کالیبراسیون مدل‌های بارش- رواناب به کمک الگوریتم‌های فراکاوشی

علیرضا برهانی داریان
دانشیار منابع آب – دانشکده عمران، دانشگاه خواجه نصیر، تهران

زینب فرهمندفر
دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه خواجه نصیر، تهران
تلفن تماس : ۰۹۱۲۶۳۰۴۳۱۴
zeinab_farahmand@yahoo.com

منبع استخراج مقاله : پایان نامه دانشجویی

تاریخ دریافت : ۸۹/۶/۳۱ **تاریخ پذیرش: ۹۰/۲/۲۶**

چکیده

مدل‌های بارش- رواناب برای محاسبه رواناب حاصل از بارش در یک حوزه آبریز به‌کار می‌روند. مدل تانک یکی از مدل‌های بارش- رواناب است که دارای نتایج بسیار خوبی در مدل کردن رواناب حاصل از بارش در حوزه‌های مختلف بوده است. به دلیل زیاد پارامترهای مدل تانک نسبت به سایر مدل‌های بارش- رواناب، رکن اصلی در استفاده صحیح از این مدل به چگونگی کالیبراسیون آن مربوط می‌شود. برای کالیبراسیون این مدل می‌توان از روش‌های سعی و خطا و یا بهینه‌سازی استفاده کرد. روش‌های اول در مسائل با ابعاد بزرگ عملی نبوده و بسیار وقت‌گیر است. در این مقاله کالیبراسیون یک مدل بارش- رواناب با روش بهینه‌سازی و به کمک الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل انجام شده و نتایج آن با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه شده است. برای این کار ابتدا مدل بارش- رواناب بر اساس مفهوم تانک توسعه یافته و سپس این مدل بعنوان مبنا برای شبیه‌سازی سیستم تحت یک مدل شبیه‌ساز بهینه‌ساز مورد استفاده قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کالیبراسیون، مدل بارش- رواناب، مدل تانک، الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل، الگوریتم ژنتیک

مقدمه

حل بسیاری از مسائل پیچیده بدون استفاده از روشهای بهینه‌سازی اگر غیرممکن نباشد امری دشوار و پرهزینه است. امروزه محققین سعی بر آن دارند تا با استفاده از روش‌های نوین در زمان کم مسائل بهینه‌سازی را حل کنند. بسیاری از این روش‌ها الهام گرفته از طبیعت بوده و بر اساس یکی از شیوه‌های گوناگون جستجوی تصادفی عمل می‌کنند. اگرچه این الگوریتم‌ها دستیابی به بهینه مطلق را تضمین نمی‌نمایند، اما عموماً می‌توان به کسب جواب نزدیک به بهینه امیدوار بود. در این بین، ابعاد مختلف زندگی اجتماعی زنبورها سر منشاء دست‌یابی به مدل‌ها و الگوریتم‌های زیادی جهت جستجو و یافتن حل بهینه مسائل در حوزه‌های مختلف شده است و در بین رفتارهای مختلف زنبورها، رفتار جفت‌گیری و غذایابی آنها از مهمترین زمینه‌های ایجاد این‌گونه سیستم‌های مصنوعی بوده است. الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل، الهام گرفته از فرآیند جفت‌گیری زنبورهای واقعی بوده و اخیراً به منظور حل تعدادی از مسائل علمی و مهندسی مورد استفاده محققان قرار گرفته است. گروه‌های معمول زنبور عسل شامل ملکه‌ها، زنبورهای نر، کارگران و نوزادان هستند که در کندو زندگی می‌کنند. این الگوریتم، اولین بار توسط عباس (Abbass, 2001a) و با فرض تنها یک ملکه و یک کارگر برای گروه، برای حل نوع خاصی از مسئله تخصیص مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله بعد عباس (Abbass, 2001b) الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل را به‌گونه‌ای تغییر داد که گروه دارای یک ملکه ولی

چندین کارگر باشد. وی برای این منظور از ۶ تابع کاوشی برای تولید و ارتقاء جواب‌ها استفاده کرد. نتایج نشان داد در این حالت بهترین جواب در تعداد دفعات اعمال توابع کاوشی متوسط و حجم محفظه اسپرم متوسط اتفاق می‌افتد. عباس (Abbass, 2001c) مجدداً الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل را با درنظر گرفتن چندین ملکه و چندین کارگر برای گروه بررسی نموده و نشان داد در حالتی که تعداد نوزادان متوسط است گروه با یک ملکه جواب بهتری می‌دهد. درحالیکه استفاده از گروه‌های با چندین ملکه زمانی مناسب است که تعداد نوزادان خیلی کم باشد. به طور کلی، در این حالت بهترین جواب در کمترین تعداد ملکه، بیشترین سایز محفظه اسپرم و تعداد نوزادان متوسط اتفاق می‌افتد. همچنین، استفاده از چندین تابع کاوشی درکنار هم نسبت به زمانی که از بهترین تابع کاوشی ولی به‌تنهایی استفاده می‌شود، عملکرد بهتری دارد.

سپس تئو و عباس (Teo & Abbass, 2001) مدل ارائه شده در (Abbass, 2001a; Abbass, 2001c) را به‌گونه‌ای تغییر دادند که تنها هنگامی تابع احتمالاتی برای انتخاب زنبورهای نر فعال شود که این زنبورها دارای برازش کمتری نسبت به ملکه باشند. به عبارت دیگر، زنبورهای نر تا زمانی که دارای برازش بهتری نسبت به ملکه هستند، بدون در نظر گرفتن تابع احتمالاتی به عنوان زنبور والد انتخاب می‌شوند. آنها در این الگوریتم از یک ملکه و ۵ تابع کاوشی استفاده کردند و نتایج استفاده از هریک از این توابع کاوشی را به تنهایی و همراه با الگوریتم MBO[1] نشان دادند. به این صورت که هر یک از این توابع را یکبار به تنهایی، یکبار همراه با الگوریتم MBO ارائه شده در (Abbass, 2001a) و یکبار همراه با الگوریتم MBO تغییریافته اجرا کرده و نتایج آنها را با یکدیگر مقایسه کردند. همچنین، نتایج حاصل از الگوریتم اولیه با ۵ تابع کاوشی را با نتایج حاصل از الگوریتم تغییر یافته با ۵ تابع کاوشی، مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که نحوه عملکرد این الگوریتم به نوع تابع کاوشی مورد استفاده در آن بستگی دارد و بهترین نتایج برای الگوریتم جدید در حالتی بدست می‌آید که گروه تنها دارای یک تابع کاوشی (کارگر) باشد. تئو و عباس (Teo & Abbass, 2003) مجدداً الگوریتم MBO ارائه شده در (Abbass, 2001a; Abbass, 2001c) را به‌گونه‌ای تغییر دادند که انتخاب زنبورهای نر براساس میزان برازش خود آنها انجام شود. زیرا در الگوریتم قبلی قبول و یا رد یک زنبور نر به عنوان زنبور والد در تابع احتمالاتی با مقایسه برازش زنبور ملکه انجام می‌شد. حال آنکه در طبیعت تولید زنبورهای نر کاملاً مستقل ازملکه است. بدین ترتیب، که برازش هر زنبور نر با برازش زنبور نر قبل از خود مقایسه می‌شود و اگر زنبور نر جدید دارای برازش بهتری نسبت به زنبور نر قبلی باشد، به عنوان زنبور والد انتخاب می‌شود و در غیر این صورت انتخاب آن به عنوان زنبور والد براساس تابع احتمالاتی خواهد بود. در این تابع احتمالاتی برازش هر زنبور نر با برازش زنبور نر قبل از خود مقایسه می‌شود نه با برازش زنبور ملکه. آنها این الگوریتم را روی ۱۰ مسئله مختلف تخصیص اعمال کردند. نتایج نشان داد که وقتی فقط از توابع کاوشی به تنهایی استفاده می‌شود، هیچ‌کدام از این توابع قادر به یافتن حتی یکی از جواب‌های بهینه نیستند، ولی وقتی از این توابع در ترکیب با الگوریتم MBO جدید استفاده می‌شود، نتایج به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. علاوه براین آنها نشان دادند الگوریتم جدید نسبت به گونه قبلی آن (Abbass, 2001a; Abbass, 2001c) قابلیت بیشتری دارد و در مواردی که الگوریتم قبلی قادر به یافتن جواب بهینه نیست، الگوریتم جدید جواب بهینه را می‌یابد. حداد و همکاران (Bozorg Hadad et al., 2006) الگوریتم ارائه شده توسط (Abbass, 2001c)را در حل مسائل منابع آب استفاده کردند. چانگ (Chang, 2006) برای اولین بار قابلیت الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل را در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی و احتمالاتی نشان داد. او ابتدا یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی غیراحتمالاتی را به کمک این الگوریتم حل نمود و نشان‌داد که الگوریتم به جواب بهینه مطلق همگرا می‌شود. سپس از این الگوریتم برای حل یک مسئله بهینه‌سازی ترکیبی از نوع احتمالاتی استفاده کرد و مجدداً الگوریتم به مقدار بهنیه مطلق همگرا شد. او نشان داد که الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل را می‌توان ترکیبی از شبیه‌سازی آنیلینگ و الگوریتم ژنتیک در نظر گرفت، به‌طوری که پرواز جفت‌گیری و انتخاب زنبورهای والد از میان زنبورهای نر همان شبیه‌سازی آنیلینگ و تولید نوزادان و ارتقاء نسل آنها همان الگوریتم ژنتیک است. فتحیان و همکاران (Fathian et al., 2007) کاربرد

[1] marriage in honey bees optimization

الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل را در حل مسائل مربوط به دسته‌بندی داده‌ها نشان داد. آنها برای ارزیابی این الگوریتم مثال‌های زیادی را حل نموده و نتایج آن را با نتایج بدست آمده از بسیاری از الگوریتم‌های فراکاوشی نظیر الگوریتم ژنتیک، شبیه‌سازی آنیلینگ، جستجوی ممنوعه و الگوریتم ACO مقایسه کردند. نتایج نشان داد الگوریتم MBO کارایی بسیار خوبی در حل اینگونه مسائل دارد. کودیل و همکاران (Koudil et al., 2007) نیز کابرد الگوریتم ارائه شده در (Abbass, 2001a) را در حل مسائل زمان‌بندی نشان دادند. برای بررسی نتایج، یکی از مثال‌های مطرح در این زمینه توسط الگوریتم حل شد. مقایسه نتایج آن با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نشان داد که این الگوریتم به جواب بهینه مطلق می‌رسد و سرعت همگرایی آن از الگوریتم ژنتیک بالاتر است.

مدل بارش- رواناب

برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب مدل‌های زیادی وجود دارد که اغلب آنها برای کالیبراسیون نیاز به جمع‌آوری داده‌های مشاهداتی زیادی دارند. یکی از دلایل ارجحیت مدل تانک بر این مدل‌ها این است که تنها داده‌های مشاهداتی لازم برای کالیبراسیون این مدل، اطلاعات بارش، تبخیر و تعرق و هیدروگراف جریان خروجی است. مدل تانک اولین بار توسط سوگوارا و فونیوکی (Sugawara & Funiyuki, 1956) ارائه شد. مدل آنها یک مدل قطعی، یکپارچه، خطی، پیوسته و ایستا در زمان بود و در تحلیل سیلاب نیز به کار می‌رفت. فین و پرادهین (Phein & Pradhan, 1983) مدل تانک را برای حوزه‌ای در تایلند با داده‌های ماهانه و روزانه به کاربردند و نتایج نشان داد که این مدل بر اساس داده‌های ماهانه بهتر کار می‌کند. میزومورا و چیو (Mizumura & Chiu, 1985)، مدل تانک را برای محاسبه رواناب حاصل از بارندگی و برفاب به‌کار بردند. آنها برای در نظر گرفتن برفاب و تأثیر آن در مدل، یک تانک اولیه به مدل اضافه کردند و از ترکیب روش اتورگرسیو و فیلتر کالمن برای کالیبراسیون مدل استفاده کردند. لی و سینگ (Lee and Singh,1999)، مدل تانک را به‌منظور اصلاح پیش‌بینی رواناب سیل با فیلتر کالمن ترکیب کردند و نتایج بدست آمده نشان داد که هیدروگراف مدل تانک با استفاده از فیلتر کالمن با هیدروگراف مشاهده شده نسبت به آنچه با مدل تانک به تنهایی بدست آمده‌است، موافقت نزدیک‌تری را داراست.

علی‌رغم سادگی مدل تانک، تعداد پارامترهای این مدل برای کالیبراسیون زیاد است و لذا روش کالیبراسیون آن اهمیت بالایی دارد. در ابتدا تنها روشی که برای کالیبراسیون این مدل استفاده می‌شد، روش سعی و خطا به صورت دستی بود که بسیار زمان‌گیر است. سوگوارا (Sugawara, 1979) یک برنامه کامپیوتری برای کالیبراسیون مدل تانک به روش سعی و خطا تهیه کرد که استفاده از این برنامه نیز به دانش هیدرولوژی و ریاضی بالایی نیاز داشت. در سال‌های اخیر از روش‌های بهینه‌سازی گوناگون برای کالیبراسیون اتوماتیک مدل تانک استفاده شده است. کوپر و همکاران (Cooper et al., 1997)، از سه روش بهینه‌سازی SCE[1]، الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی آنیلینگ در کالیبراسیون مدل تانک با دو تانک عمودی استفاده کردند و نشان دادند که روش بهینه‌سازی SCE نسبت به روش‌های دیگر به جواب‌های بهتری می‌رسد. چن و همکاران (Chen et al., 2005) نیز روش SCE و برنامه‌ریزی غیرخطی Multistart Powell را در کالیبراسیون مدل تانک برای داده‌های یک حوزه آبریز در تایوان مقایسه کردند و نشان مجدداً روش SCE نتایج بهتری را ارائه داد. پایک و همکاران (Paik et al., 2005) از نوع تغییریافته الگوریتم harmony search برای کالیبراسیون مدل تانک استفاده کردند و برتری آنرا نسبت به نتایج الگوریتم harmony search، برنامه‌ریزی غیرخطی Powell و الگوریتم ژنتیک نشان دادند.

در این مقاله از الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل در حل یک مدل بارش- رواناب استفاده شده و نتایج آن با نتایج الگوریتم شناخته شده ژنتیک، مقایسه شده‌است. سپس پارامترهای بدست آمده از کالیبراسیون با استفاده از مشاهدات جداگانه مورد آزمایش قرار گرفته و صحت مدل تأیید می‌شود.

الگوریتم جفت گیری زنبورعسل[2]

رفتار زنبورهای عسل تحت تأثیر عوامل ژنتیکی، محیط اکولوژیکی و شرایط اجتماعی گروه است و هر یک از آنها با توجه به این عوامل وظایف خاصی را درگروه به عهده

[1] Shuffle Complex Evolution
[2] MBO

دارند (Rinderer & Collins 1986). ملکه مهمترین عضو کندو است که نقش اصلی را در تولید نسل جدید بر عهده دارد و مهمترین وظیفه آن تخم‌گذاری است. ملکه، یکبار در طول عمر خود با زنبور های نر متعدد، در طی چندروز جفت‌گیری می‌کند. اسپرم هر زنبور نر در درون بدن ملکه و در فضای خاصی به نام "محفظه اسپرم" نگهداری می‌شود. او از این اسپرم‌های ذخیره شده برای تولید تخم‌های بارور و غیر بارور استفاده می‌کند. زنبورهای نر که از تخم‌های غیربارور به وجود می‌آیند، در نقش پدر گروه هستند و وظیفه اصلی آنها انتقال اسپرم به بدن ملکه است. این زنبورها بعد از اتمام فرآیند جفت‌گیری خواهند مرد. کارگران از نوزادان تازه متولد شده نگهداری می‌کنند و از آنجایی که از تخم‌های بارور به وجود آمده‌اند، در بعضی مواقع نیز تخم‌گذاری می‌کنند. فرآیند جفت‌گیری در حین پرواز جفت‌گیری و دور از کندو انجام می‌شود و با رقص ملکه و در حالی‌که زنبورهای نر او را دنبال می‌کنند، آغاز می‌شود. در یک جفت‌گیری معمولی هر ملکه با ۷ تا ۲۰ زنبور نر جفت‌گیری می‌کند و پس از هر بار جفت‌گیری اسپرم زنبور نر به درون بدن ملکه وارد و درون محفظه اسپرم ذخیره می‌شود. هر بار که ملکه یک تخم بارور تولید می‌کند، به صورت رندم مخلوطی از اسپرم‌های موجود در محفظه اسپرم را برای بارورکردن تخم دریافت می‌کند. عمل جفت‌گیری با مرگ زنبور نر خاتمه می‌یابد(Abbass, 2001a).

الگوریتم مصنوعی با تولید جواب ها (نوزادان) به صورت رندم در محدوده مجاز، آغاز می‌شود و از آنجایی که همیشه فرض بر این است که ملکه زنبور برتر است، بهترین نوزاد به عنوان ملکه انتخاب می‌شود. پس از تولید ملکه مجموعه پروازهای جفت‌گیری آغاز می‌شود. پرواز جفت‌گیری به صورت مجموعه‌ای از حرکت‌ها در یک فضای حالت در نظر گرفته می‌شود که در آن فضا ملکه بین حالت‌های مختلف و با سرعت‌های گوناگون حرکت می‌کند و با زنبورهای نری که بر اساس تابع احتمالاتی زیر انتخاب می‌شوند، جفت‌گیری می‌کند:

$$Prob(Q,D) = e^{\frac{-\Delta(f)}{S(t)}} \qquad (۱)$$

که در آن Prob(Q,D) احتمال اضافه شدن اسپرم زنبورنر Dبه حجم محفظه اسپرم ملکه Q یا احتمال یک جفت‌گیری موفق می‌باشد. $\Delta(f)$ قدرمطلق اختلاف بین تابع برازش ملکه یعنی$f(Q)$ و تابع برازش زنبورنر یعنی $f(D)$ *بوده* و $S(t)$ سرعت ملکه در لحظه t می‌باشد. این تابع به عنوان یک تابع نرم‌شونده[1] عمل می‌نماید، به این معنی که احتمال جفت‌گیری در ابتدای پرواز جفت‌گیری، که ملکه دارای سرعت زیاد می‌باشد و یا در زمانی که تابع برازش زنبورنر خوب و مناسب بوده و به مقدار تابع برازش ملکه نزدیک می‌باشد، بسیار زیاد است. البته این تابع احتمالاتی تنها زمانی فعال می‌شود که زنبورنر دارای برازش کمتری نسبت به ملکه باشد و در صورتی که برازش زنبورنر از برازش ملکه بیشتر باشد، اسپرم این زنبور مستقیماً به محفظه اسپرم ملکه منتقل می‌شود (Teo & Abbass, 2001). هر ملکه دارای یک حجم محفظه اسپرم و یک مقدار انرژی و سرعت اولیه است، که در ابتدای هر پرواز جفت‌گیری، به‌صورت رندم بین ۰,۵ و ۱ مقداردهی می‌شود و هنگامی پرواز جفت‌گیری پایان می‌یابد که یا انرژی ملکه تمام شود و یا حجم محفظه اسپرم پر شود. به‌تدریج و بعد از هر جابجائی ملکه در فضا، سرعت و انرژی او توسط روابط زیر کاهش می‌یابد: (Abbass, 2001a)

$$Speed(t+1) = \alpha \times Speed(t) \qquad (۲)$$

$$Energy(t+1) = Energy(t) - \gamma \qquad (۳)$$

که در آن α به صورت رندم در بازه $[0.9, 1]$ مقداردهی می‌شود و γ نیز مقدار کاهش انرژی ملکه در هر انتقال است و طبق رابطه ۴ محاسبه می‌شود: (Abbass, 2001a)

$$\gamma = 0.5 * \frac{Energy(t)}{\text{حجم کل محفظه اسپرم}} \qquad (۴)$$

اگر زنبور نر برای انجام عمل جفت‌گیری انتخاب شود، اسپرم او به محفظه اسپرم ملکه منتقل می‌شود. پس از پایان پروازهای جفت‌گیری ملکه (جواب برتر) و انتخاب

[1] Annealing

جفت‌های آن از بین زنبورهای نر جهت پرنمودن محفظه اسپرم به منظور تولید بچه‌های جدید، بچه زنبورهای جدید (جواب‌های آزمایشی) با استفاده از عملگر ترکیب بر روی ژن‌های زنبورنر و ژن‌های ملکه، ایجاد می‌شوند. تولید نوزادان به این صورت است که ملکه به صورت رندم یک اسپرم از محفظه اسپرم رها می‌کند و از ترکیب این اسپرم با ژنومه ملکه، نوزاد متولد می‌شود. در مرحله بعد، از کارگرها که به شکل یک سری توابع فراکاوشی (انواع مختلف توابع جهش ژنی) تعریف می‌شوند، جهت جستجوی موضعی (پرورش و ارتقاء نسل بچه زنبورها) استفاده می‌شود. بنابراین اگر یک اسپرم بیش از یکبار برای تولید نوزاد استفاده شود، نوزادان به‌وجود آمده با اعمال جهش با یکدیگر متفاوت خواهند بود. بچه زنبور برتر در این فرآیند در صورت برتری نسبت به ملکه موجود جهت جایگزینی با ملکه و انجام پرواز جفت‌گیری بعدی انتخاب می‌شود. سپس تمام نوزادان از بین می‌روند و یک پرواز جفت‌گیری جدید آغاز می‌شود و این کار تا پایان تمام پروازهای جفت‌گیری ادامه می‌یابد (Abbass, 2001a). شبه‌کد جفت گیری زنبور عسل در شکل ۱ ارایه شده‌است.

مدل بارش- رواناب تانک

مدل تانک یکی از مدل‌های بارش- رواناب به روش یکجا است که از قرارگیری تانک‌هایی که به صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند، برای محاسبه رواناب حاصل از بارش در حوزه آبریز استفاده می‌کند. تعداد تانک‌ها بسته به پیوسته یا موردی بودن مدل و نیز منظور کردن یا نکردن برفاب، متغیر است. همانطور که گفته شد، این مدل اولین بار توسط سوگوارا و فونیوکی در سال ۱۹۵۶ ارائه شد. مدل تانک ارائه شده توسط سوگوارا و فونیوکی شامل ۴ تانک است (شکل۲) که بارش و تبخیر روی تانک بالایی اعمال می‌شود. جریان‌هایی که از خروجی‌های جانبی تانک خارج می‌شود، رواناب‌های محاسبه شده را بدست می‌دهد. به این ترتیب که خروجی جانبی تانک اول رواناب سطحی، خروجی جانبی تانک دوم رواناب زیرسطحی، خروجی جانبی تانک سوم رواناب زیرپایه و خروجی جانبی تانک چهارم رواناب پایه را تشکیل می‌دهند. جریان‌هایی که از خروجی‌های تحتانی خارج می‌شوند، مقادیر نفوذ را نشان می‌دهند، به طوری که خروجی تحتانی تانک اول میزان نفوذ سطحی و خروجی تحتانی تانک دوم، میزان نفوذ عمقی را نشان می‌دهد (Sugawara and Funiyuki, 1956).

شروع کن
جمعیت اولیه را به صورت رندم تولید کن
بهترین آنها را به عنوان ملکه انتخاب کن
به تعداد پرواز جفت گیری از پیش تعیین شده
یک مقدار اولیه برای میزان انرژی و سرعت ملکه در نظر بگیر
یک زنبورنر به صورت رندم تولید کن
مقدار کاهش انرژی ملکه در هر انتقال را محاسبه کن
تازمانی که انرژی ملکه تمام نشده
میزان برازش هر زنبورنر را محاسبه کن
اگر برازش زنبورنر از برازش ملکه بیشتر بود و محفظه اسپرم پر نشده بود
اسپرم زنبورنر را به محفظه اسپرم ملکه اضافه کن
در غیر این‌صورت تابع انتخاب احتمالاتی فعال می‌شود
اگر زنبور نر انتخاب شد و محفظه اسپرم ملکه پر نشده بود
اسپرم زنبور نر را به محفظه اسپرم ملکه اضافه کن
مقدار جدید انرژی ملکه را محاسبه کن
مقدار ضریب کاهش سرعت ملکه در هر انتقال را محاسبه کن

```
مقدار جدید سرعت ملکه را محاسبه کن
به احتمال سرعت ملکه، زن‌های زنبورنر را با ژن‌های ملکه عوض کن
به تعداد نوزادان از پیش تعیین شده
یک زنبورنر به صورت رندم از محفظه اسپرم ملکه انتخاب کن
نوزادان را با انجام اعمال ترکیب از روی ژن‌های والدین تولید کن
از زنبورکارگر برای پرورش نسل نوزادان استفاده کن
اگر بهترین نوزاد از ملکه بهتر بود
ملکه را با بهترین نوزاد عوض کن
کل نوزادان را از بین ببر
پایان
```

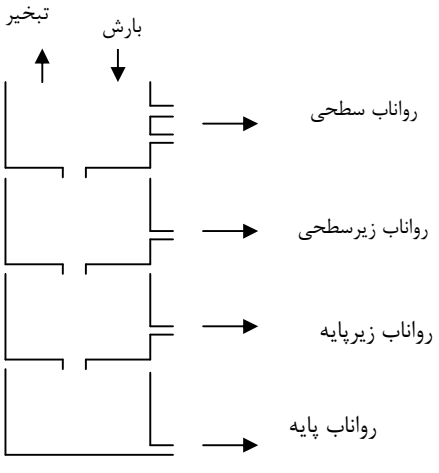
شکل ۱ شبه‌کد مدل بهینه‌سازی جفت‌گیری زنبورعسل

مدل تانک استفاده شده در این مقاله مطابق شکل ۳، شامل دو تانک است. تانک اول برای مدل نمودن رواناب زیرسطحی و تانک دوم برای مدل کردن رواناب پایه، به کار گرفته شده است. برای بررسی رفتار مدل تانک، رواناب ایجاد شده در هر زمان را تابعی خطی از میزان آب درون تانک فرض می‌کنیم و ضرایب مورد استفاده در این روابط خطی، بخشی از پارامترهای مدل را تشکیل می‌دهند. پس از وقوع بارش، ابتدا بارش بر سطوح نفوذناپذیر، نهرها و رودخانه‌ها به صورت ضریبی از بارش کل محاسبه می‌شود و سهم آن از کل بارندگی کسر می‌گردد. این مقدار در واقع شامل آن بخش از بارش می شود که مستقیما به رواناب تبدیل شده و فرصت نفوذ پیدا نمی کند.

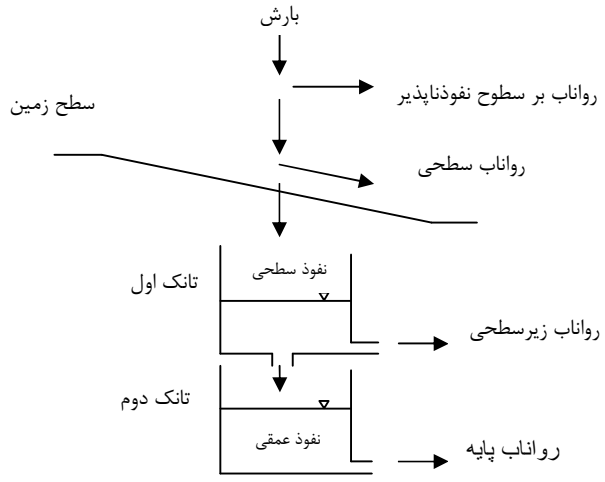
در این مرحله اگر مقدار بارش باقیمانده از قابلیت نفوذ زمین کمتر باشد، کل بارش باقیمانده به داخل زمین نفوذ می‌کند و در غیر این صورت، مقداری به شکل رواناب سطحی بر روی حوزه جریان می‌یابد و مابقی بارش به عنوان نفوذ سطحی به داخل زمین نفوذ می‌کند. برای محاسبه نفوذ سطحی روابط زیادی وجود دارد که در اینجا از رابطه گرین- امپ استفاده شده است:

$$F = k_s(1 + \frac{ns}{sm_1}) \quad (۵)$$

که در آن F نرخ نفوذ بوده و واحد آن برابر واحد هدایت هیدرولیکی خاک در حالت اشباع، k_s، است. ns و sm_1 نیز به ترتیب برابر تخلخل مفید و رطوبت اولیه خاک در سطح فوقانی می‌باشند.



شکل ۲ دیاگرام مدل تانک ارائه شده توسط سوگوارا



شکل ۳ دیاگرام مدل تانک استفاد شده در این مقاله

مطابق شکل۳، میزان نفوذ سطحی در خاک به عنوان ورودی تانک اول در نظر گرفته می‌شود. در این مدل برای این تانک دو خروجی در نظر گرفته شده است: خروجی اول همان جریان زیرسطحی است و خروجی دوم میزان نفوذ عمقی را نشان می‌دهد. نفوذ عمقی، ضریبی از رطوبت موجود در تانک اول است و بصورت جریان ورودی به تانک دوم اضافه شده و ارتفاع آب درون تانک دوم را بالا می‌برد. در این مرحله نیز رواناب پایه به صورت ضریبی خطی از میزان رطوبت درون تانک دوم در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب میزان رواناب نقطه‌ای در هر بازه زمانی برابراست با مجموع رواناب حاصل از بارش بر سطوح نفوذناپذیر، رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی و رواناب پایه. منظور از رواناب نقطه‌ای، درحقیقت بارش مازاد بر سطح حوزه است که در ایجاد رواناب نقش پیدا می‌کند. جهت تبدیل آن به رواناب باید آنرا به صورت حوزه‌ای روندیابی کرد. به‌عبارت دیگر، باید فرآیند روندیابی حوزه بر بارش مازاد اعمال گردد تا مقدار رواناب نهایی بدست آید. روش‌های مختلفی برای روندیابی یک حوزه وجود دارد. در این مقاله از روش زمان- سطح[1] برای روندیابی استفاده شده است. در این روش ابتدا سطح حوزه بر اساس خطوط هم‌زمان‌تمرکز (ایزوکرون) به چندین زیرحوزه تبدیل می‌شود و سپس روندیابی حوزه ای بر اساس سطح پوشش خطوط ایزوکرون محاسبه می‌شود.

نتایج کاربرد روش ها

جهت بررسی و ارزیابی کارایی الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل، از آمار و اطلاعات مربوط به پنج طوفان در حوزه آبریز کسیلیان، واقع در استان مازندران استفاده شده است. به این صورت که ابتدا، چهار طوفان اول به موازات یکدیگر قرار گرفته و پارامترهای مدل به‌گونه‌ای محاسبه می‌شود که هر چهار طوفان را به صورت یکجا کالیبره کند. سپس از نتایج کالیبراسیون این طوفان کلی در محاسبه رواناب حاصل از طوفان پنجم استفاده کرده و صحت مدل مورد بررسی قرار خواهد گرفت. حوزه آبریز کسیلیان دارای ۵ ایستگاه باران‌سنجی به نام‌های سنگده، ولیک‌چال، سوتکلا، کله و اوریملیک است و مساحت حوزه آبریز در این ۵ ایستگاه برابر ۶۹/۴ کیلومترمربع است. مدت زمان بارش و تاریخ وقوع هر یک از طوفان‌ها نیز در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱ مدت زمان و تاریخ وقوع طوفان‌های مورد استفاده

	طوفان اول	طوفان دوم	طوفان سوم	طوفان چهارم	طوفان پنجم
تاریخ وقوع	۱۳۷۱/۷/۲۳	۱۳۶۰/۹/۱۸	۱۳۷۱/۷/۱۵	۱۳۶۱/۲/۲۰	۱۳۶۴/۹/۶
مدت زمان بارش(ساعت)	۳/۵	۱/۱۵	۶/۴۵	۲/۱۵	۳/۴۵

[1] Time-Area Method

به منظور کالیبراسیون این مدل به کمک الگوریتم‌های جفت‌گیری زنبورعسل و ژنتیک، پارامترهای مدل و ضرایب روندیابی به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شوند و تعداد بهینه ضرایب روندیابی با استفاده از روش سعی‌وخطا تعیین می‌گردد. تعداد بهینه ضرایب روندیابی در این حوزه آبریز برابر ۳۲ بدست آمده است. حدود تغیرات متغیرهای تصمیم نیز بر اساس تجربه، به صورت زیر تعریف می‌شود:

جدول ۲ حدود تغییرات متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک و زنبورعسل

پارامتر	achp	ks	ns	fqf	fk	agw	sm_1	gwl_1	C(I)
حد بالا	۰/۱	۰/۱	۲۱	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۰/۱	۰/۱	۰/۰۸
حد پائین	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰

که در آن achp ضریب مؤلفه جریان بر سطوح نفوذ ناپذیر، Ks هدایت هیدرولیک خاک در حالت اشباع، ns نیروی مکش تخلخل خاک، fqf ضریب مورد استفاده در محاسبه رواناب سطحی، fk ضریب مورد استفاده در محاسبه نفوذ عمقی، sm_1 رطوبت اولیه خاک (ارتفاع آب اولیه در تانک اول)، gwl_1 سطح اولیه آب زیرزمینی (ارتفاع آب اولیه در تانک دوم) و C(I)ها ضرایب روندیابی به روش زمان- سطح هستند. روش کار به‌این‌صورت است که، ابتدا متغیرهای تصمیم در محدوده مشخص شده به صورت تصادفی تولید گردیده و سپس طبق روابط محاسباتی مدل تانک مقدار دبی محاسباتی بدست می‌آید. پس از آن مقدار تابع هدف براساس حداقل مربعات خطا، طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

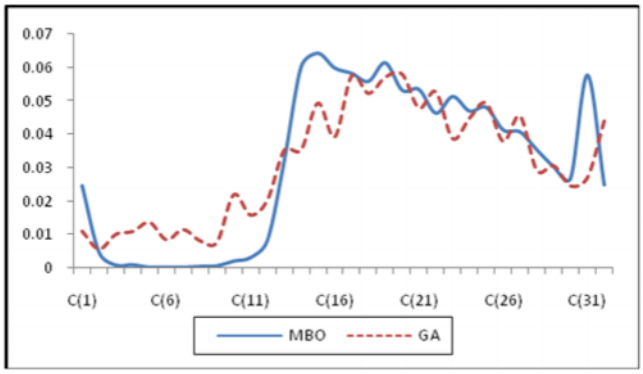
$$\text{Min} \sum(Q_{obs} - Q_{cal})^2 \qquad (۶)$$

که در آن Q_{obs} دبی مشاهداتی و Q_{cal} دبی محاسباتی است. از آنجایی که مجموع ضرایب روندیابی باید برابر یک باشد، این شرط به عنوان یک تابع حد برای مدل در نظر گرفته می‌شود و برای ارضای آن در هر دو الگوریتم ژنتیک و زنبورعسل از روش اصلاح استفاده شده است. الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل با فرض ۴۰۰۰ پرواز جفت‌گیری در هر اجرا و تولید ۳۰ نوزاد در هر پرواز و سایز محفظه اسپرم ۳۰ برای هر طوفان اجرا شده‌است. در این الگوریتم برای تولید نوزادان از تابع ترکیب یکنواخت و برای ارتقاء جواب‌ها نیز از تابع جهش مرزی، استفاده شده‌است. در الگوریتم ژنتیک از روش تک‌نقطه‌ای برای ترکیب و از روش یکنواخت برای جهش استفاده شده و انتخاب والدین با استفاده از روش چرخ‌گردان انجام شده است. این الگوریتم نیز با فرض ۲۵۰۰ سعی و تعداد ۵۰ کروموزوم در هر سعی برای هر طوفان اجرا شده است. مقدار پارامترها و نوع توابع کاوشی مورد استفاده در هر دو الگوریتم با انجام تحلیل حساسیت، تعیین شده است. در ادامه، نتایج حاصل از ۱۰ اجرای مختلف هر دو الگوریتم برای برای هر طوفان در جدول ۳ نشان داده شده است. در جدول ۴ نیز نتایج دو روش مقایسه شده است.

جدول ۳ پارامترهای مدل تانک محاسبه شده در ۱۰ اجرای مختلف کالیبراسیون طوفان کلی

		R^2	SE	achp	ks	ns	fqf	fk	agw	sm_1	gwl_1
الگوریتم زنبورعسل	بهترین جواب	۰/۶۹۸	۰/۳۷	۰/۰۰۴	۰/۲۳۷	۱۵/۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۹
	میانگین	۰/۶۹۷	۰/۳۴	۰/۰۴	۲/۰۷	۱۹/۶۳	۰/۰۰۳	۰/۰۱۶	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۳
	انحراف معیار	۰/۰۰۰۸	۰/۱۱	۰/۱۳	۴/۷۸	۷/۷۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۰۳	۰/۰۰۹
الگوریتم ژنتیک	بهترین جواب	۰/۶۹۶۱	۰/۳۷۵	۰/۰۰۲	۱/۳۲۲	۱۱/۴۷۶	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۲
	میانگین	۰/۶۸۸۰	۰/۳۷۸	۰/۰۰۴	۱/۱۵۴	۱۸/۵۴۵	۰/۰۰۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰۵
	انحراف معیار	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۳۸۸	۷/۸۳	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰۳	۰/۰۰۰۰۳

همانطور که در جدول۳ مشاهده می شود انحراف معیار پارامترهای کالیبره شده به جز پارامتر ns بسیار پایین است و بالابودن انحراف معیار پارامتر ns نیز به دلیل بالا بودن دامنه تغییرات آن است. بنابرین، هر دو الگوریتم در اجراهای مختلف به جوابهای یکسان و نزدیک به بهینه دست می یابند که حاکی از توانمندی این روشها است. از طرفی زمان اجرای آنها نیز تقریباً یکسان بوده (جدول۴) و به‌طوری‌که در شکل۴ دیده می شود ضرایب روندیابی حاصل از دو روش تقریباً منطبق بر هم می باشد.

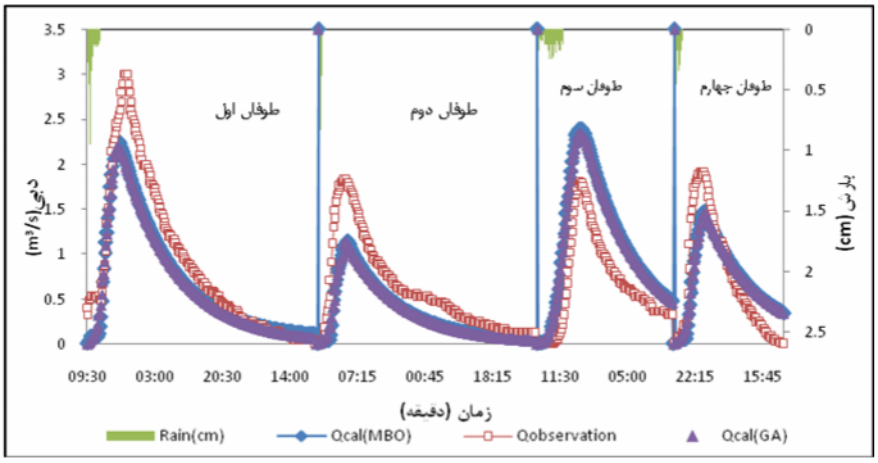


شکل ۴ میانگین ضرایب روندیابی محاسبه شده در ۱۰ اجرای مختلف از کالیبراسیون طوفان کلی

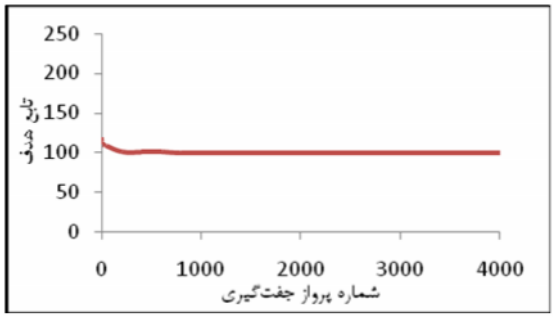
جدول ۴ مقایسه بین بهترین نتایج دو الگوریتم در کالیبراسیون طوفان کلی

پارامتر ارزیابی	الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل	الگوریتم ژنتیک
زمان اجرا (ثانیه)	۱۴۰	۱۵۵
ضریب همبستگی(R^2)	۰/۶۹۸۱	۰/۶۶۹۶۱
خطای استاندارد(SE)	۰/۳۷۲۸	۰/۳۷۵

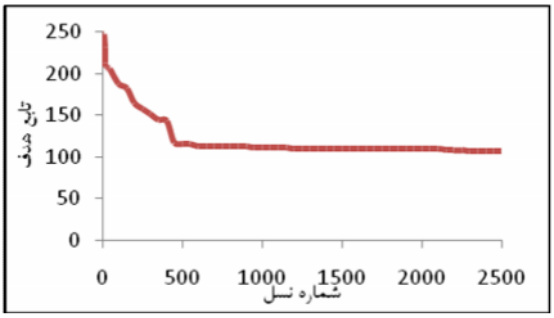
در ادامه هیدروگراف‌های مشاهده شده و محاسبه شده توسط الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل و ژنتیک در کالیبراسیون کلی چهار طوفان در شکل۵ مقایسه شده‌اند. با توجه به مقایسه هیدروگراف‌ها، می‌توان مشاهده نمود که هر دو الگوریتم در کالیبراسیون طوفان کلی بطور یکسان و موفق عمل می‌کنند.



شکل ۵ مقایسه هیدروگراف مشاهده شده و بهترین هیدروگراف‌های محاسبه شده در کالیبراسیون کلی چهار طوفان



شکل ۷ تغییرات تابع هدف در بهترین اجرای کالیبراسیون طوفان کلی توسط الگوریتم MBO



شکل ۶ تغییرات تابع هدف در بهترین اجرای کالیبراسیون طوفان کلی توسط الگوریتم GA

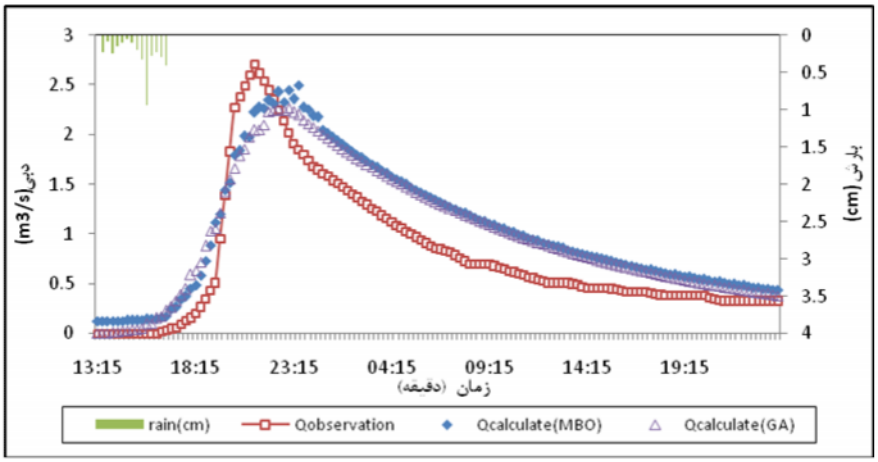
همچنین، مطابق شکلهای۶ و ۷، هر دو الگوریتم خیلی سریع به جواب بهینه همگرا می‌شوند ولی همگرایی الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل سریعتر از الگوریتم ژنتیک است.

پس از کالیبراسیون و محاسبه پارامترهای مدل، از میانگین پارامترهای بدست آمده در محاسبه رواناب حاصل از طوفان پنجم استفاده می‌شود تا با مقایسه این رواناب با رواناب مشاهده‌ای صحت مدل تأیید گردد. نتایج اجرای مدل به ازای پارامترهای بدست آمده از هر دو الگوریتم در جدول ۵ و مقایسه هیدروگراف مشاهده شده و هیدروگراف‌های محاسبه شده در صحت‌سنجی مدل، در شکل ۸ آمده است.

جدول ۵ مقایسه بین نتایج دو الگوریتم در صحت‌سنجی مدل به ازای آمار طوفان پنجم

پارامتر ارزیابی	الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل	الگوریتم ژنتیک
ضریب همبستگی(R^2)	۰/۸۹۲۱	۰/۸۶۹۱
خطای استاندارد(SE)	۰/۶۸۶۵	۰/۶۷۲۷

همانطور که مشاهده می‌شود، هر دو الگوریتم در صحت‌سنجی مدل به نتایج قابل قبولی دست یافته‌اند، البته الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل در محاسبه رواناب حاصل از طوفان پنجم دارای نتایج بهتری است.



شکل ۸ مقایسه هیدروگراف مشاهده شده طوفان پنجم و هیدروگراف‌های محاسبه شده در صحت‌سنجی مدل

نتیجه گیری:

با توجه به اینکه مشکل اصلی در استفاده از مدل‌های حوزه آبریز نظیر مدل تانک، تعداد زیاد پارامترهای آنها و در واقع کالیبراسیون این پارامترهاست، در این مقاله از دو الگوریتم ژنتیک و جفت‌گیری زنبورعسل در کالیبراسیون پارامترهای این مدل به‌ازای آمار پنج طوفان در حوزه آبریز کسیلیان استفاده شد و پس از کالیبراسیون، با استفاده از مشاهدات مستقل صحت مدل مورد تأیید قرار گرفت. تعداد پارامترهای کالیبره شده در این طوفان‌ها برابر ۳۹عدد بود و نتایج نشان می‌دهد که هر دو الگوریتم در کالیبراسیون مدل تانک، موفق بوده و دارای نتایج خوبی از جمله ضریب همبستگی نزدیک به یک و خطای استاندارد کم می‌باشند. همچنین، روند همگرایی این دو الگوریتم نیز سریع است. انحراف معیار پارامترهای کالیبره شده به جز پارامتر ns بسیار پایین است و بالابودن انحراف معیار پارامتر ns نیز به دلیل بالا بودن دامنه تغییرات آن است. در این راستا لازم است تحقیقاتی در جهت مقایسه کاربرد الگوریتم جفت‌گیری زنبورعسل در سیستم‌های پیچیده‌تر و نیز مقایسه آن با دیگر الگوریتم‌ها از جنبه انعطاف‌پذیری در کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گیرد.

منابع

1. Abbass, H,A. 2001a. A Single Queen Single Worker Honey–Bees Approach to 3-SAT. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. GECCO2001. San Fransisco. USA. 807-814.
2. Abbass, H,A. 2001b. A Pleometrosis MBO Approach to Satisfiability. Proceeding of the International Conference on Computational Intelligence for Modeling. Control and Automation. CIMCA2001. LasVegas. USA.
3. Abbass, H,A. 2001c. Marriage in Honey Bees Optimization: A Haplometrosis Polygynous Swarming Approach. Proceeding of the Congress on Evolutionary Computation. CEC2001. Seoul. Korea. 207-214.
4. Bozorg Haddad,O. and Afshar,A. 2004. MBO Algorithm: A New Heuristic Approach in Hydrosystems Design and Operation. 1st International Conference on Managing Rivers in the 21st Century: Issues and Challenges. Penang. Malaysia. 499-504.
5. Bozorg Haddad, O. Afshar, A and Mariano, MA. 2006. Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm: A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization. J.of Water Resources Management. 20(5):661-680.
6. Chang, H,S. 2006. Converging Marriage in Honey-Bees Optimization and Application to Stochastic Dynamic Programming. J. of Global Optimization, 35(3):423-441.
7. Chen,R,S. Pi,L,C. and Hsieh,C,C. 2005. Application of Parameter Optimization Method For Calibrating Tank Model. J.of the American Water Resources Association. 41(2):389-402.
8. Cooper,V,A. V,T,V,Nguyen and Nicell,J,A. 1997. Evaluation of Global Optimization Methods for Conceptual Rainfall-Runoff Model Calibration. J.of Water Science Technology. 36(5):53-60.
9. Fathian, M. Amiri, B. and Maroosi, A. 2007. Application of Honey-Bee Mating Optimization Algorithm on Clustering. J.of Applied Mathematic and Computation. 190(2):1502-1513.
10. Koudil, M. Benatchba, K. Tarabet, A. and Sahraoui, E,B. 2007. Using Artificial Bees to Solve Partitioning and Scheduling Problems in Codesign. J.of Applied Mathematics and Computation. 186(2):1710-1722.
11. Lee, Y,H. and Singh, V,P. 1999. Tank Model Using Kalman Filter. J.of Hydrologic Engineering. 4(4):344-349.
12. Mizumura, K. and Chao-Lin, Chiu. 1985. Prediction of Combined Snowmelt and Rainfall Runoff. J.of Hydraulic Engineering. 111(2):179-193.
13. Paik, K. Kim, J,H. and Lee, D,R. 2005. A Conceptual Rainfall-runoff Model Considering Seasonal Variation. J.of Wiley InterScience. 19(19):3837-3850.
14. Phein, H,N. and Pradhan, P,S. 1983. The Tank Model in Rainfall-Runoff Modelling. J.of Water SA. 9(3):93-102.
15. Rinderer, T,E. and Collins, A,M. 1986. Behavioral Genetics In T.E. Rinderer (Eds.), Bee Genetics and Breeding. Academic Press. Inc. 155–176.

16. Sugawara, M and Funiyuki, M. 1956. A Method of Revision of the River Discharge by Means of a Rainfall Model. Collection of research papers about forecasting hydrologic variables. 14-18.
17. Sugawara, M. 1979. Automatic Calibration of the Tank Model. Hydrological Sciences-Bulletin. 24. No.3.
18. Teo, J. and Abbass, H,A. 2001. An Annealing Approach to the Mating-Flight Trajectories in the Marriage in Honey Bees Optimization Algorithm. Technical Report CS04/01. School of Computer Science. University of New South Wales at ADFA.
19. Teo, J. and Abbass, H,A. 2003. A True Annealing Approach to the Marriage in Honey-Bees Optimization Algorithm. The Inaugural Workshop on Artificial Life. Adeline. Australia. 1-14.

Calibration of Rainfall-runoff models using MBO algorithm

Rainfall-runoff models are important in the water resource management of river basins. The main aspect of this role is determined through proper use of these models and relies on the quality of their calibration. Mainly, there are two approaches in rainfall-runoff model calibrations. The first one is a simple time consuming trial and error method and is limited to small problems. The second approach, on the other hand, uses optimization techniques to find proper values of parameters and is capable of handling large scale problems calibrations.
This article references an attempted calibration of a precipitation-runoff model using a newly developed heuristic approach called Marriage in Honey Bees Optimization (MBO). The process contains development of simulation-optimization models using the heuristic methods for improving the value of objective function obtained through the simulation of a runoff-rainfall Tank model.
The results obtained through the application of MBO compares favorably to those of a Genetic Algorithm.

Keywords: Calibration, Tank Model, Honey Bees Mating Algorithm, Genetic Algorithm