گسترش (MS) نیز چگالی جواب‌های آرشیو پرتو را اندازه می‌گیرد و بدون در نظر گرفتن جواب‌های میانی و فقط با جواب‌های مرزی جهت ترسیم گستردگی جواب‌های آرشیو پرتو به کار می‌رود. محاسبات با استفاده از این معیار نشان از گستردگی بیشتر جواب‌های NSGA-II نسبت به سایر روش‌ها دارد.

۸-۲- انتخاب جواب از آرشیو پرتو و اجرای مدل

الگوریتم‌های بهینه‌یابی چند هدفه امکان دستیابی به مجموعه‌ای از جواب‌های نامغلوب یا همان آرشیو پرتو را فراهم می‌سازند. بسیاری از کاربران مدل‌های هیدرولوژیکی نیاز به اجرای مدل با اهداف مشخصی را دارند و برای این کار به یک جواب از آرشیو پرتو حاصل به عنوان پارامترهای حاصل از واسنجی دارند، از این‌رو در ادامه با استفاده از روش برنامه‌ریزی سازگار یا معیار عمومی، رتبه-بندی جواب‌های مجموعه پرتو صورت گرفت. در این روش جوابی که کمترین فاصله از نقطه مرجع را داشته باشد در صدر رتبه بندی قرار می‌گیرد.

۸-۱- عملکرد روش‌ها

جهت ارزیابی الگوریتم‌ها و شناسایی الگوریتم‌های کارا، چهار الگوریتم مطرح شده در بازه واسنجی (۲۰۰۷-۲۰۰۳) محاسبه شده و مقدار معیارهای محاسبه شده در جدول ۴ ارائه گردیده است.

تعداد جواب‌های نامغلوب یافت شده در همه الگوریتم‌ها ۵۰ است. مشاهده می‌شود که تمامی الگوریتم‌ها توانسته اند تا ماکزیمم حد مشخص شده برای آرشیو پرتو جمعیت نامغلوب پیدا کنند. با توجه به فاصله نسلی محاسبه شده در روش‌های مختلف این تحقیق الگوریتم MPSO کمترین فاصله بین جبهه پرتو حقیقی و پرتو برآورد شده را دارد و روش NSGA-II در آخرین جایگاه قرار دارد.

جدول ۴- نتایج معیارهای بررسی عملکرد روش‌ها

روش معیار	NSGA-II	MPSO	PESA-II	SPEA-II
NPS	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
GD	۰/۱۴۳۹	۰/۱۰۴۱	۰/۱۱۲۸	۰/۱۱۱۰
SP	۱/۱×۱۰ ^{-۱۴}	۹/۷×۱۰ ^{-۱۴}	۱/۲×۱۰ ^{-۱۴}	۱/۲×۱۰ ^{-۱۴}
MS	۲/۴۷۰۲	۱/۵۳۴۸	۰/۹۲۳۶	۱/۲۳۰۸

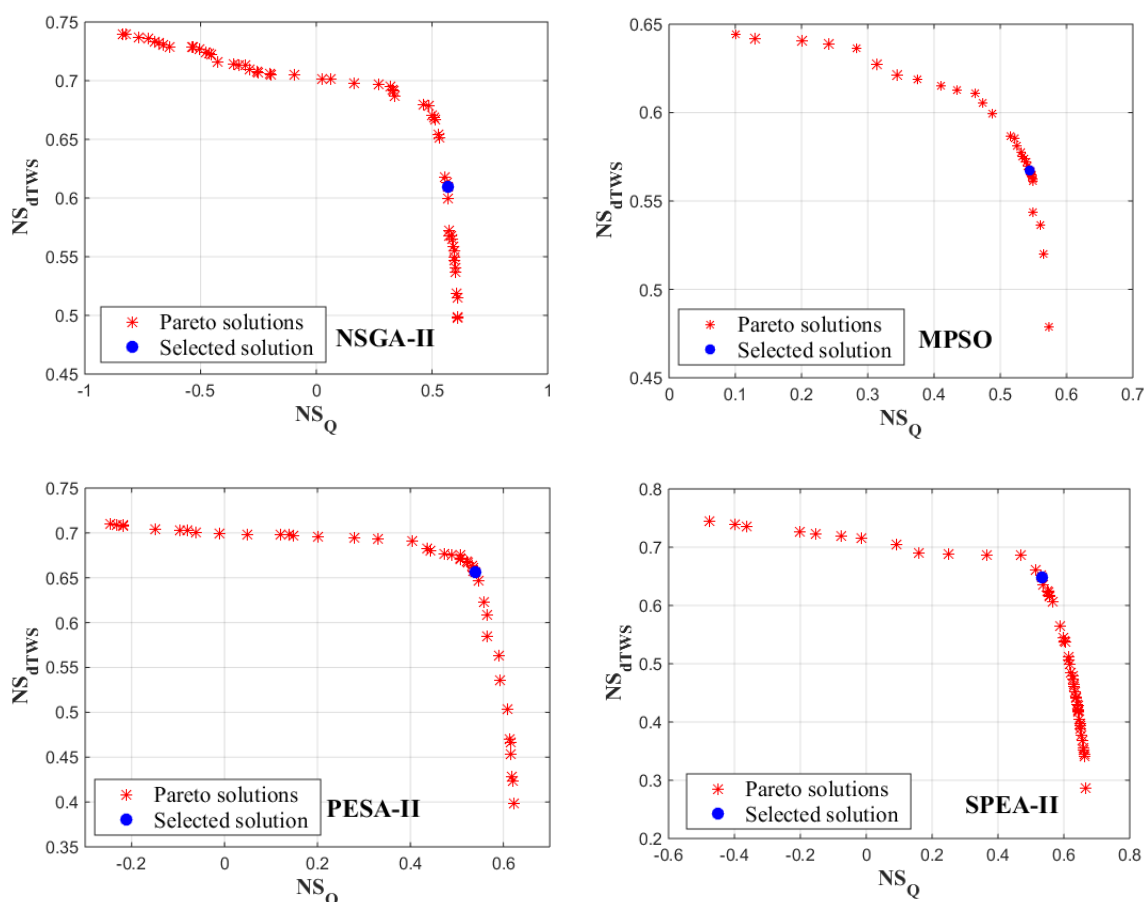
صعودی مقادیر هر دو تابع هدف در طی تکرارهای اولیه، پس از چندین تکرار توابع هدف تقریباً حول مقداری متوسط از دو تابع هدف تغییراتی از خود نشان می‌دهند بصورتی که با افزایش یک تابع هدف دیگری کاهش می‌یابد. مقدار متوسط توابع هدف در تمامی روش‌ها حدود عدد ۰/۶ است و این نتایج با مقادیر توابع هدف در آخرین تکرار (جدول ۵) نیز مطابقت دارد.

از آنجایی که بهینه سازی در این مطالعه با انتخاب NS به عنوان تابع هدف یک مسئله یافتن ماکزیمم مقدار است، روند صعودی اولیه تغییرات دو تابع هدف مطابق انتظار است و روند تغییرات بعدی آنها در هر روش نیز می‌تواند ناشی از همگرایی و نزدیکی الگوریتم به حد بهینه مسئله باشد. روند نزولی تغییرات فاصله نزدیکترین نقطه پرتو تکرارهای مختلف تا بهینه واقعی نیز در شکل ۷ برای روش‌های مختلف نشان داده شده است.

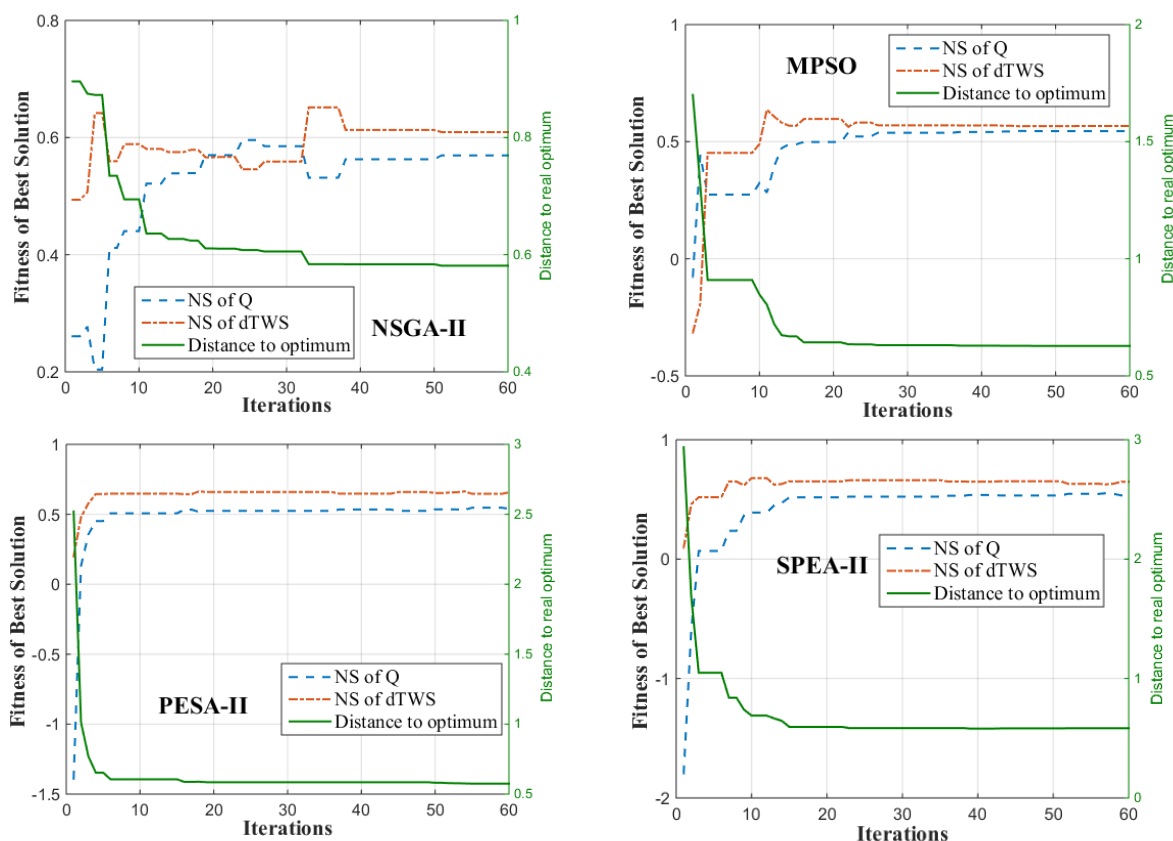
$$d_R(f, z) = \left(\sum_{m=1}^M |f_m(x) - z_m| \right)^{1/p} \quad (12)$$

که z_m نقطه مرجع مسئله بهینه سازی است. از یک طرف توابع هدف مورد استفاده در الگوریتم‌های این تحقیق ضریب NS محاسباتی از رواناب و ذخیره کلی آب است و از طرف دیگر مقدار بهینه این ضریب ۱ می‌باشد، بنابراین نقطه هدف بهینه ما برای دو تابع هدف ($z_1=1$, $z_2=1$) می‌باشد و در این مطالعه $p=2$ در نظر گرفته شده است. آرشیو پرتو هر روش در آخرین تکرار در شکل ۶ ارائه و همزمان جواب منتخب از هر پرتو که دارای کمترین فاصله از هدف بهینه یعنی ($NS_{SQ}=1$ و $NS_{dTWS}=1$) می‌باشد با رنگ آبی نمایش داده شده است.

شکل ۷ روند همگرایی و رفتار توابع هدف عضو منتخب پرتو هر تکرار را همزمان با فاصله آن عضو از هدف بهینه واقعی را برای روش‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در تمامی روش‌ها پس از نوسانات و روند شدید



شکل ۶- جواب‌های آرشیو پرتو (ستاره‌های قرمز) و نقطه منتخب (نقاط آبی) در آخرین تکرار هر روش. NSGA-II با ۵۰ عضو (بالا چپ)، MPSTO با ۳۰ عضو (بالا راست)، PESA-II با ۵۰ عضو (پایین چپ) و SPEA-II با ۵۰ عضو (پایین راست)



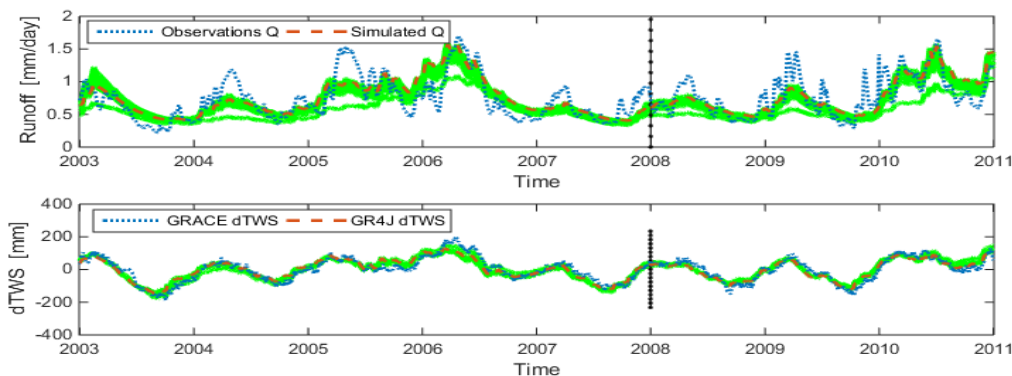
شکل ۷- تغییرات توابع هدف عضو منتخب پرتو هر روش (خط چین آبی، NS محاسباتی از رواناب، خط نقطه قرمز، NS تغییرات ذخیره کلی آب) و تغییرات فاصله آن عضو از مقدار هدف بهینه واقعی در تکرارهای مختلف. (NSGA-II بالا چپ، MPSO بالا راست، PESA-II پایین چپ و SPEA-II پایین راست)

دوره‌های واسنجی و ارزیابی در جدول ۵ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر NS برای دوره‌های مختلف بالاتر از ۰/۵ است که با توجه به دستورالعمل ارائه شده جهت ارزیابی مدل‌ها توسط موریاسی و همکاران [۳۷] این مقادیر نشان دهنده رضایت بخش بودن فرآیندهای شبیه‌سازی مدل با پارامترهای برآورد شده توسط همه روش‌های می‌باشد.

پس از بررسی نتایج روش‌های مختلف بهینه‌سازی در انتخاب پارامترهای واسنجی، بایستی عملکرد مدل کالیبره شده مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور ضریب NS در دوره‌های واسنجی و ارزیابی محاسبه گردید. پارامترهای برآورد شده منتخب از آرشیو پرتو الگوریتم‌های مختلف برای مدل GR4J و ضرایب بهره‌وری NS محاسبه شده برای رواناب و تغییرات ذخیره آب حاصل از اجرای مدل در

جدول ۵- ضرایب NS محاسبه شده برای دوره‌های واسنجی (۲۰۰۳-۲۰۰۷) و ارزیابی (۲۰۰۸-۲۰۱۰) در استفاده از الگوریتم‌های مختلف جهت تعیین پارامترهای مدل و پارامترهای بهینه برآورد شده هر روش در دوره واسنجی

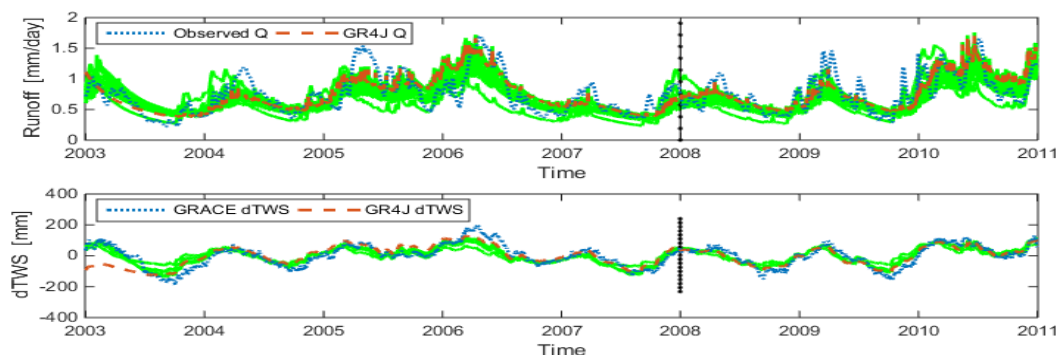
روش	متغیر	واسنجی (2003-2007)	ارزیابی (2008-2010)	پارامترهای برآورد شده			
				X4	X3	X2	X1
NSGA-II	Q	۰/۵۷	۰/۵۴	۱۲/۱۷	۴۹۷/۹۲	۱۲/۶۷	۴۲۶/۶۱
	dTWS	۰/۶۱	۰/۵۵				
MOPSO	Q	۰/۵۴	۰/۵۲	۰/۱۹	۶۸۱/۸۲	۱۴/۹۳	۳۱۶/۹۱
	dTWS	۰/۵۷	۰/۵۰				
PESA-II	Q	۰/۵۴	۰/۵۰	۱۶/۳۳	۴۰۶/۲۱	۱۰/۸۶	۵۳۵/۱۶
	dTWS	۰/۶۶	۰/۵۱				
SPEA-II	Q	۰/۵۳	۰/۴۹	۱۷/۹۵	۵۱۸/۷۰	۱۳/۲۱	۴۷۴/۵۷
	dTWS	۰/۶۵	۰/۵۳				



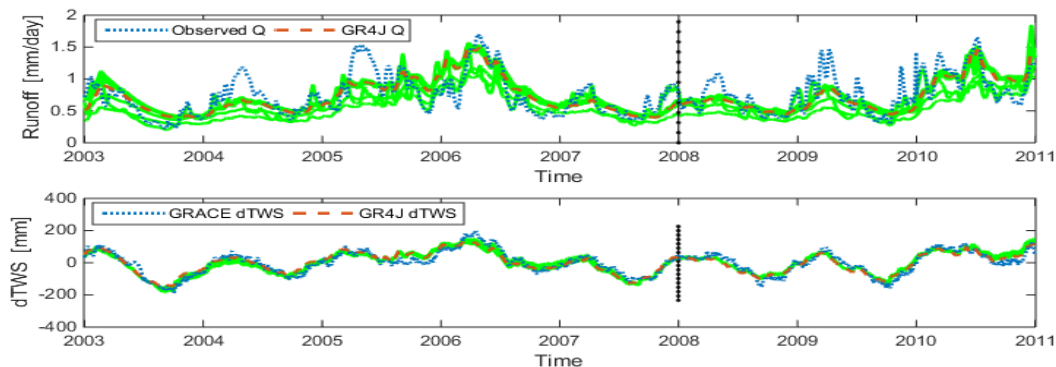
شکل ۸- مقادیر رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی گریس مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل GR4J (بالا رواناب و پایین تغییرات ذخیره آب کلی؛ آبی: مشاهداتی، قرمز شبیه سازی با جواب منتخب از آرشیو پرتو، سبز شبیه سازی حاصل از سایر اعضای جبهه پرتو) در الگوریتم NSGA-II

سری‌های شبیه سازی رواناب در مقایسه با تغییرات ذخیره آب نوسانات و تغییرات بیشتری نسبت به سری شبیه سازی شده حاصل از پارامترهای ارائه شده توسط عضو منتخب پرتو از خود نشان می‌دهد که می‌تواند بیانگر حساسیت بیشتر رواناب به تغییر پارامترهای مدل باشد. همچنین در تمامی روش‌ها، منتخب تغییرات ذخیره آب شبیه سازی شده برازش بهتری نسبت به رواناب شبیه سازی شده منتخب دارد که این موضوع با ضرائب NS جدول ۵ نیز تأیید شده است.

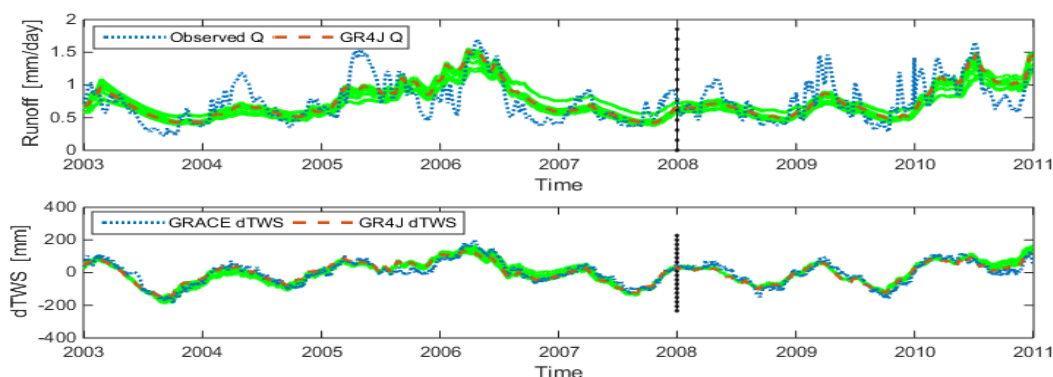
همچنین مقایسه بین رواناب مشاهداتی و شبیه سازی شده، تغییرات ذخیره آب کلی گریس و شبیه سازی شده در دوره‌های واسنجی و ارزیابی در اشکال ۸ تا ۱۱ نشان داده شده است. مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از اجرای مدل با در نظر گرفتن مقادیر اعضای پرتو آخرین تکرار هر روش به عنوان پارامترهای مدل GR4J بدست آمده است. که به رنگ سبز ترسیم شده‌اند. شبیه سازی مدل با استفاده از پارامترهای عضو منتخب پرتو نهایی هر روش با رنگ قرمز نشان داده شده است. در تمامی روش‌ها



شکل ۹- مقادیر رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی گریس مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل GR4J (بالا رواناب و پایین تغییرات ذخیره آب کلی؛ آبی: مشاهداتی، قرمز شبیه سازی با جواب منتخب از آرشیو پرتو، سبز شبیه سازی حاصل از سایر اعضای جبهه پرتو) در الگوریتم MPSP



شکل ۱۰- مقادیر رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی گریس مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل GR4J (بالا رواناب و پایین تغییرات ذخیره آب کلی؛ آبی: مشاهداتی، قرمز شبیه سازی با جواب منتخب از آرشیو پرتو، سبز شبیه سازی حاصل از سایر اعضای جبهه پرتو) در الگوریتم PESA-II



شکل ۱۱- مقادیر رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی گریس مشاهداتی و شبیه سازی شده توسط مدل GR4J (بالا رواناب و پایین تغییرات ذخیره آب کلی؛ آبی: مشاهداتی، قرمز شبیه سازی با جواب منتخب از آرشیو پرتو، سبز شبیه سازی حاصل از سایر اعضای جبهه پرتو) در الگوریتم SPEA-II

۹- نتیجه گیری

از آنجایی که اغلب واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی با روش‌های بهینه سازی تک هدفه جهت بهبود همه جنبه‌های مختلف عملکرد مدل کافی نیست در این مقاله روش‌های بهینه سازی چندهدفه NSGA-II، MPSO، PESA-II و SPEA-II جهت واسنجی اتوماتیک مدل هیدرولوژیکی GR4J و بهبود عملکرد مدل از دو منظر رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی منطقه به کار گرفته شدند. پس از انتخاب پارامترهای الگوریتم‌ها به صورت تجربی و اجرای آنها، جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها چهار معیار NPS، GD، SP و MS برای هر الگوریتم محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که تعداد جواب‌های پرتو که بیانگر قدرتمندی الگوریتم‌هاست برای همه الگوریتم‌ها ۵۰ بدست آمده است. الگوریتم NSGA-II بجز در پارامتر GD که بیانگر نزدیکی مجموعه جواب‌های پرتو به پرتو بهینه است و در رتبه چهارم قرار دارد از بقیه الگوریتم‌ها عملکرد بهتری دارد که این معیارها فقط مربوط به پراکندگی جبهه پرتو برآورد شده است. پس نمی‌توان این روش را به عنوان الگوریتمی با بهترین عملکرد برگزید ولی الگوریتم MPSO از دو الگوریتم PESA-II و SPEA-II در همه معیارها و از الگوریتم NSGA-II فقط در معیار مربوط به خصوصیت نزدیکی جواب‌های پرتو به جواب‌های پرتو بهینه بهتر عمل کرده است. در حقیقت الگوریتم MPSO از نظر معیار صحت

و الگوریتم NSGA-II از نظر معیار تنوع عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. بایستی متذکر شد که مقایسه صورت گرفته برای مسئله واسنجی مدل GR4J در حوضه دانوب می‌باشد و نتایج را نمی‌توان به سایر مسائل تعمیم داد و جهت تشخیص برتری مطلق یک روش نسبت به سایر روش‌ها، نیاز به حل مسائل بیشتر و استفاده از آزمون‌های متنوع‌تری می‌باشد. پس از اتمام هر الگوریتم، از بین جواب‌های پرتو آن الگوریتم، جوابی که به بهینه مطلق مسئله نزدیک‌تر است انتخاب شده و مدل با پارامترهای حاصل از آن جواب اجرا شد و عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب و تغییرات ذخیره آب کلی در دوره‌های واسنجی و ارزیابی بررسی شد که نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول مدل در هر دو متغیر و هر دو دوره است. البته بدلیل گستردگی حوضه دانوب و تنوع آب و هوایی درون حوضه (مناطق کوهستانی و مرتفع در غرب و مناطق پست و جلگه‌ای در شرق) و استفاده از داده‌های مدل‌های جهانی به جای داده‌های زمینی و همچنین سادگی ساختار مدل انتظار نتایج بهتری در ارزیابی مدل نیز نبود. در این تحقیق استفاده از داده‌های ثقل سنجی در فرآیند واسنجی منجر به تعیین مقادیر پارامترهای مدل به نحوی شد که عملکرد مدل علاوه بر شبیه سازی رواناب در شبیه سازی مولفه‌ای دیگر از خصوصیات هیدرولوژیکی منطقه (تغییرات ذخیره آب کلی) نیز بهبود یابد.

مراجع

- [1] Beven, K., (2001). Rainfall-Runoff Modelling: The Primer, John Wiley and Sons, Ltd, 360.
- [2] Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. Water Resources Research, 34(4), 751-763.

- [3] Sorooshian, S., and Gupta, V. K., (1995). Model calibration, in Computer Models of Watershed Hydrology, edited by V. P. Singh, pp. 23 – 68, Water Resour. Publ., Highlands Ranch, Colo.
- [4] Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water resources research*, 28(4), 1015-1031.
- [5] Duan, Q. (2003). Global optimization for watershed model calibration. *Calibration of watershed models*, 89-104. American Geophysical Union: Washington DC, USA; 89–104.
- [6] Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Bouten, W., & Sorooshian, S. (2003). Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research*, 39(8).
- [7] Deb, K. (2001). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms (Vol. 16). John Wiley & Sons.
- [8] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- [9] Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of hydrology*, 204(1), 83-97.
- [10] Li, X., Weller, D. E., & Jordan, T. E. (2010). Watershed model calibration using multi-objective optimization and multi-site averaging. *Journal of Hydrology*, 380(3), 277-288.
- [11] Madsen, H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in water resources*, 26(2), 205-216.
- [12] Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.
- [13] Deckers, D. L., Booij, M. J., Rientjes, T. H., & Krol, M. S. (2010). Catchment variability and parameter estimation in multi-objective regionalisation of a rainfall-runoff model. *Water resources management*, 24(14), 3961-3985.
- [14] Dumedah, G. (2012). Formulation of the evolutionary-based data assimilation, and its implementation in hydrological forecasting. *Water resources management*, 26(13), 3853-3870.
- [15] Guo, J., Zhou, J., Zou, Q., Liu, Y., & Song, L. (2013). A novel multi-objective shuffled complex differential evolution algorithm with application to hydrological model parameter optimization. *Water resources management*, 27(8), 2923-2946.
- [16] Efstratiadis, A., & Koutsoyiannis, D. (2010). One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 55(1), 58-78.
- [17] Schumacher, M., Kusche, J., & Döll, P. (2016). A systematic impact assessment of GRACE error correlation on data assimilation in hydrological models. *Journal of Geodesy*, 1-23.
- [18] Werth, S., Güntner, A., Petrovic, S., & Schmidt, R. (2009). Integration of GRACE mass variations into a global hydrological model. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(1), 166-173.
- [19] Xie, H., Longuevergne, L., Ringler, C., & Scanlon, B. R. (2012). Calibration and evaluation of a semi-distributed watershed model of Sub-Saharan Africa using GRACE data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3083-3099.
- [20] ICPDR. (2005). The Danube River Basin District. Part A: Basin-wide overview. ICPDR Document IC/084. International Commission for the Protection of the Danube River, Vienna, Austria.
- [21] Kovács, P. (2010). Characterization of the runoff regime and its stability in the Danube Catchment. In *Hydrological Processes of the Danube River Basin* (pp. 143-173). Springer Netherlands.
- [22] Schiller, H., Miklós, D., & Sass, J. (2010). The Danube River and its basin physical characteristics, water regime and water balance. In *Hydrological Processes of the Danube River Basin* (pp. 25-77). Springer Netherlands.
- [23] Edijatno, DE OLIVEIRA NASCIMENTO, N. I. L. O., YANG, X., MAKHLOUF, Z., & MICHEL, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 263-277.
- [24] Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, (2), 113-122.
- [25] Nascimento, N. D. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'actions anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle d'un bassin versant (Doctoral dissertation, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).
- [26] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242(3), 275-301.

- [27] Yang, X., & Michel, C. (2000). Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating. *Hydrological Sciences Journal*, 45(4), 537-546.
- [28] Hublart, P., Ruelland, D., Atauri, I. G. D. C., & Ibacache, A. (2015). Reliability of a conceptual hydrological model in a semi-arid Andean catchment facing water-use changes. *Proc. IAHS*, 371, 203-209.
- [29] Demirel, M. C., Booij, M., & Hoekstra, A. (2015). The skill of seasonal ensemble low-flow forecasts in the Moselle River for three different hydrological models.
- [30] Bennett, J. C., Robertson, D. E., Ward, P. G., Hapuarachchi, H. P., & Wang, Q. J. (2016). Calibrating hourly rainfall-runoff models with daily forcings for streamflow forecasting applications in meso-scale catchments. *Environmental Modelling & Software*, 76, 20-36.
- [31] Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275-289.
- [32] Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *Science*, 305(5683), 503-505.
- [33] Kurtenbach, E., Eicker, A., Mayer-Gürr, T., Holschneider, M., Hayn, M., Fuhrmann, M., & Kusche, J. (2012). Improved daily GRACE gravity field solutions using a Kalman smoother. *Journal of Geodynamics*, 59, 39-48.
- [34] Wahr, J., Molenaar, M., & Bryan, F. (1998). Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12), 30205-30229.
- [35] Tan, K. C., Lee, T. H., & Khor, E. F. (2002). Evolutionary algorithms for multi-objective optimization: performance assessments and comparisons. *Artificial intelligence review*, 17(4), 251-290.
- [36] Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- [37] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- [39] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 6(2), 182-197.
- [40] Li, X. (2003, July). A non-dominated sorting particle swarm optimizer for multiobjective optimization. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference* (pp. 37-48). Springer Berlin Heidelberg.
- [41] Durillo, J. J., García-Nieto, J., Nebro, A. J., Coello, C. A. C., Luna, F., & Alba, E. (2009, April). Multi-objective particle swarm optimizers: An experimental comparison. In *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (pp. 495-509). Springer Berlin Heidelberg.
- [42] Corne, D. W., Jerram, N. R., Knowles, J. D., & Oates, M. J. (2001). PESA-II: Region-based selection in evolutionary multiobjective optimization. In *Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference (GECCO'2001)*.
- [43] Laumanns, M. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH), Institut für Technische Informatik und Kommunikationsnetze (TIK).
- [44] Van Veldhuizen, D. A. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations (No. AFIT/DS/ENG/99-01). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH SCHOOL OF ENGINEERING.
- [45] Scott, J. R. (1995). Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithms. Master's thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology.