علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره شانزدهم، شماره ویژه ۹۳

طراحی بهینه حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌های آبریز با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان چند هدفه و مدل SWAT

عباس افشار [۱]

محمد جواد امامی اسکاردی [۲*]

Mj.imami@gmail.com

فرزین جیرانی [۳]

تاریخ دریافت: ۹۰/۸/۱۰ **تاریخ پذیرش:۹۰/۱۱/۲۰**

چکیده

زمینه و هدف: کنترل بار آلودگی غیر نقطه‌ای[۴] به منظور سالم نگاه‌داشتن پیکره‌های آبی از اهمیت به سزایی در مدیریت سیستم‌های منابع آب برخوردار است. یکی از موثرترین سازه‌ها در مدیریت بار آلودگی غیر نقطه‌ای، حوضچه‌های بازداشت می‌باشند. طراحی یکپارچه‌ی مجموعه حوضچه‌های بازداشت در مجموعه زیر حوضه‌ها می‌تواند با بازدهی بیشتری در حذف رسوبات همراه باشد. جهت دست‌یابی به این هدف اتصال الگوریتم‌های بهینه‌ساز و نرم‌افزارهای مدل‌سازی حوضه‌های آبریز می‌تواند کمک به سزایی در طراحی بهینه‌ی حوضچه‌های بازداشت باشد.

روش کار: هدف از انجام این پژوهش استفاده از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز چند منظوره برای برنامه‌ریزی و طراحی یکپارچه‌ی حوضچه‌های بازداشت در سطح حوضه‌های آبریز است که بتوان مصالحه‌ای را بین اهداف مختلف برقرار نمود. واضح است که با استفاده از حوضچه‌های بازداشت بزرگتر و با تعداد بیشتر می‌توان میزان حجم بالاتری از رسوبات را به دام انداخت، ولی متعاقبا هزینه‌های ساخت حوضچه‌های بازداشت نیز افزایش خواهد یافت. جهت بهینه‌سازی اندازه و مکان حوضچه‌های بازداشت در این مساله‌ی دو هدفه، از الگوریتم دو هدفه جامعه مورچگان و جهت شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز از مدل SWAT بهره‌گرفته شده است. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان دو هدفه می‌توان به یک جبهه جواب‌های نامغلوب از دو تابع هدف متضاد دست یافت که عبارتند از: هزینه‌های کنترل بار رسوب تولیدی و بار رسوب تولیدی.

یافته‌ها و نتایج: کارایی مدل پیشنهادی بر روی یک حوضه‌ی آبریز در غرب ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. استفاده از بهینه‌ساز کلونی مورچگان و شبیه‌ساز SWAT، به محققین توانایی مدل‌سازی حوضه‌های آبریز و کنترل بار آلودگی غیر نقطه‌ای را خواهد داد. مدل چند هدفه با توجه به فراهم نمودن جبهه پرتو می‌تواند مدیران را در اتخاذ راهکار مناسب جهت کنترل کیفیت رواناب خروجی از حوضه‌ی آبریز یاری نماید.

واژه های کلیدی: الگوریتم جامعه مورچگان دو هدفه، بار رسوب تولیدی، حوضچه‌های بازداشت، حوضه‌های آبریز، مدل SWAT.

۱- استاد تمام دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران- گرایش سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده عمران[*](مسؤول مکاتبات)

۳- دانشجویی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده کشاورزی

4- Non-Point Source Management (NPSM)

مقدمه

کنترل بار آلودگی غیر نقطه‌ای و رسوبات همواره از مهم‌ترین مسایل کیفیت منابع آب در پیکره‌های آبی حوضه‌های آبریز (همانند سدها و دریاچه‌ها) بوده است. به منظور کاهش آلودگی‌ها، توجه به مدیریت بار آلودگی غیر نقطه‌ای می‌تواند راه‌گشا باشد. در این پژوهش حوضچه-های بازداشت جهت کنترل بار رسوب تولیدی از حوضه‌ای آبریز به کار گرفته

شده‌اند. حوضچه‌های بازداشت در طی سالیان مختلف و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۱ و۲). اغلب جانمایی و طراحی حوضچه‌های بازداشت در زیر حوضه‌های یک حوضه‌ی بزرگ به صورت منفرد و جدا از هم صورت می‌پذیرد. طراحی یکپارچه‌ی مجموعه حوضچه‌های بازداشت در مجموعه زیر حوضه‌ها می‌تواند با بازدهی بیشتری در حذف رسوبات همراه باشد و به عنوان بهبود روش‌های متداول پیشین در نظر گرفته شود. ولی پیچیدگی مدل نمودن حوضه‌های آبی برای برآورد بار آلودگی غیر نقطه‌ای، مشکلاتی را در پیدا کردن وضعیت بهینه سازه‌های کنترل رسوب به وجود می‌آورد. اتصال الگوریتم‌های بهینه‌ساز و نرم‌افزارهای مدل‌سازی حوضه‌های آبریز و ارایه یک مدل بهینه‌ساز-شبیه‌ساز می‌تواند در جهت رفع این مشکل

راه‌گشا باشد. غالب مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز ارایه می‌شوند، از روابط ساده‌ای پیروی می‌کنند و بعضا تنها قادر به مدل کردن رواناب‌ها در حوضه‌های آبریز هستند. به همین علت استفاده از یک مدل کارا در شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز ضروری است. امروزه توسعه مدل‌های شبیه‌سازی به همراه توسعه فزاینده الگوریتم-های بهینه‌سازی که قابلیت حل مسایل بسیار پیچیده و به ویژه غیر خطی را دارند، بسیار امید بخش بوده و نیاز به ساده‌سازی و استفاده از مدل‌های خطی برای تقریب سیستم‌های پیچیده را کاهش داده است. از جمله شبیه‌سازهایی که استفاده از آن در حوضه‌های آبریز طی سالیان اخیر گسترش یافته، مدل SWAT می‌باشد. در این پروژه نیز به منظور شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز از مدل SWAT بهره گرفته شده است. SWAT مدل شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز، آبگیر و رودخانه‌ها است که توسط دکتر Arnold[1] برای سازمان تحقیقات کشاورزی[2] آمریکا ارایه شده است.

Tolson و Shoemaker (۲۰۰۴) از مدل SWAT جهت مدل-سازی رودخانه‌ی کانوسویل استفاده کرده‌اند (۳). تحقیقات Tolson و Shoemaker (۲۰۰۴) نشان داد که مدل SWAT قادر است به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی اثرات طولانی مدت روش‌های مدیریتی متفاوت برای کاهش بار فسفر در مخزن کانونزویل شهر نیویورک استفاده شود.Rostamian و همکاران (۲۰۰۸) از این مدل برای شبیه‌سازی دو حوضه‌ی آبریز بهشت‌آباد و ونک در ایران استفاده کرده‌اند (۴). ناحیه‌ای در مریلند توسط Shepherd و همکاران (۱۹۹۹) برای سنجش میزان توانایی مدل در شبیه‌سازی هیدرولیکی، هیدرولوژیکی و کیفی آب مورد استفاده قرار گرفت (۵)، از جمله مزیت‌های ذکر شده با این مدل عبارت بودند از: ۱- بزرگ مقیاس بودن مدل، و ۲- توزیعی بودن و هم‌آهنگ بودن مدل با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی(GIS). Abbaspour و همکاران (۱۹۹۷) از مدل SWAT برای شبیه‌سازی تمام فرایندهای مؤثر بر کیفیت آب، رسوب و چرخه عناصر غذایی حوضه رودخانه تور، در شمال شرقی کشور سوییس بهره گرفتند (۶). Taheriyoun و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از مدل SWAT و الگوریتم بهینه‌ساز ژنتیک اقدام به بهینه کردن بهترین روش‌های مدیریتی در یک حوضه‌ی آبریز در ایران نمودند (۷). همچنین تحقیقاتی جهت پیش‌بینی بار رسوب تولیدی در حوضه قرسو توسط صادقی و همکاران (۱۳۸۹) صورت گرفته است (۸).

در سال‌های اخیر استفاده از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی در مدیریت سیستم‌های منابع آب از جمله: الگوریتم ژنتیک(GA)، نورد شبیه‌سازی شده(SA)، جفت‌گیری زنبور عسل(HBMO) و الگوریتم جامعه مورچگان (ACO) گسترش یافته است. یکی از الگوریتم‌های فراکاوشی الهام گرفته شده از طبیعت، الگوریتم جامعه مورچگان است. الگوریتم جامعه مورچگان با توجه به رفتار یک دسته از مورچگان در یافتن بهینه‌ترین مسیر جهت دست‌یابی به غذا ابداع شده است. با استفاده از الگوریتم جامعه مورچگان در مسایلی که دارای متغیرهای تصمیم گسسته می‌باشند، به علت ذات گسسته این الگوریتم می‌توان به جواب‌های بهتری نسبت به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی دست یافت. در سال‌های اخیر از الگوریتم جامعه مورچگان در بخش‌های مختلف مدیریت سیستم‌های منابع آب همانند بهره-برداری از مخازن و بهینه‌سازی شبکه‌های آبرسانی استفاده شده است. مقالاتی که در سال‌های اخیر از الگوریتم جامعه مورچگان در مدیریت سیستم‌های منابع آب بهره‌گرفته اند پیرامون این موضوعات بوده‌اند: بهینه‌سازی شبکه‌های آب شهری(۹)؛ بهره‌برداری از مخازن به صورت تک و چند هدفه (۱۰؛ ۱۱؛ ۱۲؛ ۱۳؛ ۱۴و ۱۵)؛ و شبکه توزیع آب (۱۶و۱۷).

هدف از این پژوهش، استفاده از یک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز است که بتوان به طراحی بهینه حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌های آبریز پرداخت. با کمک مدل شبیه‌ساز-بهینه‌ساز می‌توان مصالحه‌ای را بین اهداف مختلف برقرار کرد. زیرا با طراحی حوضچه‌های بازداشت بزرگ-تر می‌توان حجم بالاتری از رسوبات را کنترل نمود. ولی اجرا و طراحی

1- Dr. Jeff Arnold
2- USDA Agricultural Research Service (ARS)

حوضچه‌های با حجم بیشتر نیازمند صرف هزینه‌های بالاتری خواهد بود. در نتیجه با یک مساله دو هدفه مواجه هستیم که یک هدف آن کاهش بار رسوب تولیدی و هدف دیگر آن کمینه نمودن هزینه‌های ساخت حوضچه‌های بازداشت است. جهت بهینه‌سازی حوضچه‌های بازداشت از الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان و برای شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز نیز از مدل SWAT بهره‌گرفته شده است. کارایی مدل پیشنهادی نیز بر روی حوضه‌ی قرسو در غرب ایران بررسی و مطالعه شده است.

روند شبیه‌سازی در مدل SWAT

به طور کلی براساس فرمت داده‌ها، اطلاعات موردنیاز برای شبیه‌سازی به سه دسته تقسیم می‌شوند که عبارتند از لایه‌های اطلاعاتی، فایل-های اطلاعاتی (dbf. یا txt.) و پارامترهای ورودی که به صورت عددی وارد می‌گردد. لایه ارتفاعی رقومی یا DEM باید به صورت grid و سیستم مختصات جغرافیایی مشخص به مدل وارد شود. مدل SWAT نقشه خاک منطقه را یا به صورت shape و یا به فرم grid از کاربر دریافت می‌کند. نقشه کاربری اراضی منطقه را نیز می‌توان به صورت grid یا shape جهت تعیین وسعت و نام پوشش‌های گیاهی مختلف در زیرحوضه تعیین نمود. آخرین لایه‌ی اطلاعاتی شبکه آبراهه‌های حوضه می‌باشد و می‌توان از آن در مدل استفاده نمود. فایل‌های ورودی با پسوند dbf. یا txt. تهیه شده و وارد مدل می‌گردد. این فایل‌ها شامل دما، بارش، رطوبت نسبی، تابش، سرعت باد به صورت روزانه و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی، باران‌سنجی و دماسنجی می‌باشد.

چرخه هیدرولوژیکی در SWAT

چرخه هیدرولوژیکی در SWAT به صورت روابط پیوستگی مدل می‌شود و عبارتست از:

(۱)

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

Q_{gw}: حجم نهایی آب در خاک (میلی‌متر)؛ SW_0 : مقدار اولیه آب در خاک (میلی‌متر)؛ t زمان (روز)؛ R_{day} : میزان بارش در روز iام (میلی‌متر)؛ Q_{surf} : مقدار حجم رواناب در روز iام (میلی‌متر)؛ E_a : تبخیر روز iام (میلی‌متر)؛ W_{seep} : مقدار آب وارد شده به منطقه آبی از پروفایل زمین در روز iام (میلی‌متر): SW_t : میزان آب بازگشتی در روز iام (میلی‌متر).

روندیابی سیلاب در حوضچه‌های بازداشت و تالاب‌ها در مدل SWAT

حوضچه‌های بازداشت و تالاب‌ها پیکره‌های آبی هستند که بخشی از حجم آب هر زیر حوضه به داخل آن‌ها سرازیر می‌شود. معادله پیوستگی برای حوضچه‌های بازداشت عبارتست از:

(۲)

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep}$$

V: برابر میزان آب آبگیر در انتهای روز (متر مکعب)؛ V_{stored} : میزان حجم آب در آبگیر در ابتدای روز (متر مکعب)؛ V_{flowin}: میزان آب وارد شده به آبگیر در طول روز (متر مکعب)؛ $V_{flowout}$: میزان آب خارج شده از آبگیر در طول روز (متر مکعب)؛ V_{pcp}: میزان آب وارد شده به آبگیر از طریق نزولات جوی در طول روز (متر مکعب)؛ V_{evap} : آب خارج شده از آبگیر در طول روز از طریق تبخیر (متر مکعب)؛ V_{seep}: میزان آب خارج شده از آبگیر از طریق نشت به داخل زمین (متر مکعب).

پیوستگی جرم رسوب در مدل SWAT

پیوستگی جرم رسوب در مدل SWAT به طریق زیر محاسبه می-شود:

(۳)

$$sed_{wb} = sed_{wb,i} + sed_{flowin} - sed_{stl} - sed_{flowout}$$

که در آن داریم sed_{wb}: میزان بار رسوب در حوضچه‌ی بازداشت در انتهای روز (تن)؛ $sed_{wb,i}$: میزان بار رسوب در حوضچه‌ی بازداشت در ابتدای روز (تن)؛ sed_{flowin}: میزان بار رسوب ورودی به حوضچه‌ای بازداشت در طول روز (تن)؛ sed_{stl}: میزان رسوب خارج شده از حوضچه‌ی بازداشت طی فرایند ته نشینی (تن)؛ $sed_{flowout}$: میزان رسوب خارج شده از حوضچه‌ی بازداشت به همراه آب خروجی (سرریز شده) (تن).

کلونی مورچگان

الگوریتم جامعه مورچه‌ها با الهام از رفتار مورچه‌های واقعی در هنگام جستجوی غذا توسعه یافته و در دهه‌های اخیر در برخی از مسایل بهینه‌یابی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق برای حل مساله‌ای دو هدفه طراحی بهینه حوضچه‌های بازداشت از الگوریتم مذکور استفاده شده است. وقتی مورچه‌ای به دنبال غذا می‌گردد، در طول مسیر حرکت خود، ماده بوداری به نام فرامان از خود به جا می-گذارد که سایر مورچه‌هایی که در جستجوی غذا هستند را تحریک به عبور از آن مسیر می‌نماید. برای ارایه رفتار این دسته از مورچه‌ها به

حالت الگوریتمی اصلاحاتی توسط Dorigo در سال ۱۹۹۲پیشنهاد گردید (۱۸). در الگوریتم‌های جامعه مورچگان جهت یافتن جوابی بهینه از فرامان مصنوعی استفاده می‌شود. فرامان مصنوعی یک عدد حقیقی $\tau \in IR$ است که به گزینه‌های قابل انتخاب توسط مورچه مصنوعی، تخصیص داده می‌شود. در گراف هر مساله یک مقدار فرامان τ_{ij} به هر مسیر (i,j) داده می‌شود که بیانگر مطلوبیت این مسیر می‌باشد. یک مورچه که در گره i واقع شده است، گره بعدی خود را بر اساس رابطه انتقال تصادف نسبی زیر انتخاب می نماید:

مقدار P_{ij}، احتمال انتخاب گره j توسط مورچه‌ای واقع در گره‌ی i است. همان گونه که مشاهده می‌گردد، مقادیر بزرگ فرامان مسیر ij باعث افزایش احتمال انتخاب آن مسیر خواهد شد. علاوه بر فرامان، در بسیاری از مسایل می‌توان از یک هدایت کننده کاوشی[1] جهت ساخت جواب‌های متغیر استفاده نمود که در آن رابطه انتقال تصادفی نسبی به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$P_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{h \in S} \tau_{ih}} \quad (۴)$$

$$P_{ij} = \frac{{\tau_{ij}}^{\alpha} . {\eta_{ij}}^{\beta}}{\sum_{h \in S} {\tau_{ih}}^{\alpha} . {\eta_{ih}}^{\beta}} \quad (۵)$$

در این رابطه η_{ij} هدایت کننده کاوشی می‌باشد. دو پارامتر α و β در رابطه فوق، جهت تنظیم وزن فرامان و اطلاعات کاوشی مورد استفاده قرار می گیرند.

به هنگام‌سازی فرامان

منظور از به هنگام‌سازی فرامان، تمرکز بیشتر فرایند جستجو بر منطقه‌ای از فضای جواب‌هاست که امید آن می‌رود، با جستجوی متمرکزتر در آن بتوان به نتایج مطلوب‌تری دست یافت (۱۹). راهکارهای اصلی برای این فرایند، ابتدا تبخیر فرامان است که باعث کاهش میزان فرامان به یک مقدار تعریف شده می‌گردد. پس از آن تقویت فرامان است که با افزودن عبارت به هنگام کننده به فرامان‌های انتخابی صورت می‌گیرد. شکل کلی به هنگام سازی فرامان به صورت زیر است.

$$\tau_{ijk} \leftarrow (1-\rho).\tau_{ijk} + \rho \Delta \tau_{ijk} \quad (۶)$$

که در آن $\rho \in [0,1)$ پارامتری است که میزان از دست دادن فرامان را، در هر دوره تبخیر نشان می‌دهد. Δ_{ij} یک مقدار بهنگام سازی است که در صورتی که مسیر (i,j) توسط مورچه طی نشده باشد، برابر صفر است.

مقدار واقعی Δ_{ij} و نیز راهکار مخصوص اعمال آن عامل اصلی تفاوت بین الگوریتم‌های مختلف مورچه است که در این پژوهش برابر است با:

$$\Delta \tau_{ijk} = \frac{KCC}{f^k(B)} \quad (۷)$$

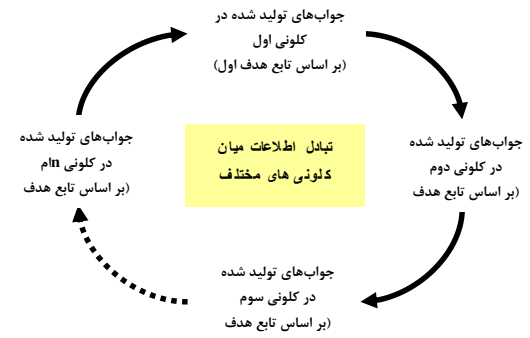
که در آن KCC مقداری ثابت و $f^k(B)$ بهترین مقدار تابع هدف در کلونی k می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار $\Delta \tau_{ijk}$ برای مسیرهایی غیر از مسیری که بهترین مورچه طی می‌کند، صفر در نظر گرفته می‌شود.

الگوریتم جامعه مورچگان در حالت چند هدفه

اولین الگوریتم چند هدفه جامعه مورچگان توسط Mariano و Moralesدر سال ۱۹۹۹ به کار گرفته شد (۲۰). در سال ۲۰۰۱، Iredi و Middendrof الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌ها را برای حل مساله دو معیاره مسیریابی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار دادند (۲۱). در سال ۲۰۰۳ الگوریتم MACS توسط Baran و Schaerer پیشنهاد شد (۲۲). در این الگوریتم از یک ماتریس فرامان و چند تابع حاوی اطلاعات فراکاوشی به تعداد اهداف استفاده شده است. در سال ۲۰۰۴، الگوریتم P-ACO توسط Doerner و همکاران ارایه گردید (۲۳). در این الگوریتم نیز از k تابع مختلف به هنگام سازی فرامان به تعداد k تابع هدف استفاده شده است. Dorigo و Stutzle در سال ۲۰۰۴ به تفصیل در مورد کاربرد الگوریتم‌های جامعه مورچگان در مسایل بهینه‌سازی چند هدفه صحبت نموده‌اند (۲۴). الگوریتمی که در این تحقیق برای حل مساله مورد استفاده قرار خواهد گرفت، برگرفته از کار Afshar و همکاران در سال ۲۰۰۸ است که برای حل مساله بهره‌برداری از مخزن ارایه شده است (۲۵).

از موارد حایز اهمیت در این الگوریتم نحوه ارتباط جوامع اختصاص داده شده به هر کدام از اهداف می‌باشد. در الگوریتم پیشنهادی در هر گام محاسباتی تمامی راه‌حل‌های تولید شده در یک جامعه در اختیار جامعه مقابل قرار می‌گیرد تا مورچه‌های آن جامعه هم به نوبه خود سعی در بهبود جواب‌ها بر اساس معیارهای خود داشته باشند. الگوی مربوطه برای نحوه ارتباط جوامع مختلف در شکل (۱) نمایش داده شده است.

1- Heuristic Guidance



شکل ۱- نمایش نحوه تبادل اطلاعات مابین جوامع مورچه‌ها و اهداف نظیر آن‌ها (مصطفوی، ۱۳۸۹)

معرفی مدل پیشنهادی

در این تحقیق جهت شبیه‌سازی حوضه از مدل SWAT و برای بهینه‌سازی آن از الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان دو هدفه استفاده شده است. شاخص کیفی سنجش در این مساله رسوب خروجی از حوضه آبریز و یا TSS[1] می‌باشد. کارایی مدل ارایه شده بر روی یک حوضه آبریز در ایران سنجیده و نتایج آن ارایه شده است.

مدل بهینه‌سازی دو هدفه

مساله به شکل دو هدفه عبارت است از: حداقل کردن هزینه‌های ساخت حوضچه‌های بازداشت، حداکثر نمودن کیفیت آب خروجی و یا حداقل نمودن بار رسوب تولیدی. شاخص کیفی سنجش آب نیز میزان رسوب خروجی از حوضه آبریز منظور شده است. در ادامه بیان مساله را در شکل ریاضی مشاهده می‌کنید.

Minimize (۸)

$$PONDC = \sum_i \sum_j PONDC_{ij}$$

$$SedL_{ave-annual}$$

Subject to

$$A_k \le A_{\max}$$

$$S_j \le S_{j\max}$$

$$SedL_{\max} = g_2(x,u,t)$$

$PONDC$: هزینه کل ساخت حوضچه‌های بازداشت، که برابر است با جمع هزینه‌های ساخت حوضچه‌های بازداشت در هریک از زیرحوضه‌ها. $SedL_{ave-annual}$: عبارتست از میزان میانگین رسوب سالانه تولیدی از حوضه آبریز، $PONDC_{ij}$: هزینه ساخت حوضچه شماره j در زیر حوضه شماره i، A_k : سطح حوضچه بازداشت در زیر حوضه k که حداکثر و حداقل میزان آن توسط کاربر تعیین می‌شود، برای حوضچه‌ها باید به طور معین یک میزان مشخصی از حداقل و حداکثر اندازه را تعیین نمود که در این قسمت به صورت قید اعمال خواهد شد، S_j : میزان حجم حوضچه بازداشت که باید از یک میزان حداکثری کمتر باشد و آن عبارتست از: $S_{j\max}$: حداکثر حجم حوضچه بازداشت، و تساوی آخر نیز بیانگر قیودات هیدرولیکی و هیدرولوژیکی می‌باشد که در طراحی حوضچه‌های بازداشت باید در برنامه شبیه‌سازی رعایت شود. طرح کلی مدل را در شکل ۲ مشاهده می‌نمایید.

1-Total suspended solid

شکل ۲- طرح کلی مدل

کاربرد مدل‌های توسعه یافته

همان گونه که اشاره شد، در این تحقیق برای حل مساله کنترل بار آلودگی غیر نقطه‌ای، از یک مدل شبیه‌ساز- بهینه‌ساز استفاده شده است. که به منظور کارایی مدل پیشنهادی، آن‌را برروی یک حوضه‌ی آبریز در ایران مورد بررسی قرار داده‌ایم. اجزای مدل شامل ۱- شبیه-ساز حوضه‌ی آبریز توسط (در اینجا مدل SWAT)، ۲- الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها (NA-ACO) می‌باشد که اهداف، معیارها و محدودیت‌های کمی و کیفی موجود در سیستم را در نظر می‌گیرد.

به طور خلاصه روش کار مدل به این ترتیب است که ابتدا در هر مرحله مورچه‌های هر کلونی (در اینجا دو کلونی) مسیر خود را انتخاب می‌کنند که شامل یک سری گره است. هر گره متغیرهای تصمیمی شامل ارتفاع حوضچه‌های بازداشت (حجم آن‌ها پس از تعیین عرض و طول متناسب با این ارتفاع) در هر زیر حوضه، می‌باشند. سپس الگوریتم به محاسبه‌ی هزینه‌ی ساخت این حوضچه‌های بازداشت می-پردازد. هزینه ساخت حوضچه‌های بازداشت برای واحد حجم حوضچه-ها برابر ۱.۵ دلار در هر متر مکعب درنظر گرفته شده است. مدت زمان نگهداری ۱۰ ساله و هزینه‌ی نگهداری برابر ۳ درصد هزینه‌ی کل ساخت حوضچه‌ها، در هر سال منظور شده است. سپس با استفاده از مدل SWAT میزان رسوب خروجی از حوضچه‌ی بازداشت نیز محاسبه خواهد شد. میزان پوشش هریک از زیر حوضه‌ها در هر دو بخش ثابت فرض شده است و به اصطلاح یک سری نقاط مشخص به صورت بالقوه برای احداث حوضچه‌های بازداشت در هر زیر حوضه وجود دارند.

به منظور تعیین حجم و سطح حوضچه‌ی بازداشت از یک رابطه‌ی حجم-ارتفاع و سطح-ارتفاع به شکل زیر استفاده شده است:

$$Volume = (a.b.h) + ((h\text{^}3)/(3.sl_shore.sl_dam)) + ((h\text{^}3)/3.sl_shore\text{^}2.) + (a.(h\text{^}2)/sl_shore) + (b*(h\text{^}2)/(2.sl_shore)) + (b.(h\text{^}2)/(2.sl_dam)) \quad (۹)$$

که درآن: $Volume$: حجم حوضچه‌ی بازداشت، a: طول، b: عرض، h: ارتفاع، sl_shore: شیب کناره حوضچه (۱ به ۵ در نظر گرفته می‌شود. در فرمول ۵ باید قرار داده شود)، sl_dam: شیب سد (۱ به ۲ در نظر گرفته می‌شود. در فرمول ۲ باید قرار داده شود).

برای کارایی بهتر حوضچه‌ی بازداشت طول آن را دو برابر عرض آن اختیار نموده‌ایم، درنتیجه داریم:

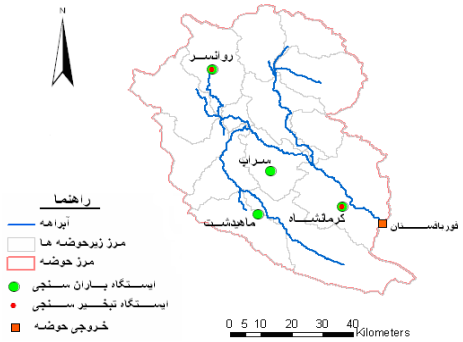
$$a = 2.b \quad (۱۰)$$

$$Surface = (a.b) + (h.b/sl_shore) + (2.(h\text{^}2)/(sl_shore\text{^}2)) + (a.h.2/sl_shore) + (2.(h\text{^}2)/(sl_shore.sl_dam)) + (b.h/sl_dam) \quad (۱۱)$$

که درآن: $Surface$: سطح حوضچه‌ی بازداشت، a: طول، b: عرض، h: ارتفاع، sl_shore: شیب کناره حوضچه (۱ به ۵ در نظر گرفته می‌شود. در فرمول ۵ باید قرار داده شود)؛ sl_dam: شیب سد (۱ به ۲ در نظر گرفته می‌شود. در فرمول ۲ باید قرار داده شود).

تشریح منطقه تحقیق قرسو

زیرحوضه قرهسو به وسعت ۵۷۹۳ کیلومترمربع واقع در شمال غرب حوضه کرخه در حدود ۱۱/۴ درصد حوضه کرخه را دربرمی‌گیرد. ۴۸ درصد این زیرحوضه کوهستانی بوده و ۵۲ درصد آن را دشت‌ها تشکیل می‌دهند. حداکثر ارتفاع این زیرحوضه ۳۳۵۱ متر و حداقل ارتفاع ۱۳۰۰ متر می‌باشد. جریانات اصلی در این حوضه شامل رودخانه‌های مرک، قرهسو و رازآور می‌باشد. در شکل شماره‌ی (۳) یک طرح کلی از حوضه را مشاهده می‌کنید و در جدول شماره‌ی ۱ مشخصات بیشتری از حوضه‌ی قرسو قابل ملاحظه است.



شکل ۳- حوضه‌ی آبریز قرسو

جدول ۱- مشخصات حوضه‌ای قرسو

مساحت	متغیر تصمیم	هزینه‌ی واحد حجم ساخت حوضچه‌ها	مدت نگهداری	هزینه‌ی نگهداری	دوره‌ی اجرا
۵۷۹۳ کیلومتر مربع	ارتفاع	۱/۵ دلار برای هر متر مکعب	۱۰ سال	۳ درصد هزینه‌ی ساخت	۵ سال

حوضه‌ی قرهسو در شرایط آب و هوایی متنوعی قرار دارد. بخش مرکزی دشت‌ها دارای اقلیم نیمه خشک سرد و مرطوب و حواشی دشت‌ها تحت پوشش اقلیم ارتفاعات و در نهایت منطقه بین دشت‌ها و ارتفاعات دارای اقلیم مرطوب سرد می‌باشد. رژیم بارش حوضه، مدیترانه‌ای بوده و بخش قابل ملاحظه‌ای از ریزش‌ها به صورت جامد است.

بافت خاک حوضه در دشت‌ها بسیار سنگین بوده و قابلیت زهکشی کمی دارد، به طوری که در برخی مناطق محدودیت عمق آب زیرزمینی جهت کشاورزی وجود دارد. خاک مناطق تپه‌ای و دامنه‌ها سبک بوده و عمدتاً مخلوطی از ذرات درشت شن و ماسه به همراه سیلت می‌باشد. خاک مناطق کوهستانی نیز عمدتاً فرسایش یافته است و در برخی مناطق، عاری از پوشش گیاهی بوده و بستر سنگی نمایان می‌باشد. حوضه‌ی قرسو توسط صادقی و همکاران (۱۳۸۹) برای رواناب و رسوب خروجی شبیه‌سازی و واسنجی شده است (۸).

کالیبراسیون و اعتباریابی مدل

برای انجام عملیات Calibration (واسنجی) از داده‌های سال‌های ۱۹۹۰ الی ۱۹۹۶ و برای Validation (تأیید اعتبار) مدل از داده‌های سال‌های ۱۹۹۷ الی ۲۰۰۰ استفاده شد. کالیبراسیون توسط مدل SUFI_2 و توسط صادقی و همکاران (۱۳۸۹) توسط نرم‌افزار CUP_SWAT صورت گرفت. (جدول ۲)

جدول ۲- نتایج کالیبره و تأیید اعتبار دبی و رسوب روزانه

ردیف	کالیبراسیون		تأییداعتبار	
	R^2	NS	R^2	NS
دبی روزانه	۰/۶۰	۰/۴۳	۰/۵۶	۰/۳۴
رسوب روزانه	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۳۲	۰/۲۷

بهینه‌سازی حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌ی قرسو

در این بخش بهینه‌سازی حوضچه‌های بازداشت حوضه‌ی قرسو به عنوان مطالعه موردی بررسی شد. همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌کنید پس از اجرای مدل، برنامه‌ی بهینه‌ساز اقدام به تخمین ارتفاع مناسب حوضچه‌های بازداشت خواهد کرد و با محاسبه‌ی حجم و سطح متناظر با آن اطلاعات مورد نیاز جهت تخمین رسوب خروجی توسط مدل SWAT در اختیار آن قرار خواهد گرفت. تعداد اجرای

شبیه‌ساز بستگی به کاربر داشته و با توجه به میزان برازش لازم برای توابع هدف جهت دست‌یابی به جواب‌های مناسب تعیین می‌شود.

شکل ۴- شکل ساختاری کاربرد مدل در حوضه‌ی قرسو

حل گام به گام مساله

۱- ابتدا مکان‌های بالقوه جهت احداث حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌ی قرسو تعیین شدند.

مکان‌های بالقوه جهت ساخت حوضچه‌های بازداشت محل‌هایی می‌باشند که به علت شرایط جغرافیایی و محلی، ساخت حوضچه‌های بازداشت در آن محل‌ها امکان پذیر است. محل احداث حوضچه‌ی بازداشت در یک زیر حوضه با مشخص نمودن میزان پوشش رواناب زیر حوضه توسط آن حوضچه‌ی مشخص، تعیین می‌گردد. این اطلاعات در گام نخست و زیر برنامه مخصوص حوضچه‌های بازداشت به شبیه‌ساز داده می‌شود. نقاط بالقوه‌ی ساخت حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌ی قرسو، در جدول ۳ و در هریک از زیر حوضه‌ها نمایش داده شده‌اند.

۲- برنامه‌ی بهینه‌ساز اقدام به تعیین ارتفاع حوضچه‌های بازداشت نموده و پس از تعیین عرض متناظر با این ارتفاع از جدول۴ حجم و سطح نرمال حوضچه‌ها را محاسبه می‌نماید (طول دو برابر عرض منظور شده است). پس از تعیین هزینه‌ی ساخت حوضچه‌های بازداشت به عنوان هدف اول، حجم و سطح نرمال آن‌ها در اختیار شبیه‌ساز قرار داده خواهد شد.

جدول ۴- ارتفاع و عرض متناظر با آن برای حوضچه‌ها

ارتفاع	عرض متناظر با آن
۰/۰	۰/۰
۱/۲	۷۰/۰
۱/۸	۸۰/۰
۲/۴	۹۰/۰
۳/۰	۱۰۰/۰

۳- مدل SWAT به عنوان برنامه‌ای شبیه‌ساز با استفاده از اطلاعات حجم و سطح حوضچه‌های بازداشت، میزان رسوب خروجی از حوضه را به عنوان هدف دوم محاسبه می‌کند؛ قابل ذکر است که دوره‌ی شبیه‌سازی ۵ ساله بوده و همچنین جهت کنترل بار رسوب تولیدی میانگین سالیانه در نظر گرفته شده است.

۴- اطلاعات تعیین کننده در مدل SWAT جهت شبیه‌سازی عبارتند از:

الف- درصد پوشش رواناب زیر حوضه یا مکان‌های بالقوه جهت ساخت حوضچه‌های بازداشت (تعیین شده از قبل توسط کاربر)

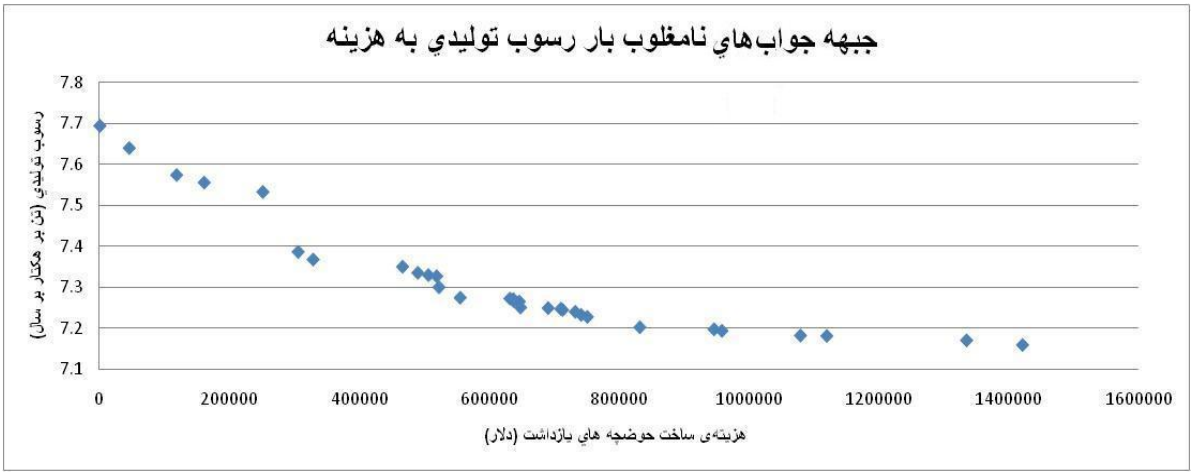
ب- حجم نرمال و سطح نرمال حوضچه‌های بازداشت (که با تعیین ارتفاع و پس از آن پیدا کردن حجم متناظر با این ارتفاع از جدول۴ و پس از محاسبه منحنی تراز-سطح و تراز- حجم به دست خواهد آمد).

ج- این اطلاعات به صورت pnd_pvol به عنوان حجم نرمال، pnd_psa به عنوان سطح نرمال و pnd_fr به عنوان درصد پوشش زیر حوضه در اختیار شبیه‌ساز قرار خواهند گرفت.

در شکل ۵ جبهه جواب نامغلوب را ملاحظه می‌کنید. جهت هرچه واضح‌تر نشان دادن مطلب، یکی از جواب‌های جبهه پرتو را به عنوان مثال و با جزییات در جدول ۵ و جدول ۶ نشان داده‌ایم. پارامترهای بهینه‌ساز کلونی مورچگان نیز برای دستیابی به جبهه پرتو کامل‌تر تنظیم شده‌اند که عبارتند از: α=۱، β=۰، KCC برای تابع هدف اول برابر ۱۰۰۰۰۰و برای تابع هدف دوم برابر ۰/۱ منظور شده است. در مقایسه با کارهای مشابه باید اشاره نمود که اکثر پژوهش‌های صورت گرفته، تاکنون در حوزه‌ی طراحی بهینه‌ی حوضچه‌های بازداشت مبتنی بر جانمایی حوضچه‌ها با یک اندازه‌ی مشخص و استاندارد بوده اند که از آن جمله عبارتند از Taheriyoun et al (2010)، و طراحی آن‌ها طوری که بتوان اندازه‌شان را بهینه نمود تا کنون صورت نگرفته است.

جدول ۳- نقاط بالقوه برای ساخت حوضچه‌های بازداشت: حوضه‌ی قرسو

شماره‌ی زیر حوضه‌های حوضه‌ی قرسو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
سطح پوشش	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۵



شکل ۵- جبهه جواب‌های نامغلوب

جدول ۵- یکی از جواب‌های انتخابی جبهه‌ی پرتو

میزان رسوب تولیدی (تن بر هکتار بر سال)	۷/۱۹۷۹۰۰ تن بر هکتار بر سال
هزینه (دلار)	۶۹۱۰۴۰/ ۵ دلار

جدول ۶- جزییات جواب انتخابی به عنوان مثال از جبهه‌ی پرتو: شیب کناره ۲ به ۱، شیب سد ۵ به ۱

شماره‌ی زیر حوضه- حوضه‌ی قرسو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷
سطح پوشش	۰/۴	۰/۲	۰/۱	۰/۴	۰/۳	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۱	۰/۳	۰/۲	۰/۱	۰/۵	۰/۲	۰/۵
ارتفاع حوضچه‌ها (متر)	۳/۰	۳/۰	۰/۰	۳/۰	۳/۰	۲/۴	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۲/۴	۱/۸	۰/۰	۲/۴	۰/۰	۲/۴	۱/۸	۲/۴
عرض حوضچه‌ها (متر)	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۰/۰	۱۰۰/۰	۱۰۰/۰	۹۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۹۰/۰	۸۰/۰	۰/۰	۹۰/۰	۰/۰	۹۰/۰	۸۰/۰	۹۰/۰
طول حوضچه‌ها (متر)	۲۰۰/۰	۲۰۰/۰	۱/۰	۲۰۰/۰	۲۰۰/۰	۱۸۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۸۰/۰	۱۶۰/۰	۰/۰	۱۸۰/۰	۰/۰	۱۸۰/۰	۱۶۰/۰	۱۸۰/۰

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

گسترش جوامع شهری در حوضه‌های آبریز و افزایش روزافزون حجم بار آلودگی تولیدی، از مهم‌ترین عوامل در کاهش کیفیت منابع آب می‌باشند. به منظور کاهش آلودگی‌ها و ارتقاع سطح کیفی آب، در نظر گرفتن مدیریت بار آلودگی غیر نقطه‌ای می‌تواند راه‌گشا باشد. یکی از کاراترین ابزارها در مدیریت بار آلودگی غیرنقطه‌ای، حوضچه-های بازداشت می‌باشند. در مدیریت بار آلودگی غیر نقطه‌ای نیز همانند اغلب برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، اهداف متفاوت و گاه متضادی مطرح می‌باشند. در مورد تحقیق شده نیز کاهش هرچه بیشتر هزینه مدیریت سیستم و کاهش هرچه افزون‌تر بار آلودگی ورودی به پیکره-ی آبی پایین‌دست می‌تواند به عنوان دو هدف متضاد مورد بررسی قرار گیرد. به این علت الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان چند هدفه جهت یافتن هزینه بهینه ساخت حوضچه‌های بازداشت در برابر حداقل نمودن بار رسوب تولیدی توسعه داده شده است. جهت شبیه‌سازی حوضه‌ی آبریز از مدل SWAT و برای کنترل بار رسوب تولیدی از حوضچه‌های بازداشت استفاده شده است. این مدل قادر خواهد بود تا جبهه پرتو حداقل هزینه به حداقل بار رسوب تولیدی را استخراج نماید. برای سنجش کارایی مدل آن‌را بر روی حوضه‌ی قرسو در ایران مورد مطالعه قرار داده‌ایم.

مدل شبیه‌سازی که مورد استفاده قرار گرفت، مدل SWAT است. این شبیه‌ساز توانایی پیش‌بینی رفتار حوضه‌ی آبریز را دارا می‌باشد. دو مدل بهینه‌ساز و شبیه‌ساز به گونه‌ای با یکدیگر تلفیق شده که پس از انتخاب سناریو توسط مدل بهینه‌ساز و اجرای مدل شبیه‌ساز اطلاعات کیفی رواناب خروجی به منظور محاسبه و برازش توابع هدف، بار دیگر در اختیار مدل بهینه‌ساز قرار می‌گیرند. شاخص کیفی که در این مدل برای ارزیابی کیفیت رواناب خروجی مورد مطالعه قرار گرفته است، رسوب خروجی میانگین سالانه می‌باشد.

استفاده از بهینه‌ساز کلونی مورچگان و شبیه‌ساز SWAT، بسته مناسبی را در اختیار محققین در مدل‌سازی حوضه‌های آبریز و کنترل بار آلودگی غیر نقطه‌ای قرار خواهد داد. مدل چند هدفه با توجه به فراهم نمودن جبهه پرتو می‌تواند مدیران امر را در اتخاذ تصمیم مناسب جهت کنترل بار رسوب تولیدی یاری نماید.

در ادامه نیز می‌توان از پیشنهادات زیر جهت مطالعات بیشتر بهره برد:

۱- در نظر گرفتن توسعه کاربری اراضی و تاثیر آن‌ها در نتایج بهینه‌سازی می‌تواند به کامل‌تر شدن تحقیق کمک نماید.

۲- در نظر گرفتن تغییرات آب و هوایی و مقایسه جواب‌های بهینه در این شرایط با شرایطی که این تغییرات اعمال نشده است می‌تواند به سنجش کارایی مدل در آینده در محل کمک نماید.

۳- زمان اجرای بالای مدل از جمله معایب آن است که به همین علت مدل طی یک دوره‌ی ۵ ساله اجرا شده است. شاید بتوان با تربیت یک شبکه عصبی برای شبیه‌سازی حوضه و استفاده از آن به جای شبیه‌ساز، سرعت انجام محاسبات را افزایش داد.

۴- استفاده از این مدل برای بهینه‌سازی کنترل سایر آلودگی‌ها همانند فسفر و مواد مغذی.

۵- سنجش کارایی مدل در کنترل سیلاب‌ها با حوضچه‌های بازداشت.

۶- استفاده از توابع احتمالاتی و یا اعمال آن‌ها در قیودات مساله می‌تواند در اعمال عدم قطعیت‌های موجود کمک کننده باشد.

منابع

1. Schueler, T.R., 1992. A Current Assessment of Urban Best Management Practices. Metropolitan Washington Council of Governments.
2. Maryland Department of the Environment, 1986. Feasibility and Design of Wet Ponds to Achieve Water Quality Control. Sediment and Storm Water Administration.
3. Tolson, B. A. and C. A. Shoemaker. 2004. "Watershed modeling of the Cannonsville basin using SWAT2000: Model development, calibration and validation for the prediction of flow, sediment and *phosphorus transport to the Cannonsville reservoir*". Technical Report, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.
4. Rostamian et al (2008). "Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran". Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques, 53(5) October 2008
5. Shepherd, B., D. Harper and A. Millington. 1999. "Modelling catchment-scale nutrient transport to watercourses in the U.K". Hydrobiologia 395/396: 227-237.
6. Abbaspour, K. C., Van Genuchten M. Th., Schulin R., and Schlappi E., 1997. "*A sequential uncertainty domain inverse procedure for estimating subsurface flow and transport parameters*". Water Resour. Res. 33(8): 1879-1892.
7. Karamouz; Taheriyoun; Baghvand; Tavakolifar and Emami, F., 2010. "Optimization of Watershed Control Strategies for Reservoir Eutrophication Management". Journal of Irrigation and Drainage Engineering, © ASCE, 136(12): 847–861.

۸. صادقی، «شناسایی و اولویت‌بندی مناطق مولد فرسایش در حوضه قره‌سو»، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، استاد راهنما دکتر بهرام ثقفیان، استاد مشاور دکتر بنفشه زهرایی ۱۳۸۹.

9. Simpson A.R., Maier H.R., Foong W.K., Phang K.Y., Seah H.Y. and Tan C.H. 2001. "Selection of Parameters for Ant Colony Optimization Applied to the Optimal Design Of Water Distribution System", Proc., Int. Congress on Modelling and Simulation, Canberra, Australia, 1931–1936.
10. Jalali, M. R., Afshar, A., Marino, M., Hon.M.ASCE. A., 2006. "Multi-reservoir Operation by Adaptive Pheromone Re-initiated Ant Colony Optimization Algorithme". ASCE (WRPM).
11. Jalali M.R. 2005. "Optimal design and operation of hydro systems by ant colony algorithms: new heuristic Approach", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology
12. Jalali M.R., Afshar A. and Marino M.A. 2006. "Improved ant colony optimization algorithm for reservoir operation " , Scientica Iranica, Vol:13(3), PP:295-302
13. Jalali M. R., Afshar A. and Marino M.A.2006. "Reservoir Operation by Ant Colony Optimization Algorithms", Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering, Vol:30, No:B1,PP:107-117
14. Jalali M.R., Afshar A. and Marino M.A.2007. "Multi-colony ant algorithm for continuous multi-reservoir operation optimization problems", Water Resource Management, Vol: 21, PP: 1429–1447

15. Madadgar S. and A. Afshar 2009. "An Improved Continuous Ant Algorithm for Optimization of Water Resources Problems", Water Resource Management, Vol: 23, PP: 2119–2139.
16. Afshar M.H. and Marino M.A. 2006. "*Application of an ant algorithm for layout optimization of tree networks*", Engineering Optimization, Vol: 38(3), PP:353–369
17. Afshar, M. H. 2008. "*Layout and size optimization of tree-like pipe networks by incremental solution building ants* ", Source: Canadian Journal of Civil Engineering, VOL: 35(2), PP: 129-139
18. Dorigo, M., 1992. "Optimization, learning and natural algorithms." Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.
۱۹. جلالی، محمد رضا، «طراحی و بهره برداری بهینه هیدروسیستم ها با الگوریتم جامعه مورچه ها، یک رهیافت فراکاوشی جدید»، دانشگاه علم و صنعت ایران، به راهنمایی دکتر عباس افشار، ۱۳۸۴.
20. Mariano, C. E., Morales E., 1999. "A Multiple Objective Ant-Q Algorithm for the Design of Water Distribution Irrigation Networks". Technical Report HC-9904, Instituto Mexicano de Tecnologia Del Agua.
21. Iredi S., D., Middendrof M. (2001), "Bi-Criterion Optimization with multi colony ant algorithms", in: Proceeding of the First international Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization. " Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin
22. Baran, B., Schaerer M., 2003. "A Multi-objective Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows". Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics, Insbruck, Austria, February 10-13, pp. 97-102.
23. Doerner, K., Gutjahr W.J., Hartl R.F., Strauss C., Stummer C., 2004. "Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection". Annals of Operations Research, to appear.
24. Dorigo, M., Stutzle, T., 2004. "Ant Colony Optimization. Cambridge." MA: MIT Press.
25. Afshar, A., Sharifi, F., Jalali, M. R., 2008. "*Non-dominated ARCHRIVING Multi-coloni and Ant Algorithm for Multi Objective Optimization; Application to Multi propose Reservoir Operation*", journal of Engineering Optimization, (under publication).
26. Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., and Sammons N.B., 1990. "*SWRRB, a basin scale simulation model for soil and water resources management*". Texas A&M University Press, College Station, TX.
27. Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R., and Allen, P. M., 2000. "*Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the upper Mississippi River basin*". J. Hydrol, 227(1): 21–40.
28. Center for Watershed Protection, 1998. Cost and Benefits of Storm Water BMPs.
29. Northern Virginia Planning District Commission, Engineers and Surveyors Institute, 1992. Northern Virginia BMP Handbook.
۳۰. عباس افشار و محمد جواد امامی اسکاررردی، «طراحی بهینه حوضچه‌های بازداشت در حوضه‌های آبریز با استفاده از شبیه‌ساز سوات و الگوریتم بهینه‌ساز جامعه مورچگان: رویکرد تئوری بازی‌های همکارانه»، اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، گروه مهندسی آب. ۱۳۸۹.
۳۱. مصطفوی، سید اصغر، «تخصیص بار چند آلاینده در سیستم های رودخانه ای با رویکرد چند هدفه»، دانشگاه علم و صنعت ایران، به راهنمایی دکتر عباس افشار، ۱۳۸۹.