

واسنجی خودکار مدل پیوسته بارش-رواناب HMS-SMA با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی (مطالعه موردی: حوضه آبریز کسلیان)

فهیمة سرتیپ^۱، فریدون رادمنش^{۲*}، حیدر زارعی^۳ و میثم سالاری جزی^۴

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- نویسنده مسئول، دانشیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. radmanesh@scu.ac.ir
۳- دانشیار گروه هیدرولوژی و منابع آب، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

تاریخ پذیرش: ۹۵/۷/۱۱

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۲۲

چکیده

در این تحقیق هدف ارائه یک مدل واسنجی خودکار براساس کلونی مورچه‌ها برای مدل احتساب رطوبت خاک HMS-SMA می‌باشد. برای این منظور حوضه معرف کسلیان به‌عنوان مطالعه موردی در این تحقیق مد نظر قرار گرفت. در مدل‌های پیوسته بارش-رواناب، تعدد پارامترهای در نظر گرفته‌شده مدل، علاوه بر این که سبب دشواری واسنجی به روش سعی و خطا می‌شوند، امکان واسنجی خودکار بسته نرم‌افزاری مورد نظر را نیز از بین می‌برد. الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها با تکیه بر تابع شدت احتمالاتی پیوسته می‌تواند به‌منظور واسنجی مدل پیوسته بارش-رواناب به‌کار رود. برای این منظور در تحقیق حاضر با انتخاب مدل پیوسته بارش-رواناب HMS-SMA، برای غلبه بر ضعف موجود از یک برنامه بهینه‌ساز خارجی (الگوریتم کلونی مورچه‌ها یا ACOR) جهت برآورد رواناب در مقیاس زمانی شش‌ماهه در حوضه معرف کسلیان استفاده شد. برای ارزیابی مدل ارائه شده، از چهار سال آبی برای واسنجی و از چهار سال آبی دیگر برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. معیار نش-ساتکلیف به‌عنوان تابع هدف در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت که نتایج حاصل در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی همگی در محدوده خوب و قابل قبول واقع شد.

کلید واژه‌ها: HMS-SMA، الگوریتم کلونی مورچه‌ها (ACOR)، حوضه کسلیان، واسنجی، نش-ساتکلیف.

مقدمه

وقایع بارش در نظر گرفته نمی‌شود، در مقابل مدل‌های پیوسته دوره‌های طولانی‌تری برای برآورد پاسخ اطلاعات هیدرولوژیک حوضه در طول وقایع بارش و ما بین آن‌ها در نظر می‌گیرند (Lastoria, 2008). مرکز مهندسی هیدرولوژیک ارتش آمریکا (HEC) در راستای مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته و براساس مدل PRMS، الگوریتم احتساب رطوبت خاک Soil Moisture Accounting (SMA) Accounting (SMA) را به نرم افزار HMS اضافه نمود (Bennett, 1998). محققان بسیاری تاکنون از قابلیت شبیه‌سازی پیوسته و تک‌رخداد HEC-HMS در محدوده وسیع جغرافیایی از نواحی نیمه خشک تا مرطوب بهره برده‌اند، Cunderlik و Simonovic (2004) در تحقیقی به بررسی واسنجی و صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت مدل HEC-HMS در دو حالت تک‌رخدادی و پیوسته در حوضه بالادست رودخانه تایمز پرداختند. آن‌ها با توجه به پیچیدگی مدل‌سازی و ضعف الگوریتم‌های به‌کار رفته در HMS در جهت واسنجی، از روش دستی برای واسنجی مدل استفاده کردند. معیارهای آماری مختلفی جهت ارزیابی نتایج مدل بکار گرفته شد. در تحقیق آن‌ها ارزیابی و صحت‌سنجی مدل و تحلیل حساسیت را نیز مد نظر قرار

مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب در بسیاری از برنامه‌های کاربردی منابع آب مانند کنترل سیل، مدیریت خشکسالی و ... می‌تواند به‌کار گرفته شود. گرچه مدل‌سازی‌ها هم به‌صورت تک‌رخداد و هم به‌صورت پیوسته است اما مدل‌سازی‌ها معمولاً به‌صورت تک-رخداد بوده و مدل‌سازی‌های پیوسته به‌ویژه در کشور ما کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در مدل‌های پیوسته در مقایسه با مدل‌های تک-رخداد، پارامترهای هیدرولوژیکی بیشتری دخالت داده شده که این امر باعث پیچیده‌تر شدن مدل‌سازی‌ها می‌گردد، اما در عوض دو مزیت عمده در بردارند: اول این که از آن‌جایی که حوضه یک سیستم هیدرولوژیکی پیچیده است و پارامترهای زیادی در رواناب حاصل از بارش آن دخالت دارند. پس هر چه پارامترهایی که در مدل کردن رواناب حوضه نقش دارند، کامل‌تر باشد، شرایط واقعی‌تری از سیستم هیدرولوژیکی حوضه را ترسیم خواهد نمود، دوم این که در سیستم‌های پیوسته می‌توان وضعیت منابع آب سطحی را در یک مدت زمان طولانی بررسی نمود و براساس آن تصمیم‌گیری نمود. مدل‌های تک‌رخداد تنها یک واقعه بارش را شبیه‌سازی می‌کنند از این رو رطوبت میان

حل کنند که بسیاری از این روش‌ها الهام‌گرفته از طبیعت است. الگوریتم‌های فراکاووشی (الگوریتم بهینه‌سازی کلونی مورچه‌ها) از جمله روش‌های مذکور می‌باشد، از این رو هدف از تحقیق حاضر واسنجی مدل HMS-SMA با استفاده از الگوریتم فوق می‌باشد.

مواد و روش‌ها

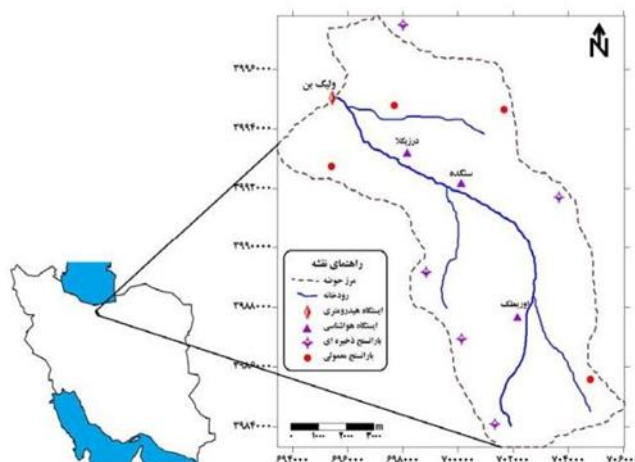
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کسلیان، دومین حوضه آبریز معروف کشور، بین عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 07' 45''$ تا $35^{\circ} 58' 45''$ شمالی و طول‌های $10^{\circ} 30'$ تا $53^{\circ} 17' 30''$ شرقی واقع شده است. مساحت این حوضه $67/5$ کیلومترمربع بوده و بین ارتفاعات 1100 تا 2900 متری از سطح آب‌های آزاد قرار گرفته است. حوضه دارای یک ایستگاه هیدرومتری در محل خروجی‌اش در روستای ولیک‌بن می‌باشد. همچنین دارای دو ایستگاه کلیماتولوژی، سه ایستگاه باران‌سنجی معمولی و هفت ایستگاه باران‌سنج ذخیره‌ای در ارتفاعات می‌باشد که از میان ایستگاه‌های واقع در این حوضه، کامل‌ترین بارندگی مربوط به ایستگاه سنگده با بیست و نه سال آمار می‌باشد. شکل (۱) موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری بر روی نقشه توپوگرافی حوضه آبریز معرف کسلیان نشان می‌دهد.

جمع آوری و آماده سازی اطلاعات

برای شبیه‌سازی و استخراج پلی‌گون تپسن از داده‌های ۱۶ ساله بارش (۱۳۷۶-۱۳۶۰) سه ایستگاه باران‌سنج (شکل ۱) در مقیاس روزانه و همچنین داده‌های روزانه دبی ایستگاه ولیک‌بن به‌عنوان تنها ایستگاه هیدرومتری حوضه برای دبی‌های مشاهداتی استفاده شد، همچنین داده‌های تبخیر ایستگاه سنگده در مقیاس روزانه در طول دوره آماری تهیه شد.

دادند. Fleming و Neary (2004) در تحقیقی به تعیین پارامترها و واسنجی مدل SMA با استفاده از نرم‌افزار HMS پرداختند، آن‌ها ۱۲ پارامتر از پارامترهای SMA را کالیبره نمودند. مطالعه آن‌ها نشان داد که می‌توان پارامترهای مربوط به مدل SMA را با استفاده از مقادیر ثبت شده داده‌های جریان در گذشته و بر مبنای GIS استخراج نمود. در این تحقیق مقادیر چهار مورد از پارامترهای بدست آمده بر اساس داده‌های گذشته و یک مورد بر اساس GIS بعد از واسنجی به‌طور متوسط ۳۷ درصد تغییر پیدا کرده است. آن‌ها شبیه‌سازی خود را به صورت سالانه، شش ماهه و فصلی در دو دوره خشک و تر انجام دادند و نشان دادند که نتایج مدل‌سازی فصلی و شش ماهه نسبت به مدل‌سازی سالانه نتایج بهتری را ارائه می‌دهد، و در پایان مدل‌سازی بر مبنای شش ماهه را پیشنهاد کردند چرا که عملکرد بهتری بدون آن که نیاز به واسنجی برای مدل‌سازی فصلی داشته باشد، ارائه می‌دهد البته نوع واسنجی آن‌ها به صورت دستی بوده است. Buzzella (2013) به‌منظور مقایسه داده‌های بارش به‌دست آمده از روش‌های مختلف از مدل‌سازی هیدرولوژیکی پیوسته HMS-SMA استفاده کرد. از الگوریتم DDS Dynamically dimensioned search برای واسنجی خودکار مدل استفاده نمود، همچنین از تابع هدف RMSE به‌عنوان تنها تابع هدف در این تحقیق بهره جست. اما با این حال ذوب برف را علت تطابق نامناسب مدل خود با داده‌های اندازه‌گیری شده ذکر کرد. با توجه به تحقیقات گذشته مشاهده شد که اکثر تحقیقات برای واسنجی از روش دستی برای دستیابی به اهداف خود استفاده نمودند که این امر نشان‌دهنده این است که حل بسیاری از مسائل پیچیده (مدل HMS-SMA به‌دلیل بالا بودن پارامترهای مدل) بدون استفاده از روش‌های بهینه‌سازی اگر غیرممکن نباشد، امری دشوار و پرهزینه است. به‌همین دلیل محققین سعی بر آن دارند تا با استفاده از روش‌های نوین در زمان کم مسائل بهینه‌سازی را



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری بر روی نقشه توپوگرافی حوضه آبریز معرف کسلیان

درجه بندی می کند. در تحقیق حاضر تحلیل حساسیت به گونه ای صورت گرفته است که هر پارامتر مدل به میزان $\pm 10\%$ تغییر کرده و اثر آن بر روی مدل بررسی شده است.

واستجی

روش های جستجوی موجود در نرم افزار HMS جهت کالبره کردن عبارتند از:

- روش جستجوی شیب یک متغیره Univariate Gradient
- روش نلدر مید Nelder Mead

اما از آن جایی که در این دو روش جستجوها به صورت موضعی انجام می پذیرد دارای ضعف های از جمله حساس بودن به مقادیر اولیه پارامترها و نیافتن جواب بهینه هستند. از این رو از الگوریتم فراکاشی (الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه ها) جهت واسنجی در تحقیق حاضر استفاده شده است.

الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه ها

الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه ها برگرفته از رفتار کاوش گرانه مورچه ها، اولین بار برای مسائل بهینه سازی ترکیبی (جایگشتی) پیشنهاد شد. مسائلی همچون برنامه ریزی، مسیریابی حرکت وسایل نقلیه، جدول زمانی و ... از جمله مسائل بهینه سازی ترکیبی به شمار می روند که بسیاری از این مسائل پیچیده هستند. این الگوریتم به دو صورت گسسته و پیوسته می باشد.

الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه ها برای دامنه های پیوسته (Ant colony optimization for \mathbb{R}) domain (continuous):

کاربرد الگوریتم مورچه به خاطر طبیعت گسسته اش، برای دامنه های پیوسته مشکل می باشد، اولین کارها در مورد الگوریتم مورچه پیوسته به تحقیقات Bilchev و Parmee (1995)، Monmarche et al. (2000)، Siarry و Dreo (2002)، Mathur et al. (2000) و Socha و Dorigo (2008) مربوط می شود. از آن جایی که بسیاری از مسائل کاربردی مطرح، دارای متغیرهای تصمیمی هستند که دامنه آن ها پیوسته می باشد، بنابراین الگوریتم AC که ذاتاً برای مسائل گسسته به وجود آمده است، قابل کاربرد برای این گونه مسائل نخواهد بود. گرچه نسخه های مختلفی از این الگوریتم برای دامنه های پیوسته توسعه داده شد، اما هر یک ضعف های به خصوص خود را داشت. ولی از این میان الگوریتم بهینه سازی که توسط Socha و Dorigo (2008) مطرح شد، با الگوریتم گسسته (اصل الگوریتم مورچه که برای مسائل گسسته توسعه داده شد) بیشترین هم خوانی را داشته و روند آن ها بسیار به هم نزدیک است. همچنین Socha و Dorigo (2008) نشان دادند که این الگوریتم قدرت بالایی در پیدا نمودن جواب بهینه دارد. به همین خاطر در این مطالعه الگوریتم Socha و Dorigo (2008) مورد استفاده قرار گرفت. روند کلی اجرای این الگوریتم به شرح ذیل است:

مدل احتساب رطوبت خاک (SMA)

الگوریتم احتساب رطوبت خاک (SMA) برخلاف سایر روش های محاسبه تلفات، سهم آب زیرزمینی و تبخیر و تعرق پتانسیل را در محاسبه جریان خروجی از حوضه در نظر می گیرد. به عبارتی می توان گفت این مدل حرکت آب و ذخیره آن را در گیاهان، سطح خاک و عمق خاک و لایه های زیرزمینی شبیه سازی کرده و با داشتن مقدار بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET)، جریان سطحی و جریان آب زیرزمینی، تلفات ناشی از تبخیر و تعرق و نفوذ را روی کل حوضه آبریز محاسبه می کند. ورودی های مدل، داده های باران، تبخیر و تعرق پتانسیل و خروجی های آن باران مازاد، جریان آب زیرزمینی و نفوذ عمقی می باشد. هیدروگراف باران مازاد با استفاده از یکی از روش های انتقال رواناب بسته به نوع حوضه (روش کلارک) محاسبه و در خروجی حوضه با هیدروگراف های جریان آب زیرزمینی ترکیب می شود. مدل با استفاده از یک سری لایه های ذخیره کننده حوضه آبریز را تبیین می کند.

تخمین مقادیر اولیه و محدوده پارامترهای مدل

به علت استفاده از روش محاسبه تلفات احتساب رطوبت خاک (SMA)، تعداد پارامترهایی که باید تخمین زده شود، نسبت به دیگر روش های تلفات افزایش می یابد. از این رو در شبیه سازی بارش-رواناب حوضه توسط این مدل نیاز به تخمین اولیه ۲۴ پارامتر می باشد که از این تعداد ۱۸ پارامتر آن مربوط به روش SMA، ۲ پارامتر روش کلارک و نهایتاً ۴ پارامتر مربوط به دبی پایه است.

تخمین پارامترهای لایه های برگاب، چالاب و لایه پروفیل خاک با استفاده از جداول و روابطی که توسط Bennet (1998)، Peters و Bennet (2000)، Rawls et al. (1982)، Saxton et al. (1986)، Skaggs و Khaleel (1982) و تهیه شده، تعیین گردید. اما در لایه آب زیرزمینی ۱ و ۲ به دلیل نبود اطلاعاتی در مورد میزان نفوذ عمقی از لایه اول آب زیرزمینی مقدار آن را برابر با نصف مقدار نفوذ عمقی از لایه خاک و میزان نفوذ عمقی برای لایه دوم آب زیرزمینی بین دامنه ۰/۰۵-۰/۰۲۵ میلی متر بر ساعت برگزیده شد (Garcia et al, 2008).

برای تعیین پارامترهای عمق ذخیره لایه زیرزمینی ۱ و ۲ و ضریب ذخیره آن ها باید از منحنی فروکش هیدروگراف های گذشته استفاده شود که برای پارامترهای روش مخزن خطی (روش جداسازی دبی پایه که به علت انتخاب روش SMA باید در نظر گرفته شود) همان پارامترهای ضریب ذخیره لایه اول و دوم آب زیرزمینی در نظر گرفته شد (Fleming and Neary, 2004).

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت روشی است که تعیین می کند کدام یک از پارامترهای مدل تاثیر بیشتری روی نتایج آن دارد. از سوی دیگر پارامترهای مدل را براساس سهم شان در خطای پیش بینی مدل

که q یک پارامتر الگوریتم است. وقتی مقدار آن کوچک است روی بهترین جواب از لحاظ رتبه تاکید می‌کند و وقتی بزرگتر باشد احتمال انتخاب جواب‌های بد نیز میسر شده و به سمت احتمال انتخاب یکنواخت نزدیک می‌شود. همان‌طور که گفته شد رویه نمونه برداری بصورت بُعد به بُعد است، بدین معنی که اگر لازم باشد یک نقطه جدید با استفاده از جدول مذکور تولید شود هر مولفه آن نقطه بطور مستقل از سایر ابعاد آن نقطه تولید می‌شود. برای نمونه‌برداری و تولید بعد i -ام آن نقطه با توجه به وزن اختصاصی هر یک از میانگین‌ها که در بالا تعریف شد یک میانگین انتخاب شده و سپس براساس تابع گوسی تعریف شده مربوطه از اطراف آن میانگین نمونه‌برداری می‌شود.

مدت زمان واسنجی و صحت‌سنجی و معیارهای اندازه‌گیری

مدت زمان واسنجی را می‌توان به صورت ماهانه، شش‌ماهه، سه‌ماهه و سالانه در نظر گرفت. در نظر گرفتن مدت زمان یک‌ماهه نه تنها باعث افزایش میزان محاسبات واسنجی شد بلکه تعداد مجموعه پارامترهای حاصله برای حوضه افزایش یافت از سوی دیگر با در نظر گرفتن مدت زمان یک‌ساله جهت واسنجی مشکل عدم تطابق مناسب بین هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی دیده شد که خود به دلیل یکنواخت نبودن مقدار پارامترهای یک حوضه در طول یک‌سال می‌باشد. همچنین در نظر گرفتن مدت زمان فصلی یا سه‌ماهه گرچه نتایج رضایت‌بخشی داد اما با توجه به نزدیکی شرایط دو فصل به هم می‌توان به‌جای استفاده از واسنجی سه‌ماهه از شش‌ماهه استفاده کرد، که حجم محاسبات بدون آن که از دقت کار کاسته شود، کاهش یابد، این مدت زمان شبیه‌سازی توسط محققانی از جمله Fleming و Neary (2004) نیز تایید شده است. نهایتاً در تحقیق حاضر با توجه به شرایط حوضه و پیشنهادهای برگرفته از تحقیقات انجام‌گرفته دوره زمانی نیم‌سال آبی جهت واسنجی مدل استفاده شده است. تابع هدف مورد استفاده توسط (Nash و Sutcliffe (1970,b) می‌باشد. که مقادیر این تابع به ترتیب کمتر از $0/5-0/6$ غیرقابل قبول، بین $0/5-0/6$ قابل قبول و بین $0/6-0/8$ خوب و بیشتر از $0/8$ عالی می‌باشد و همچنین نتایج حاصله با معیارهای زیر نیز سنجیده شده‌اند.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (EST_i - REC_i)^2}{\sum_{i=1}^n (REC_i - \overline{REC})^2} \quad (3)$$

E : تابع هدف (تابع نش-ساتکلیف)

EST_i : روان‌آب‌های محاسبه‌شده در زمان i

REC_i : روان‌آب‌های مشاهده‌شده در زمان i

\overline{REC} : میانگین روان‌آب‌های مشاهده‌شده

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{0i} - Q_{Si})^2}{n}} \quad (4)$$

Q_{0i} : دبی مشاهداتی

در الگوریتم‌های بهینه‌یابی هدف پیدا کردن نقطه بهینه است و این نقطه بسته به ابعاد مسئله (مسئله n بعدی) دارای n مولفه می‌باشد. هر یک از بعدها در این‌جا به مثابه تک مسیری از n قطعه مسیر می‌ماند که باید در کنار هم قرار گیرد تا در نهایت مسیر حرکت مورچه به سمت نقطه هدف کامل شود. یک مورچه برای انتخاب هر تک مسیر با انتخاب‌های زیادی روبروست. انتخاب این تک مسیرها در الگوریتم گسسته مورچه براساس توزیع احتمالاتی گسسته و در الگوریتم پیوسته مورچه براساس توزیع احتمالاتی پیوسته انجام می‌گیرد. این تابع توزیع احتمال اساس الگوریتم مورچه را تشکیل می‌دهد. در الگوریتم پیوسته مورچه تابع توزیع احتمال پیوسته چیزی جز همان تابع شدت احتمال (PDF) نیست. Dorigo و Socha (2008) نمونه‌برداری از یک تابع شدت احتمال تحت عنوان تابع کرنل گوسی (Gaussian kernel) را پیشنهاد کردند. دلیل این انتخاب هم نمونه‌برداری ساده از این نوع تابع است. تابع کرنل گوسی در واقع جمع وزنی چندین تابع گوسی یک بعدی است که آن را با $G^i(x)$ نشان می‌دهند:

$$G^i(x) = \sum_{l=1}^k \omega_l g_l^i(x) = \sum_{l=1}^k \omega_l \frac{1}{\sigma_l^i \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_l^i)^2}{2\sigma_l^i{}^2}} \quad (1)$$

از آن‌جا که تعداد توابع کرنل گوسی برابر تعداد بُعدهای مسئله، $i = 1, 2, \dots, n$ است، تعداد توابع کرنل PDF مورد نیاز معلوم خواهد شد. هر تابع کرنل گوسی خود متشکل از k تابع گوسی (مساوی تعداد انتخاب ممکن در هر بعد) می‌باشد. خود تابع گوسی با سه پارامتر معین می‌شود: ω وزن مربوط به هر یک از تابع‌های گوسی تشکیل‌دهنده تابع کرنل می‌باشد، μ^i و σ^i به ترتیب میانگین و انحراف معیار توابع گوسی است.

برای نمونه‌برداری از هر بعد کافی است معلوم شود که اول اطراف کدام میانگین و با چه انحراف معیاری باید نمونه‌برداری شود. این‌که کدام میانگین برای نمونه‌برداری انتخاب شود، به وزن هر کدام از توابع گوسی ω بستگی دارد. قابل ذکر است k میانگین در هر بعد i در اختیار است، بنابراین یک جدول از میانگین‌ها با ابعاد $k \times i$ (سطر i ستون) وجود دارد. پس هر سطر خود یک نقطه در فضای پیوسته مسئله می‌باشد و در کل k نقطه در فضای مسئله در اختیار بوده که باید از آن برای نمونه‌برداری استفاده گردد. هر یک از این نقاط معادل با یک مقدار تابع هدف می‌باشد که براساس آن بایستی بصورت بهترین تا بدترین (حداقل به حداکثر) مرتب شوند. بنابراین جدول جدید یک جدول مرتب شده از جواب‌ها (آرشیو جواب) می‌باشد که سطر اول آن بهترین جواب و سطر آخر (k) بدترین جواب را در بردارد. وزن انتخاب سطر l -ام که تأثیر مستقیم در انتخاب آن دارد براساس رتبه آن (همان l) بوده و به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (2)$$

به صورت برف می باشد باعث تطبیق نه چندان خوب هیدروگراف های مشاهداتی و محاسباتی در نیمه اول و زمان های ابتدایی نیمه دوم سال های آبی گردیده است که برخی معیارهای ارزیابی نیز این مطلب را تایید می کند. براساس جداول و شکل های مربوط به واسنجی، از بین ۴ سال واسنجی، ابتدا سال آبی ۶۹-۷۰ و بعد سال آبی ۶۲-۶۳ هم به لحاظ ظاهری و هم به لحاظ کمی ضعیف ترین نتایج را نشان می دهند. اگر این دو سال را با هم مقایسه شوند، وجه تشابه میان آن ها تعدد بیشتر دبی های اوج رخ داده در آن ها در مقایسه با سال های آبی ۶۴-۶۵ و ۷۵-۷۶ می باشد. همان طور که از شکل های (۴) و (۵) پیداست، مدل در برآورد دبی های بزرگتر، موفق تر از دبی های کوچکتر (کمتر از ۱ مترمکعب در ثانیه) عمل کرده است. این موضوع کاملاً روشن است، زیرا خطاها در دبی های بزرگتر وزن بیشتری را به خود اختصاص می دهد، بنابراین در مرحله واسنجی مدل به جهت کم کردن خطای کل سعی می نماید تا به کاهش خطای این قسمت ها که وزن بیشتری دارند بپردازد که نتیجه آن تطبیق بهتر دبی های بزرگتر و عکس آن برای دبی های کمتر خواهد شد. اما در مرحله صحت سنجی با توجه به جدول (۲) معیار نش-ساتکلیف و ضریب R برای تمامی سال ها به جز سال ۷۰-۷۱ به ترتیب در محدوده قابل قبول و بالای ۰/۷ قرار گرفته است. همان طور که از شکل های (۶) و (۷) نیز قابل مشاهده است تطابق خوبی بین هیدروگراف های مشاهداتی و محاسباتی برای تمامی سال ها به جز سال ۷۰-۷۱ برقرار است.

تحلیل حساسیت تحقیق حاضر بر روی سال آبی ۷۵-۷۶ به عنوان نمونه انجام گرفت. مقدار هر پارامتر با ثابت نگه داشتن مقادیر دیگر در دو مقدار $\pm 10\%$ تغییر کرد. بیشترین درصد تغییرات نسبی مربوط به پارامترهای حداکثر ذخیره کششی خاک، حداکثر ذخیره خاک و حداکثر نرخ نفوذ خاک دیده شد به عبارت دیگر این سه پارامتر تأثیرگذارترین پارامترها هستند. اما در مورد بقیه پارامترها مدل نسبت به تغییرات آن ها تقریباً دارای درصد تغییرات نسبی کمتر از یک درصد و حتی نزدیک به صفر بوده که نشان دهنده غیرحساس بودن مدل نسبت به این پارامترها می باشد. در جدول (۳) نتایج حاصل از مدل با تحقیقات مشابه سایر محققین مقایسه شده است. هر یک از آن ها توابع هدف متفاوتی را در نظر گرفتند. مقایسه نتایج مدل حاضر با نتایج ارائه شده در این جدول حاکی از مطلوب بودن نتایج این تحقیق می باشد. شایان ذکر است که از میان آن ها تنها Buzzella (2013) از برنامه خارجی برای واسنجی استفاده نمود که بهترین معیار نش-ساتکلیف برای مدل او ۰/۵۶ به دست آمد.

Q_{Si} ، دبی محاسباتی

n ، تعداد دبی های محاسباتی و مشاهداتی موجود

$$PEV = 100 \times \left| \frac{V_0 - V_s}{V_0} \right| \quad (5)$$

V_0 ، حجم هیدروگراف مشاهداتی

V_s ، حجم هیدروگراف محاسباتی

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O) \times (Q_{S_i} - \bar{Q}_S)}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (Q_{O_i} - \bar{Q}_O)^2 \times \sum_{i=1}^n (Q_{S_i} - \bar{Q}_S)^2]}} \quad (6)$$

\bar{Q}_O ، میانگین دبی های مشاهداتی

\bar{Q}_S ، میانگین دبی های محاسباتی

مدل سازی

براساس تحقیق Knudsen و Refsgaard (1996)، در یک روش تعداد سال های واسنجی باید ۳-۴ سال و تعداد سال انتخابی جهت صحت سنجی باید برابر طول مدت واسنجی در نظر گرفته شود. لذا در این تحقیق ۴ سال برای واسنجی و ۴ سال برای صحت سنجی و ارزیابی انتخاب شد. بنابراین از سال های آبی ۶۲-۶۳، ۶۴-۶۵، ۶۶-۷۰، ۶۹-۷۰ و ۷۵-۷۶ برای واسنجی و ۶۳-۶۴، ۶۵-۶۶، ۷۰-۷۱ و ۷۳-۷۴ برای صحت سنجی مدل استفاده شد، هر سال آبی خود در دو نیمه سال (۱۰ آبان تا ۱۰ اردیبهشت و ۱۱ اردیبهشت تا ۹ آبان) شبیه سازی شد.

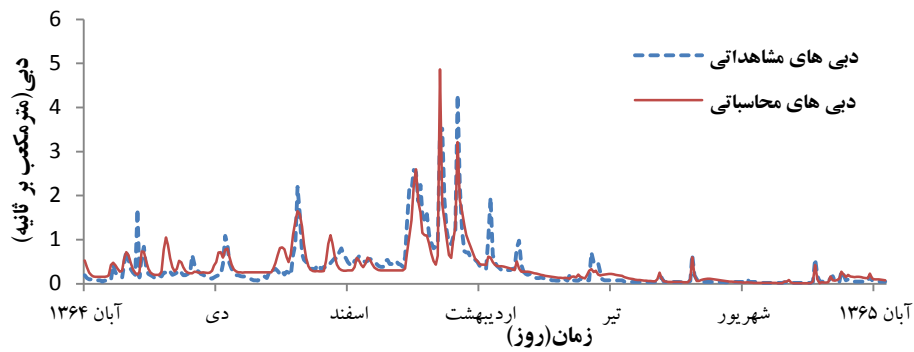
نتایج و بحث

نتایج واسنجی

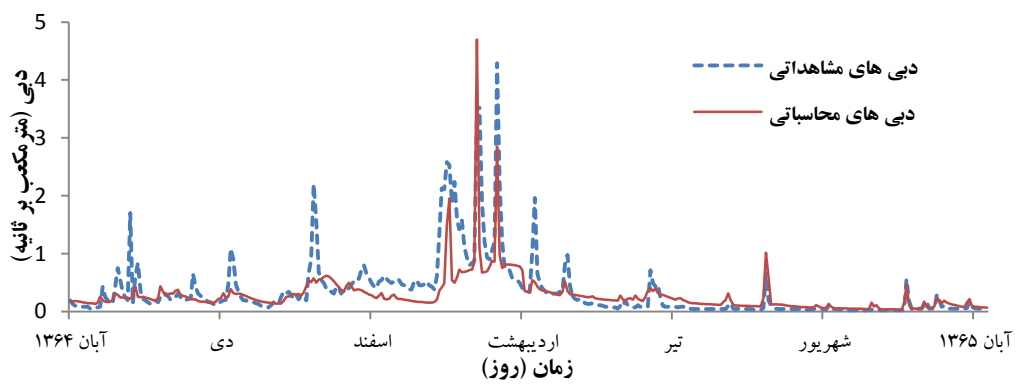
همان طور که اشاره شد وقت گیر بودن روش سعی و خطا استفاده از این روش را سخت کرده است. علاوه بر این دقت روش واسنجی دستی در مقایسه با واسنجی خودکار کلونی مورچه ها پایین تر به دست آمده است. برای روش شدن اهمیت موضوع واسنجی دستی برای سال آبی ۶۴-۶۵ انجام شد که نتایج حاصله در شکل (۲) آورده شده است. با مقایسه آن با واسنجی خودکار معادل آن شکل (۳) می توان مشاهده کرد که نتایج واسنجی خودکار کلونی مورچه نتایج بهتری را ارائه داده است.

در مرحله واسنجی با توجه به نتایج حاصله از جدول (۱) معیار ارزیابی نش-ساتکلیف و ضریب R برای تمامی سال های آبی مورد استفاده به ترتیب بیش از مقدار ۰/۶ و ۰/۷ برآورد شده است، که مقدار ضریب نش-ساتکلیف بزرگتر از ۰/۶ نشان از تطابق خوب هیدروگراف های مشاهداتی و محاسباتی می باشد که شکل های (۴) و (۵) نیز گویای این مطلب است. البته با توجه به این نمودارها نکات قوت و ضعفی مشاهده می شود، از جمله تطابق اکثر اوج های مشاهداتی و محاسباتی که نشان از برآورد خوب مدل می باشد، اما به دلیل در نظر گرفته نشدن پدیده برف در محاسبه ها و دانستن این مطلب که در نیمه اول هر سال آبی بیشتر بارش ها

سرتیپ و همکاران: واسنجی خودکار مدل پیوسته بارش-رواناب...



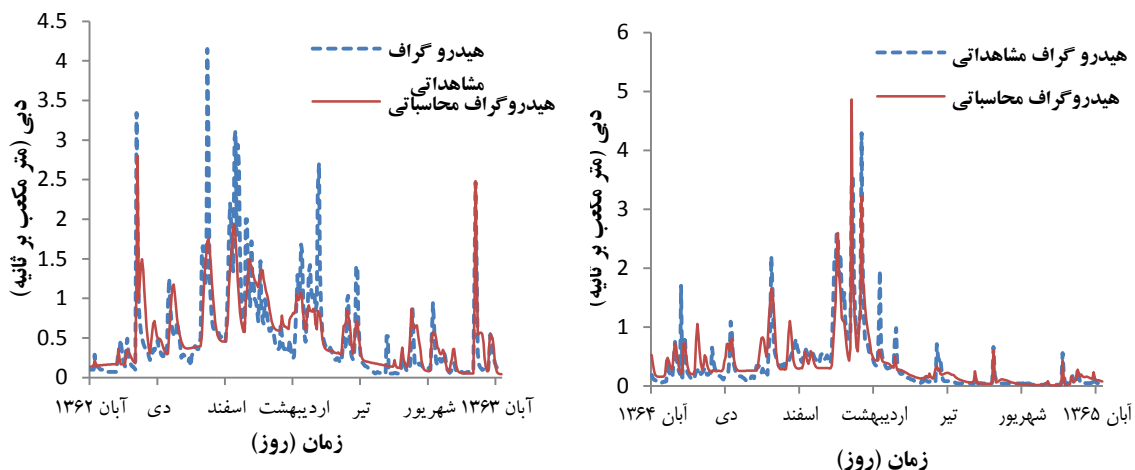
شکل ۲-مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی واسنجی به روش سعی و خطا سال آبی ۶۵-۶۴



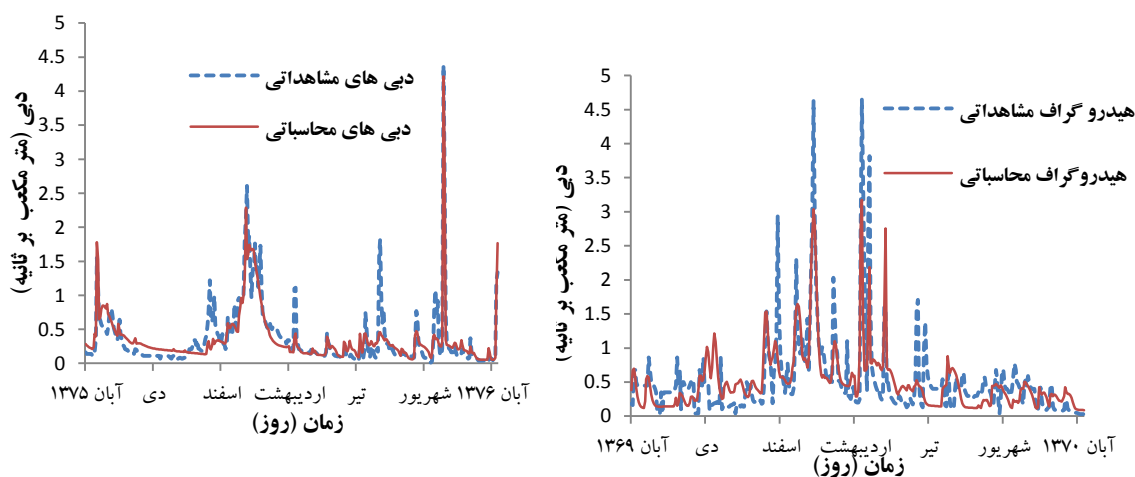
شکل ۳-مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی واسنجی به روش خودکار سال آبی ۶۵-۶۴

جدول ۱- نتایج حاصل از واسنجی مدل SMA در هر سال آبی

سال آبی	E	RMSE(m ³ /s)	R	PEV(%)
۶۲-۶۳	۰/۶	۰/۳۸	۰/۷۸	۴/۱
۶۴-۶۵	۰/۷۶	۰/۲۶	۰/۸۷	۴
۶۹-۷۰	۰/۶	۰/۴	۰/۷۷	۲/۱
۷۵-۷۶	۰/۸	۰/۲۱	۰/۹	۰/۵۲



شکل ۴- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی مرحله واسنجی سال آبی ۶۲-۶۳ و ۶۴-۶۵

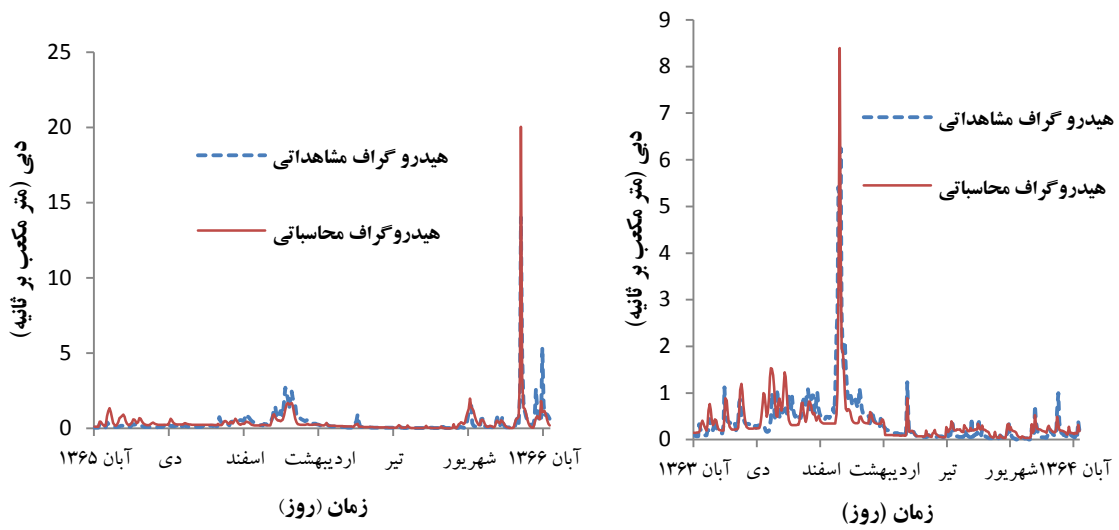


شکل ۵- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی مرحله واسنجی سال آبی ۷۰-۷۱ و ۷۵-۷۶

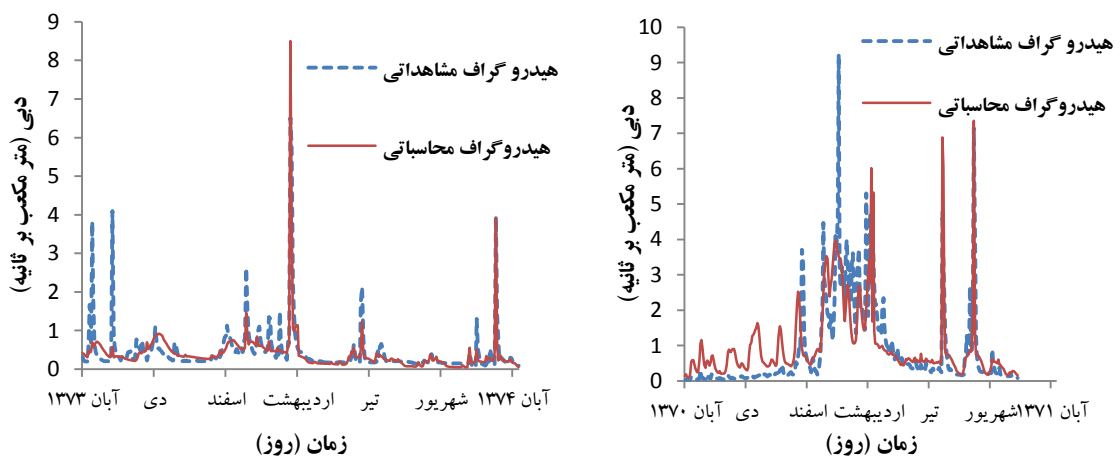
جدول ۲- نتایج حاصل از صحت‌سنجی

سال آبی	E	RMSE(m ³ /s)	R	PEV(%)
۶۳-۶۴	۰/۶۴	۰/۳۶	۰/۸۱	۲/۱
۶۵-۶۶	۰/۷	۰/۵	۰/۹	۷/۴
۷۰-۷۱	۰/۵۸	۰/۸۱	۰/۷۷	۱۵/۸
۷۳-۷۴	۰/۶۴	۰/۳۷	۰/۸۱	۸/۵۴

سرتیپ و همکاران: واسنجی خودکار مدل پیوسته بارش-رواناب...



شکل ۶- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مرحله صحت‌سنجی سال‌های ۶۳-۶۴ و ۶۵-۶۶



شکل ۷- مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی مرحله صحت‌سنجی سال‌های ۷۰-۷۱ و ۷۳-۷۴

جدول ۳- نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی سایر محققین براساس شبیه‌سازی بارش رواناب به صورت پیوسته با استفاده از HMS-SMA

محققان	محل تحقیق	نام زیر حوضه	مساحت (km ²)	نوع واسنجی	بازه اندازه گیری داده ها	نوع واسنجی	محدوده معیار ارزیابی بترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی			
							E	Ea	PEV(%)	R ²
Fleming و Neary, 2004	آمریکا	بیردستو	۲۷۵	دستی و خودکار	شش - ماهه (توصیه شده)	-	۰/۳۷ تا ۰/۵۵	۰/۱ تا ۰/۲۲	۶/۶	-
		جامستو	۵۵۰	HMS	ساعتی	-	۰/۳۳ تا ۰/۵	۰/۸ تا ۰/۱۵	۱۵/۷	-
		میتشل	۳۱۹			-	-	۲۴/۷ و ۲۴	-	۰/۷۶ و ۰/۷۶
Cunderli و k Simono vic, 2004	کانادا	تورندال	۱۳۴۰			-	-	۱۲ و ۲۷	-	۰/۷۸ و ۰/۷۹
		اینرکیپ	۳۰۶	دستی	شش ماهه	-	-	۷/۴ و ۳/۴	-	۰/۷۴ و ۰/۷۹
		تامسفورد	۱۴۹			-	-	۱۵ و ۱۰/۵	-	۰/۷۹ و ۰/۷۹
		بایرون	۳۱۱۰			-	-	۸/۸ و ۷/۶	-	۰/۹۴ و ۰/۹۵
Buzzella, 2013	آرژانتین	آندا کولو	۴۷۸۰	خودکار (برنامه خارجی)		۰/۳۲ و ۰/۵	-	۱۵/۶ و ۱۵/۳	-	-
		آگریو	۷۷۰۰		روزانه	-	۰/۳۸ و ۰/۴۴	۱۱ و ۸/۴	-	-
		نیکوئن	۱۹۹۰۰	(DSS)		۰/۵۳ و ۰/۵۶	-	۱/۷ و ۱/۳	-	-

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر با توجه به ضعف واسنجی خودکار نرم افزار HMS-SMA و وقت گیر بودن واسنجی دستی از الگوریتم بهینه سازی کلونی مورچه‌ها جهت واسنجی بهره برده شد. از این رو هشت سال آماری با پراکندگی متفاوت برای واسنجی و ارزیابی مدل استفاده گردید. شبیه سازی‌ها برای هر سال از حدود ۱۰ آبان تا ۹ اردیبهشت برای ۶ ماه اول و از ۱۰ اردیبهشت تا ۹ آبان برای ۶ ماه دوم انجام شد.

در نتایج حاصل از واسنجی مدل که بر روی چهار سال آماری ۶۳-۶۲، ۶۵-۶۴، ۷۰-۶۹ و ۷۶-۷۵ در دو نیم سال انجام گرفت، مشاهده شد که با این که در نیمه اول سال تجمع و ذوب برف رخ می دهد، تطابق نسبتاً مناسبی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسباتی حاصل شده است. در نیمه دوم سال به دلیل نبود این پدیده و وجود بارش‌ها به صورت باران نتایج بهتری به دست آمد. از طرفی با توجه به اینکه که مقدار معیار نش-ساتکلیف برای تمامی سال‌ها بزرگتر از ۰/۶ می باشد، می توان نتایج حاصل از واسنجی را خوب دانست. بهترین حالت در مرحله واسنجی مربوط به سال آبی

۷۶-۷۵ است که با میزان نش-ساتکلیف ۰/۷۹۲ در محدوده عالی قرار دارد. در مرحله صحت سنجی نیز همانند واسنجی تطابق نسبتاً قابل قبولی در هر سال مشاهده شد که معیار ارزیابی نش-ساتکلیف نیز این مطلب را تایید می نماید. از این بین سال آبی ۶۶-۶۵ با مقدار نش-ساتکلیف ۰/۷ در محدوده خوب قرار گرفت. در مرحله تحلیل حساسیت پارامترهایی که مدل نسبت به تغییر مقدار آن‌ها بسیار حساس هست، شامل حداکثر ذخیره کشتی خاک، حداکثر ذخیره خاک و حداکثر نرخ نفوذ خاک و حداکثر نرخ نفوذ عمقی خاک می باشد در صورتی که بقیه پارامترها در حدود ۱ تا ۲ درصد یا کمتر از این مقادیر بر روی درصد تغییرات نسبی معیارهای اندازه گیری R و نش-ساتکلیف اثر داشتند به عبارت دیگر مدل نسبت به تغییرات این پارامترها تقریباً حساس نیست. در پایان نتایج حاصل از تحقیق حاضر با نتایج سایر محققان مقایسه شده است و همان طور که مشخص است نتایج به دست آمده در این تحقیق در مقایسه با نتایج دیگر مناسب و قابل قبول می باشد.

منابع

- 1- Bennett, T.H. and Peters, J.C., 2000. Continuous soil moisture accounting in the hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS). In *Building Partnerships* (pp. 1-10).
- 2- Bennett, T.H., 1998. *Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HUMS)*. University of California, Davis.
- 3- Bilchev, B. and Parmee, I. C. 1995. The ant colony metaphor for searching continuous design spaces. Proc. of the AISB Workshop on Evolutionary Computation, Lect. Notes in Comput. Sci.
- 4- Bilchev, G. and Parmee, I.C., 1995, April. The ant colony metaphor for searching continuous design spaces. In *AISB workshop on evolutionary computing* (pp. 25-39). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 5- Cunderlik, J. and Simonovic, S.P., 2004. *Calibration, verification and sensitivity analysis of the HEC-HMS hydrologic model*. Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario.
- 6- Dréo, J. and Siarry, P., 2002, September. A new ant colony algorithm using the heterarchical concept aimed at optimization of multim minima continuous functions. In *International Workshop on Ant Algorithms* (pp. 216-221). Springer, Berlin, Heidelberg.
- 7- Fleming, M. and Neary, V., 2004. Continuous hydrologic modeling study with the hydrologic modeling system. *Journal of hydrologic engineering*, 9(3), pp.175-183.
- 8- García, A., Sainz, A., Revilla, J.A., Álvarez, C., Juanes, J.A. and Puente, A., 2008. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. *Journal of Hydrology*, 356(3-4), pp.312-326.
- 9- Lastoria, B., 2008. *Hydrological processes on the land surface: A survey of modelling approaches* (p. 60). Università di Trento. Dipartimento di ingegneria civile e ambientale.

- 10-Mathur, M., Karale, S.B., Priye, S., Jayaraman, V.K. and Kulkarni, B.D., 2000. Ant colony approach to continuous function optimization. *Industrial & engineering chemistry research*, 39(10), pp.3814-3822.
- 11-Monmarché, N., Venturini, G. and Slimane, M., 2000. On how *Pachycondyla apicalis* ants suggest a new search algorithm. *Future generation computer systems*, 16(8), pp.937-946.
- 12-Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp.282-290.
- 13-Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), pp.282-290.
- 14-Rawls, Walter J., Donald L. Brakensiek, and K. E. Saxton. "Estimation of soil water properties." *Transactions of the ASAE* 25, no. 5 (1982): 1316-1320.
- 15-Refsgaard, J.C. and Knudsen, J., 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, 32(7), pp.2189-2202.
- 16-Saxton, K.E., Rawls, W., Romberger, J.S. and Papendick, R.I., 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), pp.1031-1036.
- 17-Skaggs, R.W. and Khaleel, R., 1982. Infiltration. *Hydrologic modeling of small watersheds. ASAE Monogr*, 5, pp.121-166.
- 18-Socha, K. and Dorigo, M., 2008. Ant colony optimization for continuous domains. *European journal of operational research*, 185(3), pp.1155-1173.