



Multiobjective Waste Load Allocation Using Multicolony Ant Algorithm

H. Hosseinzadeh^{1*}, A. Afshar² and F. Sharifi³

Abstract

In this research, the capability of a multicolony Ant Colony Optimization algorithm is applied to multiobjective waste load allocation problem. In order to derive nondominated solutions, three different models are used. Two of them are biobjective and the remaining one is a three-objective model. In the first model, minimization of cost and DO violation along the stream flow is considered as multi objective optimization problem, while for the second case, minimization of the cost and equity is investigated. For the third optimization problem, minimization of cost along with equity and DO violation are considered. For the all case studies, the Pareto front is derived which enhances the decision maker to choose one which more suitable for him/her according to the priorities. The case study is the Wilmate river in Oregon State of US. The following research shows the capability of NA-ACO in multiobjective optimization of waste load allocation problem. According to the discrete pattern of decision variables in the ACO algorithm, it can be easily map to practical waste load allocation problems.

Keywords: Multicolony Ant, Trade off Curve, Multiobjective Optimization, Waste Load Allocation.

تخصیص بهینه بار آلودگی چند هدفه با استفاده از الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها

حجت حسین‌زاده^{۱*}، عباس افشار^۲ و فرید شریفی^۳

چکیده

این مقاله قابلیت الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها را در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه تخصیص بار آلودگی مورد بررسی قرار داده است. در این تحقیق از سه مدل مختلف برای به دست آوردن جواب‌های غالب^۱ استفاده شده است. دو مدل به صورت دو هدفه بوده و مدل سوم بصورت سه هدفه تعریف شده است. در مدل اول حداقل‌سازی هزینه و مقدار تخطی از میزان اکسیژن محلول مجاز در طول مسیر رودخانه و در مدل دوم حداقل‌سازی هزینه و مقدار شاخص بی‌عدالتی^۲ به عنوان اهداف طرح تعریف شده‌اند. در مدل سوم در قالب حداقل‌سازی هزینه، شاخص بی‌عدالتی و تخطی از میزان اکسیژن محلول مجاز به عنوان اهداف مربوطه بررسی شده‌است. خروجی تمامی مدل‌ها منجر به ایجاد منحنی مصالحه شده است، که بر اساس آنها تصمیم‌گیرنده قابلیت انتخاب جواب‌های بهینه مختلف را خواهد داشت. مدل‌های تعریف شده بر روی رودخانه ویلمیت^۳ در ایالات متحده پیاده شده‌اند. نتایج بدست آمده در قالب منحنی‌های مصالحه مورد بحث قرار گرفته است. تحقیق حاضر توانایی الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها را در مسائل تخصیص بار آلودگی نشان می‌دهد. با توجه به دلخواه بودن مقادیر گسسته‌سازی^۴ در ابتدای طرح، می‌توان مقادیری از تصفیه را که عملی بوده و قابلیت اجرایی دارند، در نظر گرفت. این خاصیت الگوریتم کلونی مورچه‌ها باعث شده است که خروجی مدل‌ها در راستای فضای اجرایی تحت کنترل باشد.

کلمات کلیدی: کلونی چند جامعه‌ای مورچه‌ها، منحنی مصالحه، بهینه‌سازی چند هدفه، تخصیص بار آلودگی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۵ مهر ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ خرداد ۱۳۸۹

1- PhD student, Civil and Environmental Dep., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, Email: hosseinzadeh@iust.ac.ir

2- Professor, Civil and Environmental Dep., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

3- PhD student, Civil and Environmental Dep., Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری عمران آب، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکتری عمران آب، دانشگاه علم و صنعت ایران

*- نویسنده مسئول

حداکثرسازی راندمان اقتصادی و حداکثرسازی کیفیت آب می‌تواند نام برد. تعدادی از کارهای قبلی که در این زمینه انجام گرفته، تحت تأثیر طبیعت احتمالاتی فرآیند انتقال آلاینده بررسی شده‌اند (Burn and McBean, 1985; Ellis, 1987; Fujiwara et al., 1986). (Cardwell and Ellis (1993) از یک تقریب رگرسیونی برای مدیریت کیفیت آب استفاده کردند که ضرایب تأثیر هر کدام از منابع آلاینده بصورت غیر قطعی بوده است. در کارهای اخیر (Sasikumar and Mujumdar (1998) از فرمول‌سازی بهینه‌یابی فازی استفاده کردند. (Chen and Chang (1998) با ترکیب بهینه‌یابی فازی در ترکیب با الگوریتم ژنتیک، مسئله تخصیص بار آلودگی در رودخانه را حل کردند. (Takyi and Lence (1998) از مدل تفهیم چندگانه برای هر منحنی مصالحه بین هزینه و قابلیت اطمینان واکنش کیفی آب برای یک حد استاندارد، استفاده کردند. (Burn and Yulianti (2001) در قالب سه مدل دو هدفه اقدام به مدل‌سازی مسئله تخصیص بار آلودگی با استفاده از الگوریتم ژنتیک کردند. دو مدل مربوط به فاز طراحی و یک مدل مربوط به فاز عملیاتی مسئله می‌شد. (Yandamuri et al. (2006) در قالب سه مدل مسئله تخصیص بار آلودگی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل کردند. آنها برای انجام تحقیق از مدل شبیه ساز پیشنهادی که بر اساس حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی بود توسط روش تفاضلات محدود مدلی شبیه ساز را ارائه دادند. در این بین از معیار کارایی که متشکل از قابلیت اطمینان، آسیب پذیری و تعداد شکست‌ها بوده استفاده کردند.

تحقیق حاضر بر روی کاربرد الگوریتم چند جامعه مورچه‌ها برای حل مسئله تخصیص بار آلودگی انجام شده است. این مدل بهینه‌یابی ابتدا توسط مسئله بهینه‌یابی تحلیلی مورد صحت سنجی قرار گرفته و مقایسه‌ای بین نتایج این الگوریتم و سایر الگوریتم‌های بهینه‌یاب صورت گرفته است. هدف در این روش مشاهده کارایی روش بهینه‌یابی چند جامعه‌ای مورچه‌ها با سایر الگوریتم‌ها و همچنین ارائه مدل سه هدفه هزینه-شاخص عدالت و تخطی از مقدار اکسیژن محلول مجاز است. مدل شبیه ساز استفاده شده در این تحقیق معادله استریتر-فلس^۶ است و شاخص تعیین سطح کیفیت آب رودخانه، اکسیژن محلول موجود در آب در نقاط کنترلی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بهینه‌سازی مسائل چندهدفه

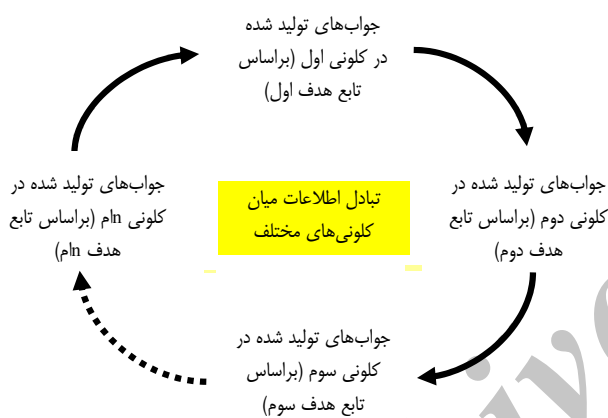
هدف از حل یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه، به دست آوردن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو (جواب‌های نامغلوب) است. به دست

رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین و انتقال آب مصرفی بخش‌های صنعت، کشاورزی و مصارف شهری از اهمیت خاصی برخوردارند. توسعه روزافزون فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و افزایش قابل توجه حجم فاضلاب‌های شهری موجب آلودگی منابع آب، خصوصاً رودخانه‌ها گشته به نحوی که کیفیت آب در بسیاری از نقاط را با خطر جدی مواجه ساخته و حتی در برخی نقاط به مرگ بیولوژیکی رودخانه‌ها منجر گردیده است. به طور کلی مشکل کیفی آب در رودخانه‌ها مربوط به طرح‌های توسعه در حوضه آبریز است، بطوریکه واحدهای مصرف کننده، آب خروجی را یا بدون تصفیه و یا با درصد تصفیه پایین وارد رودخانه می‌کنند. برای مدیریت هرچه بهتر کیفیت آب با توجه به روند توسعه واحدهای موجود در حوضه آبریز، تعیین سطح تصفیه هر کدام از واحدهای آلوده کننده برای رسیدن به سطح کیفی استاندارد آب^۵، ضروری است. یکی از دلایل افت کیفیت آب به تغییرات اقلیمی مربوط می‌شود که باعث کاهش حجم آب رودخانه می‌شود. با توجه به پویا بودن شرایط دبی رودخانه و سایر عوامل مؤثر، سیاست کاری با توجه به شرایط مختلفی سنجیده می‌شود تا در هر دوره زمانی بتوان سطح تصفیه هر کدام از واحدهای آلوده کننده را مشخص کرد (Burn and McBean, 1985). از طرفی دیگر سطح کیفیت آب مورد نیاز با توجه به تغییر کاربری آب در منطقه می‌تواند دچار تغییر شود. مسئله تخصیص بار آلودگی می‌تواند برای مشخص کردن مقدار بهینه تصفیه برای مجموعه‌ای از واحدهای آلاینده در یک بازه زمانی از سال و یا در بحرانی‌ترین شرایط، بسته به نظر تصمیم گیرندگان، تعریف شود.

مدیریت کیفی رودخانه‌ها به علت آلودگی شدید، افزایش آلاینده‌های ورودی، عدم وجود ضمانت اجرایی در قوانین زیست محیطی و هزینه زیاد تصفیه آلاینده‌ها در دهه‌های گذشته مورد توجه محققان بوده است. در این خصوص مسئله تخصیص بار آلودگی در قالب برخی از مدل‌های بهینه‌یابی مورد بررسی قرار گرفته است (Dorfman et al., 1972; Lukas et al., 1967). متغیرهای تصمیم در این مدل‌ها میزان تصفیه در هر کدام از بارهای نقطه‌ای بوده‌اند. توابع هدف به صورت حداکثرسازی بازده اقتصادی در نظر گرفته شده بود. بطور کلی کیفیت آب به مقدار بار تخلیه شده در رودخانه، دبی جریان رودخانه، دما، ضرایب واکنشی و ضریب رسوب بستگی دارد. پاسخ سیستم کیفیت آب به ترکیبات بار آلاینده در واحدهای تولیدی و شرایط محیطی توسط یک مدل شبیه‌ساز مناسب، کمیته‌سازی می‌شود. در سال‌های اخیر مدل تخصیص بار آلاینده عموماً بصورت چند هدفه مطرح بوده است. به عنوان مثال از

۲-۱-۲- ساختار الگوریتم چند هدفه

با در نظر گرفتن ساختار اصلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی جامعه مورچه‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه حاضر بر اساس رهیافت آرشيو کردن جواب‌های غالب توسعه یافته است. راهکار اصلی در این الگوریتم، اختصاص دادن یک جامعه از مورچه‌ها به هر کدام از اهداف یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشد. آنچه که در این میان اهمیت بسیار دارد، نحوه ارتباط جوامع اختصاص داده شده به هر کدام از اهداف یاد شده است. در الگوریتم حاضر، 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.



شکل ۱- نمایش نحوه تبادل اطلاعات بین جوامع مورچه‌ها و اهداف نظیر آنها

در الگوریتم حاضر، به هر کدام از اهداف در یک مسأله بهینه‌سازی چند هدفه، یک جامعه مورچه تعلق می‌گیرد که عهده دار فرایند جستجو با توجه به هدف مختص به خود می‌باشد. بعد از ورود به فرایند بهینه‌سازی در تکرار اول، جواب‌های تولید شده در اولین جامعه مورچه که بر اساس هدف اول توسعه یافته‌اند، در اختیار جامعه دوم قرار می‌گیرند تا آنها هم به نوبه خود جواب‌هایی را بر اساس هدف خود تولید نمایند. به همین ترتیب این جواب‌ها در اختیار جوامع بعدی قرار می‌گیرد. در انتهای این چرخه، مجدداً جامعه اول فرصت می‌یابد تا با دریافت جواب‌های تولید شده در کلونی ما قبل آخر، به تولید جواب‌هایی بر اساس معیارهای خود پردازد. این فرایند تبادل راه‌حل‌ها مابین جوامع مختلف، تا یک تکرار از پیش مشخص، ادامه می‌یابد. پس از رسیدن به یک تکرار از پیش تعیین شده مقادیر توابع هدف برای هر کدام از مورچه‌ها محاسبه می‌گردد. با مقایسه این جواب‌ها

آوردن این مجموعه با استفاده از روش‌های موجود (نظیر وزن‌دهی و...) عموماً هزینه‌بر، مشکل و در بسیاری از موارد به علت برخی پیچیدگی‌های مسائل تحت بررسی، عملاً غیر ممکن می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به گزارش‌های موفقیت آمیز متعدد از کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاشی در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی در سال‌های اخیر و قابلیت‌های فراوان این الگوریتم‌ها در تقریب مؤثر جواب، بسیاری از محققین ترغیب به استفاده از این الگوریتم‌ها در مسائل بهینه‌سازی چند هدفه شده‌اند. کاملاً روشن است که الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاشی قادر به یافتن یک مجموعه جواب که بهینه‌ترین مصالحه ممکن بین اهداف مختلف باشد، نیستند، ولی می‌توان امیدوار بود که مجموعه جواب ارائه شده فاصله زیادی با بردارهای هدف بهینه نداشته باشد.

۲-۱-۱- الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه مورچه‌ها

در چند سال اخیر روش‌های مختلفی برای کاربرد الگوریتم جامعه مورچه‌ها در بهینه‌سازی توابع چندهدفه پیشنهاد شده‌اند. اولین الگوریتم توسط Mariano and Morales (1999) و برای حل مسأله طراحی شبکه توزیع آب به کار گرفته شد. در این الگوریتم که بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی Ant-Q بنا نهاده شده، به تعداد هر کدام از اهداف، یک جامعه مورچه در نظر گرفته شده است. ارتباط این جوامع از طریق راه‌حل‌های تولید شده توسط هریک از آنها می‌باشد. Iredi and Middendorf (2001) الگوریتم بهینه‌سازی مورچه‌ها را برای حل مسأله دو معیاره روندیابی وسایل نقلیه مورد استفاده قرار دارند. در این الگوریتم از یک جامعه مورچه و دو تابع بهنگام سازی فرامان جداگانه و نیز رابطه‌ای برای ترکیب دو تابع و یافتن یک مقدار واحد جهت گزینش مسیر استفاده می‌شود. الگوریتم P-ACO توسط Doerner et al. (2004) ارائه گردید. در این الگوریتم نیز از k تابع مختلف بهنگام سازی فرامان به تعداد k تابع هدف استفاده شده است و همچنین رابطه‌ای از پیش تعیین شده مشخص کننده مقدار فرامان شرکت کننده در فرایند گزینش مسیر می‌باشد. در این الگوریتم، مجموعه جواب‌های پارتو در هر مرحله محاسبه شده و در مجموعه آرشيو ذخیره می‌گردند. الگوریتم MACS توسط Baran and Schaerer (2003) پیشنهاد شد. در این الگوریتم از یک ماتریس فرامان و چند تابع حاوی اطلاعات فراکاشی به تعداد اهداف استفاده شده است. در هر مرحله از فرایند بهینه‌سازی راه‌حل‌های پارتو محاسبه شده و مقدار فرامان به مقدار اولیه می‌رسد.

۲-۱- مدل‌سازی بهینه‌یابی چند هدفه

اولین مدل در نظر گرفته شده حداقل هزینه به ازای تصفیه در هر واحد تولید آلاینده در ازای حداقل تخطی از مقدار استاندارد تعیین شده است. این مدل، مقادیر مختلف هزینه بهینه در مقابل مقادیر تخطی از مقدار استاندارد را نشان می‌دهد. براساس جواب‌های بهینه بدست آمده تصمیم‌گیرنده می‌تواند با توجه به سیاست‌های خود از بین جواب‌های بدست آمده، یکی را انتخاب کند. قیدهای مسئله در این حالت مقادیر محاسبه شده تخطی توسط معادله استریتز-فلیس می‌باشد. روابط مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Minimize} \sum_{i=1}^{NS} c_i(x_i) \quad (1)$$

$$\text{Minimize} \sum_{j=1}^{NR} v_j^+ \quad (2)$$

قیدهای مسئله بصورت زیر خواهد بود:

$$x_i = xs_i \quad \forall i \quad (3)$$

$$v_j = f(x, W, Q, K, WQ_{std}) \quad \forall j \quad (4)$$

$$v_j^+ = \begin{cases} v_j & \text{if } v_j \geq 0 \\ 0 & \text{if } v_j < 0 \end{cases} \quad (5)$$

به طوریکه $c_i(x_i)$ مقدار هزینه تصفیه در منبع i ، x_i مقدار تصفیه در منبع i ، NS تعداد منابع آلاینده، مقدار تخطی از استاندارد در نقطه کنترلی j ، NR تعداد نقاط تحت کنترل در رودخانه، xs_i مجموعه حالت‌های ممکن تصفیه در منبع i ، v_j اختلاف بین مقدار اکسیژن محلول و مقدار استاندارد در نقطه کنترلی j ، $f()$ نشان دهنده کیفیت آب به عنوان تابعی از شرایط جریان و پارامترهای ورودی، W مقادیر بارهای آلاینده در هر منبع، Q مقادیر دبی جریان در هر مقطع از رودخانه، K بردار ضرایب واکنشی آلاینده در آب، WQ_{std} مقدار استاندارد آب برای رودخانه را نشان می‌دهد. معادلات (۱) و (۲) دو تابع هدف مسئله بهینه‌سازی چند هدفه هستند. معادله (۱) هزینه تصفیه و معادله (۲) مجموع تخطی اکسیژن محلول از مقدار استاندارد را نشان می‌دهند. با استفاده از رابطه (۳) از بین حالت‌های مختلف تصفیه برای منبع مناظر مقدار تصفیه از مقادیر مشخص شده انتخاب می‌شود. رابطه (۴) در واقع نشان دهنده مدل شبیه‌سازی است که برای محاسبه مقدار کیفیت آب در هر یک از نقاط کنترلی استفاده می‌شود. شرایط جریان نیز به عنوان ورودی به مدل کیفی شبیه‌ساز وارد می‌شوند.

مدل فوق‌وارد الگوریتم بهینه‌ساز چند جامعه‌ای مورچه‌ها شده و از بین حالت‌های ممکن تصفیه در هر منبع، جواب‌های غالب انتخاب

جواب‌های بهینه پارتو یا مجموعه جواب‌های غالب از میان آنها انتخاب می‌شود و در یک مجموعه آرشیو فرضی قرار می‌گیرند و این بار فرمان‌های مسیره‌های هر دو جامعه، بر اساس جواب‌های بهینه پارتوی موجود در مجموعه آرشیو بهنگام می‌گردند. بعد از این گام، به مورچه‌ها در هر دو جامعه این اجازه داده می‌شود تا بر اساس استراتژی ذکر شده، به فرایند کاوشی خود جهت یافتن مسیر بهینه تا رسیدن به تکرار از پیش تعیین شده بعدی ادامه دهند. در انتهای اجرای این الگوریتم، جواب‌های پارتوی موجود در مجموعه آرشیو به عنوان مقادیر نهایی توابع هدف و مسیره‌های متناظر با آن، به عنوان راه‌حل‌های مسأله گزارش می‌شوند.

صحت سنجی کارایی الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها در تحقیق (Afshar et al. 2008) انجام شده است. در تحقیق مربوطه، مدل‌های دو هدفه تحلیلی ZDT1 و ZDT2 مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاکی از کارایی این الگوریتم در حل مسائل چند هدفه دارد. برای حل مسائل مذکور از دو جامعه مورچه‌ها استفاده کردند. نتایج بدست آمده عملکرد خوبی را در مقایسه با الگوریتم‌های NSGA-II و ACSAMO در پی داشته‌اند. صحت سنجی کارایی الگوریتم چند جامعه‌ای مورچه‌ها در حالت سه هدفه (Afshar et al. 2007) بر روی مسئله زمان-هزینه-کیفیت در مدیریت ساخت استفاده کردند و نتایج رضایت بخشی را در مقایسه با کارهای قبلی که با الگوریتم‌های مختلفی انجام شده بود، به دست آوردند.

۲-۲- کاربرد الگوریتم توسعه‌یافته در تخصیص بهینه بار آلودگی

برای حل مسئله تخصیص بار آلاینده از معیارهای قطعی مختلفی استفاده می‌شود. انتخاب بین این معیارها بستگی به اهمیت آنها از دیدگاه مرجع تصمیم‌گیرنده دارد. از جمله این معیارها می‌توان به حداقل هزینه یا بیشینه کردن بازده اقتصادی، حداقل تخطی از مقدار استاندارد، شاخص عدالت یا تصفیه یکنواخت، حداقل‌سازی حداکثر تخطی، حداقل‌سازی حداکثر حسرت، حداکثر ظرفیت مازاد کیفی نام برد. در این تحقیق از معیار (۱) حداقل هزینه، (۲) حداقل تخطی اکسیژن محلول از استاندارد و (۳) شاخص عدالت استفاده شده است. در بخش اول معیارهای هزینه-تخطی و هزینه-عدالت به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند و جواب‌های بهینه برای این مسئله دو هدفه بدست آمده است. در بخش دوم، مسئله به صورت توابع هدف هزینه-عدالت-تخطی به صورت سه هدفه مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل سومی که در این تحقیق بکار رفته تبدیل مسئله از دو هدف به مسئله بهینه‌سازی سه هدفه است. در این مدل‌سازی از سه تابع کمینه کردن هزینه، مقدار حداقل‌سازی شاخص عدالت و مقدار حداقل‌سازی تخطی از استاندارد در نظر گرفته شده است. در این مدل تصمیم‌گیرنده می‌تواند به صورت همزمان هزینه، تخطی و عدالت را در نظر گرفته و به انتخاب سیاست کاری از بین جواب‌های مسئله اقدام کند. معادلات مدل بصورت زیر خواهد بود:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{NS} c_i(x_i) \quad (12)$$

$$\text{Minimize } EQ \quad (13)$$

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^{NR} v_j^+ \quad (14)$$

قیدهای مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$x_i = xs_i \quad \forall i \quad (15)$$

$$EQ = \sum_{i=1}^{NS} \left| \frac{x_i}{\bar{x}} - \frac{W_i}{\bar{W}} \right| \quad (16)$$

$$v_j = f(x, W, Q, K, WQ_{std}) \quad \forall j \quad (17)$$

$$v_j^+ = \begin{cases} v_j & \text{if } v_j \geq 0 \\ 0 & \text{if } v_j < 0 \end{cases} \quad (18)$$

تمامی علام در روابط فوق قبلاً تعریف شده‌اند. نکته‌ای باید به آن توجه شود عدم وجود قید معادله (۱۱) در این مسئله است که شاخص عدالت را در این مدل با مدل قبلی متفاوت ساخته است. به بیانی دیگر معادله (۱۱) از حالت قید خارج شده و به صورت تابع هدف استفاده می‌شود. آنچه مشخص است با افزایش هزینه‌ها روند کاهشی در مقادیر تخطی و شاخص عدالت مشاهده خواهد شد.

۲-۲-۲- کاربرد الگوریتم در مدل‌سازی‌ها

مراحل اجرای الگوریتم چند جامعه مورچه‌ها در مدل‌های بهینه‌سازی به ترتیب گام‌های زیر است.

- ۱- مجموعه‌های جواب اولیه بصورت تصادفی انتخاب می‌شوند و سپس برنامه وارد یک حلقه تکرار می‌شود.
- ۲- بر اساس تابع هدف اول بهترین سناریو انتخاب می‌شود و براساس آن، مسیر مربوطه فرومان گذاری شده و یک انتخاب ماتریس جواب صورت می‌گیرد.
- ۳- ماتریس خروجی از کلونی اول به عنوان ورودی به کلونی دوم وارد شده و بر اساس تابع هدف دوم بهترین سناریو انتخاب می‌شود. بعد از فرومان گذاری در کلونی دوم، ماتریس جواب جدید تولید می‌شود.

می‌شوند. این جواب‌ها بصورت هزینه تصفیه تخصیص داده شده برای هر منبع، در مقابل پاسخ کیفی رودخانه در هر نقطه کنترلی با استفاده از مدل شبیه‌ساز معادلات استریتر- فلیس بدست می‌آید. اعتبار هر کدام از جواب‌ها در مرحله زیر الگوریتم پارتو (غالب) مشخص می‌شود.

دومین مدل انتخاب شده نیز دارای تابع هدف حداقل هزینه و از طرفی دیگر مقدار شاخص عدالت در توزیع یکنواخت تصفیه است. در واقع این مدل مقدار هزینه را در مقابل شاخص عدالت ارائه می‌دهد و تصمیم‌گیرنده با استفاده از مقادیر عدالت به ازای هزینه‌های متناظر می‌تواند به سیاست‌های مختلفی فکر کند. این مدل از طرفی دیگر نیازمند عدم تخطی از مقدار استاندارد کیفی تعیین شده در هر نقطه کنترلی است. بنابراین این مدل، استاندارد کیفی آب را تأمین کرده و در عین حال شاخص عدالت را بین مقادیر برقرار می‌کند. فرمول‌سازی مدل به صورت زیر است:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^{NS} c_i(x_i) \quad (6)$$

$$\text{Minimize } EQ \quad (7)$$

قیدهای مسئله به صورت زیر خواهد بود:

$$x_i = xs_i \quad \forall i \quad (8)$$

$$EQ = \sum_{i=1}^{NS} \left| \frac{x_i}{\bar{x}} - \frac{W_i}{\bar{W}} \right| \quad (9)$$

$$v_j = f(x, W, Q, K, WQ_{std}) \quad \forall j \quad (10)$$

$$v_j \leq 0 \quad \forall j \quad (11)$$

به طوریکه EQ شاخص عدالت، \bar{x} مقدار میانگین تصفیه در تمامی منابع آلاینده NS، \bar{W} میانگین آلاینده‌های ورودی، W_i مقدار آلاینده تخلیه شده توسط منبع i و بقیه علام مشابه روابط قبلی هستند. در رابطه (۴) در صورتی که مقدار تصفیه در یک منبع به تصفیه میانگین نزدیک‌تر باشد، و همچنین مقدار آلاینده تخلیه شده توسط یک منبع به مقدار میانگین نزدیک‌تر باشد، باعث کاهش در مقدار شاخص عدالت می‌شود. این نوع شاخص عدالت با جزئیات بیشتر در (Marsh and Schilling (1994) توضیح داده شده است. معادله (۱۱) اطمینان می‌دهد که هیچ گونه تخطی از مقدار استاندارد صورت نمی‌گیرد. این خاصیت در الگوریتم چند جامعه مورچه‌ها در صورت تخطی با جریمه سنگین اعمال می‌شود. این جریمه تابعی از تعداد و مقدار تجمعی تخطی‌ها است. بر این اساس الگوریتم مورچه‌ها بر جواب‌ها را بر اساس حداقل‌سازی هزینه با ارضای شرط عدم تخطی از استاندارد کیفی مشخص می‌کند.

در روابط فوق $BOD(x)$ مقدار آلاینده در فاصله x از محل تخلیه، BOD_0 مقدار اولیه آلاینده در ابتدای شاخه، U مقدار سرعت در بازه مربوطه، k_r مقدار کل ضریب کاهش اکسیژن، O_s اکسیژن اشباع، $O(x)$ مقدار اکسیژن محلول در فاصله x از محل تخلیه، O_0 مقدار اکسیژن محلول در ابتدای شاخه، k_a ضریب هوادهی و k_d مقدار ضریب کاهش اکسیژن است. برای بدست آوردن مقدار ضریب هوادهی از رابطه اوکانر-داینز استفاده شده است که مطابق رابطه (۲۱) است. با توجه به دامنه سرعت رودخانه و عمق آب، این رابطه انتخاب شده است.

$$k_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}} \quad (21)$$

H مقدار عمق آب در هر قسمت از رودخانه است.

ضریب k_r نیز بصورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$k_r = k_d + k_s \quad (22)$$

k_s مقدار ضریب کاهش اکسیژن در اثر فرآیند رسوب است. مقدار این ضریب در تحقیق حاضر ۰/۳ فرض شده است. در این تحقیق مقدار اکسیژن محلول استاندارد برابر ۷ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است.

۴- منطقه مورد مطالعه

به علت وجود داده‌های مناسب و کافی، عملکرد مدل‌های پیشنهادی بر روی رودخانه ویلمت در ایالت اورگان واقع در کشور آمریکا آزموده شده است. در مسئله تعداد ۱۷ بار نقطه‌ای که آلاینده را در این رودخانه تخلیه می‌کنند وجود دارد که سه مورد از آنها به علت نزدیکی محل تخلیه بصورت یک بار واحد در نظر گرفته شده‌اند. تخلیه‌کننده‌های مربوطه در بازه ۳۰۰ کیلومتری از رودخانه واقع شده‌اند. سه شهر از بزرگترین شهرهای ایالتی در این حوضه آبریز قرار دارند و سه شاخه جانبی به این رودخانه متصل هستند. مشخصات هیدرولیکی و هندسی رودخانه و منابع آلاینده از کار یانداموری و همکاران گرفته شده است که در جدول ۱ آمده است. مقطع عرضی رودخانه مستطیلی و عریض فرض شده است. مقدار غلظت اولیه جریان رودخانه و انشعابات ۱/۵ و ۹/۱ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است. داده‌های مربوط به غلظت تخلیه آلاینده‌ها و دبی هر کدام از واحدها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. برای بارهای نقطه‌ای مقدار اکسیژن محلول ۲ میلی گرم بر لیتر فرض شده است. مقدار ضریب کاهش اکسیژن ۰/۳ بر روز در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب هوادهی براساس رابطه (1958) O'Connor-Dobbins محاسبه شده است. مرجع تمامی

۴- ماتریس جواب تولیدی در مرحله قبل ورودی کلونی سوم خواهد بود. بهترین جواب بر اساس تابع هدف سوم انتخاب می‌شود. بعد از به روز کردن فرومان در کلونی سوم، ماتریس جواب تولید شده و بر اساس آن مقدار هر کدام از توابع هدف محاسبه می‌شود.

۵- مقادیر توابع هدف به صورت مجموعه جواب واحد در آمده و از بین آنها جواب‌های پارتو محاسبه می‌شود. برنامه دوباره به مرحله دوم باز می‌گردد. این مسیر برای تعداد مشخصی از تکرار (تکرار بین کلونی‌ها) ادامه می‌یابد.

۶- فرومان‌ها به مقدار اولیه τ_0 بازگشته و بر اساس جواب‌های موجود در آرشیو پارتو به روز می‌شوند. برنامه به شماره ۲ باز می‌گردد. این تکرار کلی برنامه است و تا تعداد دلخواه می‌تواند ادامه یابد.

در نهایت مجموعه جواب‌هایی که در آرشیو پارتو باقی مانده‌اند، جواب‌های بهینه مسئله هستند.

تعداد مورچه‌های بکار رفته در هر کلونی، تعداد چرخه‌های بین کلونی‌ها و تعداد تکرار کلی الگوریتم به ترتیب برابر ۴۰۰، ۱۰ و ۲۰ بوده است. سایر پارامترهای الگوریتم مورچه‌ها، $\alpha = 1$ ، $\rho = 0.1$ ، $\beta = 0$ و $\tau_0 = 1$ بوده است. لازم به ذکر است که مقادیر گسسته‌سازی برای درصد تصفیه در هر یک از واحدهای تخلیه کننده آلاینده به صورت [۰/۹۸، ۰/۹۰، ۰/۶۷، ۰/۳۵] در نظر گرفته شده است.

۳- مدل شبیه ساز کیفی آب

برای شبیه سازی مدل کیفی از معادلات استریتر-فلپس استفاده شده است. مدل شبیه‌ساز کیفی بکار رفته، واکنش‌های بیوشیمیایی و نحوه انتقال BOD و DO در طول رودخانه را مدل می‌کند. معادلات استریتر فلپس برای بار نقطه‌ای در این تحقیق بکار رفته است. بر اساس معادلات فوق روند تغییرات BOD و DO در یک بازه به طول x (که در ابتدای آن بار نقطه‌ای وارد شده است و مقدار BOD اولیه و DO یا O اکسیژن محلول اولیه آن مشخص باشد) بصورت روابط (۱۹) و (۲۰) خواهد بود.

$$BOD(x) = BOD_0 \times e^{-\frac{k_r x}{U}} \quad (19)$$

$$(20)$$

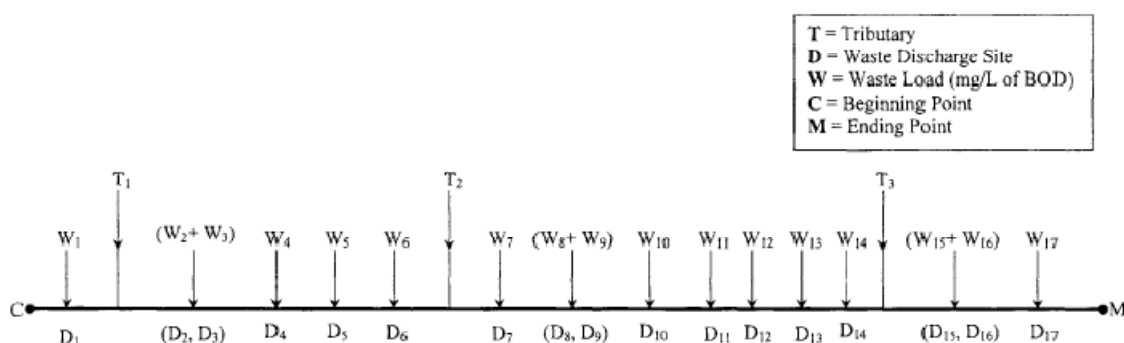
$$O_s - O(x) = (O_s - O_0) e^{-\frac{k_a x}{U}} + \frac{k_d BOD_0}{k_a - k_r} \left(e^{-\frac{k_r x}{U}} - e^{-\frac{k_a x}{U}} \right)$$

تمرکز در نتایج بر روی منحنی‌های مصالحه و چگونگی استفاده تصمیم گیرنده از آنها است. یکی از نتایج بدست آمده که در کاربرد الگوریتم می‌توان به آن اشاره کرد افزایش تعداد جواب‌های پارتو با افزایش تعداد تکرارهای کلی برنامه است. در واقع بعد از چندین تکرار بین کلونی‌های مختلف (در دو مدل اول دو کلونی و در مدل آخر سه کلونی) و بدست آوردن یک سری جواب‌های پارتو، فرمان‌های مسیر دوباره به مقدار T_0 برگشته و براساس پارتو دوباره به روز می‌شوند. هرچه تعداد این تکرار افزایش یابد، تعداد جواب‌های پارتو نیز افزایش می‌یابد، بطوریکه در برخی از بازه‌ها تعداد زیادی از جواب‌های پارتو بدست آمده است.

ضرایب و روابط ذکر شده در گزارشات Tetra Thech در سالهای ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ آورده شده‌اند. ۱۸ نقطه کنترلی در نقاط تخلیه در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر هزینه برای هر منبع که در جدول ۳ آورده شده از تحقیق Yandamuri et al. (2006) گرفته شده است. در شکل ۲ موقعیت نسبی هر کدام از تخلیه کننده‌های آلاینده را می‌توان مشاهده کرد.

۵- نتایج و بحث

نتایج بدست آمده برای رودخانه ویلمیت جهت نشان دادن کاربرد الگوریتم چند هدفه مورچه‌ها در مسائل تخصیص بار آلاینده بوده و کاربرد این الگوریتم در یک سیستم واقعی را به تصویر می‌کشد.



شکل ۲- محل واحدهای تخلیه آلاینده و انشعابات جانبی رودخانه ویلمیت

جدول ۱- مشخصات جریان و هندسی رودخانه ویلمیت

شاخه	مشخصه شاخه	طول شاخه (km)	دبی جریان (m^3/s)	عمق جریان (m)	سرعت جریان (m/s)
C-D1	R1	۱۵	۸۷/۷۳	۱/۰۸۴	۰/۶۲۵
D1-T1	R2	۴	۸۸/۸۵	۰/۹۲۵	۰/۶۷۹
T1-D2/3	R3	۴۵	۱۵۴/۷۴	۰/۸۶۵	۰/۹۸
D2/3-D4	R4	۲۶	۱۵۵/۴۷	۱/۶۰۸	۰/۹۵۱
D4-D5	R5	۲۰	۱۵۵/۷۴	۲/۵۲۳	۰/۵۱۸
D5-D6	R6	۴	۱۵۵/۹۶	۱/۲۷۸	۰/۸۰۱
D6-T2	R7	۱۴	۱۵۶/۳۱	۱/۰۳۷	۰/۸۲۴
T2-D7	R8	۴۷	۲۲۳/۶۲	۰/۹۷۹	۰/۹۴
D7-D8/9	R9	۴۵	۲۲۴/۹۷	۵/۸۲	۰/۲۰۹
D8/9-D10	R10	۱۸	۲۲۵/۶۲	۶/۶۹۳	۰/۱۷۹
D10-D11	R11	۹	۲۲۵/۷	۴/۴۸۶	۰/۱۶۴
D11-D12	R12	۹	۲۲۵/۷۴	۱/۵۷۲	۰/۶۸۲
D12-D13	R13	۲	۲۲۶/۲۱	۶/۹۵۶	۰/۲۶۷
D13-D14	R14	۲	۲۲۶/۵۴	۶/۳۲۵	۰/۱۳۱
D14-T3	R15	۲	۲۲۶/۸	۶/۳۲۷	۰/۱۳۱
T3-D15/16	R16	۶	۲۵۹/۱۶	۷/۸۴۴	۰/۱۰۸
D15/16-D17	R17	۳	۲۶۲/۰۴	۵/۲۵۱	۰/۱۰۹
D17-M	R18	۲۹	۲۶۲/۳۶	۸/۹۸۶	۰/۰۷۳

جدول ۲- داده‌های سیستم رودخانه ویلمیت

مشخصه واحد آلاینده	دبی آلاینده (m ³ /s)	(mg/L) BOD	(mg/L) DO
D1	۱/۱۲۴	۳۰۸	۲
D2	-/۵۵۲	۱۸۰	۲
D3	-/۱۷۳	۳۳	۲
D4	-/۲۷۲	۵۲۸	۲
D5	-/۲۲۴	۵۶۵	۲
D6	-/۳۴۶	۲۷۲	۲
D7	۱/۳۵۲	۷۴۰	۲
D8	-/۰۷	۵۲۳	۲
D9	-/۵۸۳	۵۲۱	۲
D10	-/۰۷۵	۷۰۰	۲
D11	-/۰۴۴	۴۷۵	۲
D12	-/۴۶۵	۷۵۷	۲
D13	-/۳۲۸	۲۳۱	۲
D14	-/۲۶۳	۶۸۸	۲
D15	۲/۷۶۵	۷۵۰	۲
D16	-/۱۱۴	۵۵۰	۲
D17	-/۳۱۶	۸۲۵	۲
مشخصه انشعاب	دبی (m ³ /s)	(mg/L) BOD	(mg/L) DO
T1	۶۵/۸۹	۱/۵	۹/۱
T2	۶۷/۳۱	۱/۵	۹/۱
T3	۲۲/۳۷	۱/۵	۹/۱

جدول ۳- هزینه تصفیه در هر واحد تخلیه آلاینده

هزینه تصفیه (میلیون دلار)				(mg/L) BOD	واحد آلاینده
۰/۹۸	۰/۹	۰/۶۷	۰/۳۵		
۵/۳۴	۲/۴۲۲	۲/۲۳۵	۱/۹۸۷	۳۰۸	D1
۳/۴۵۶	۱/۵۲۳	-/۸۷	-/۶۹۵	۱۴۵	D2/3
۹/۱۵۵	۴/۱۵۲	۳/۸۳۲	۳/۴۰۶	۵۲۸	D4
۹/۷۹۶	۴/۴۴۳	۴/۱۰۱	۳/۶۴۵	۵۶۵	D5
۶/۴۸۳	۲/۸۵۶	۱/۶۳۲	۱/۳۰۳	۲۷۲	D6
۱۲/۸۳۱	۵/۸۱۹	۵/۳۷۱	۴/۷۷۴	۷۴۰	D7
۹/۰۳۳	۴/۰۹۷	۳/۷۸۱	۳/۳۶۱	۵۲۵	D8/9
۱۲/۱۳۷	۵/۵۰۴	۵/۰۸۱	۴/۵۱۶	۷۰۰	D10
۸/۲۳۶	۳/۷۳۵	۳/۴۴۸	۳/۰۶۵	۴۷۵	D11
۱۸/۰۴۲	۷/۹۴۹	۴/۵۴۲	۳/۶۲۷	۷۵۷	D12
۵/۵۰۶	۲/۴۲۶	۱/۳۸۶	۱/۱۰۷	۲۳۱	D13
۱۱/۹۲۹	۵/۴۱	۴/۹۹۴	۴/۴۳۹	۶۸۸	D14
۱۲/۸۶۵	۵/۸۳۴	۵/۳۸۵	۴/۷۸۷	۷۴۲	D15/16
۱۴/۳۰۴	۶/۴۸۷	۵/۹۸۸	۵/۳۲۳	۸۲۵	D17

۵-۱- مدل دوهدفه هزینه-تخطی

مدل هزینه-تخطی از مقدار استاندارد، از کمترین مقدار تصفیه در هر واحد به ازای صرف هزینه پایین تا مقداری از تصفیه که هیچگونه تخطی مشاهده نشود، گسترده شده است. در صورتی که کمترین مقدار تصفیه ممکن صورت گیرد، حداکثر تخطی از مقدار اکسیژن محلول استاندارد اتفاق خواهد افتاد. از طرفی دیگر برای اینکه هیچگونه تخطی از مقدار استاندارد اکسیژن محلول وجود نداشته باشد، باید هزینه‌های بالایی پرداخت شود. در این مدل، تصمیم‌گیرنده براساس مقدار هزینه‌ای که صرف خواهد کرد و مقدار تخطی از استاندارد متناظر با آن، اقدام به تصمیم‌گیری خواهد کرد. در واقع هر کدام از نقاط موجود در منحنی جواب هزینه-تخطی یک راه حل برای تصمیم‌گیرنده خواهد بود.

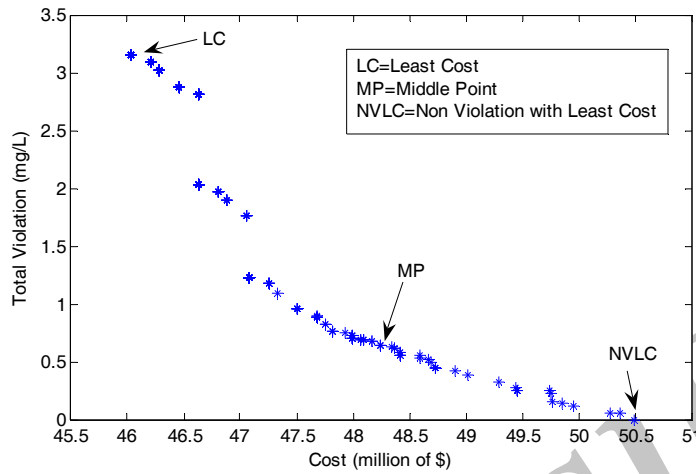
در شکل ۳ مجموعه جواب‌های پارتو هزینه-تخطی آورده شده است. تعداد جواب‌های بدست آمده ۱۴۹۱ نقطه است. این تعداد با افزودن تکرارهای کلی الگوریتم افزایش خواهد یافت. در این حالت از ۲۰ تکرار استفاده شده است. برای بررسی هرچه بیشتر نمودار سه نقطه از جواب‌ها مورد بحث می‌گیرد. نقطه LC مربوط به حداقل هزینه و یا همان حداقل تصفیه در واحدها است. از این رو مقدار تصفیه متناظر با این جواب ۰/۳۵ تصفیه در هر واحد است. مقدار هزینه ۴۶/۰۳۵ میلیون دلار و تخطی ۳/۱۵ است. کران بالای نمودار مصالحه هزینه-تخطی مربوط به نقطه‌ای است که تخطی با صرف هزینه به صفر می‌رسد. در این نقطه NVLC مقدار هزینه ۵۰/۵ میلیون دلار و تخطی برابر با صفر بدست آمده است. نقطه حداقل هزینه‌ای که برای برقراری عدم تخطی در سیستم باید پرداخت شود را نشان می‌دهد. بردار تصفیه در این حالت در جدول ۴ آمده است. با توجه به اینکه مقدار آلاینده تخلیه شده در دو شهر سالم و پرتلند بسیار بالاتر از سایر واحدها است، برای برقرار عدم تخطی مقدار تصفیه در این واحدها ۰/۹ به دست آمده است که رقمی کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. از آنجایی که هزینه تصفیه از مقدار ۰/۹ به ۰/۹۸ بسیار بالا است، به نظر می‌رسد الگوریتم با عدم انتخاب مقدار ۰/۹۸ برای واحدهای با حجم آلودگی بالا، سعی در حداقل سازی مقدار هزینه‌ها دارد. نقطه MP از نقاط میانی نمودار مصالحه است و مقدار هزینه ۴۸/۴۳ میلیون دلار و مقدار تخطی ۰/۶۱۴ میلی گرم بر لیتر است. در این حالت الگوریتم به اتخاذ یک سیاست دو جانبه روی آورده و اجازه مقداری تخطی را از استاندارد داده و در قبال آن کمی از هزینه‌ها را کاهش داده است. با توجه به شکل ۳ روند کلی نمودار مصالحه هزینه-تخطی با افزایش هزینه و کاهش تخطی همراه است. نکته قابل توجه در این مدل نبود مقدار ۰/۹۸ تصفیه در واحدها

است. یکی از دلایل مربوطه به افزایش ناگهانی هزینه‌ها از ۰/۹ به ۰/۹۸ است. دلیل دیگر را می‌توان به نبود بحران اکسیژن محلول در کل مسیر نسبت داد. در صورتی که اکسیژن محلول در طول رودخانه به ارقام بسیار پایینی می‌رسید، برای برقراری عدم تخطی و یا مقادیر پایین آن، اتخاذ ۰/۹۸ تصفیه در برخی از واحدها الزامی می‌شد.

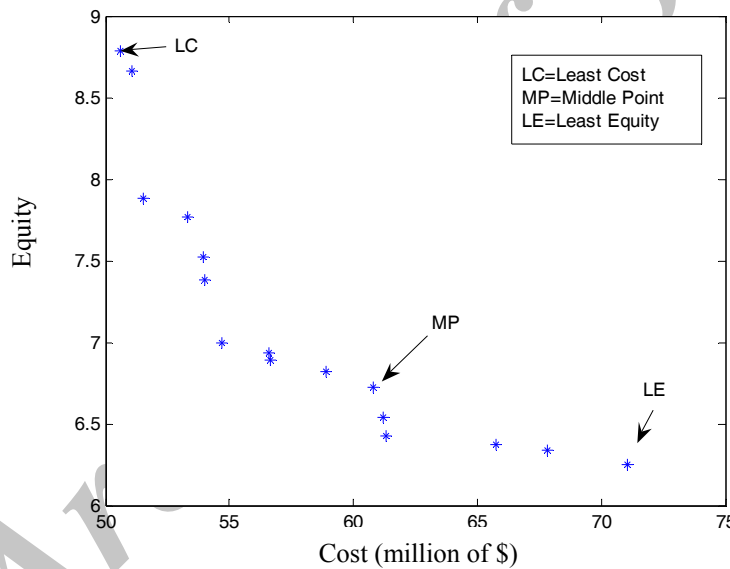
۵-۲- مدل دو هدفه هزینه-عدالت

در مدل حاضر علاوه بر برقراری عدالت بین میزان تصفیه در واحدهای مختلف، هزینه انجام این کار نیز مشخص می‌شود. در واقع با صرف هزینه‌های مختلف می‌توان درجات متفاوتی از میزان شاخص عدالت برقرار کرد. نکته‌ای که قابل ذکر است، عدم وجود تخطی از مقدار استاندارد اکسیژن محلول در کل مسیر رودخانه برای برقراری شاخص عدالت است. همان طوری که ذکر شد، یکی از قیده‌های مسئله بهینه‌سازی در این مدل، عدم تخطی از مقدار استاندارد اکسیژن محلول است. آنچه مشخص است، برای جواب‌های به دست آمده، بازه از حداکثر برقراری شاخص عدالت در برابر صرف هزینه‌های بالا تا حداقل هزینه لازم برای ایجاد عدم تخطی از مقدار استاندارد اکسیژن محلول (که معادل با برقراری کمترین شاخص عدالت است) گسترده شده است. به بیانی دیگر در بازه مربوطه، هر چه هزینه بیشتری صرف شود، میزان عدالت بین واحدهای تصفیه‌کننده بالاتر خواهد بود. بر اساس داده‌های موجود، از ۱۴ منبع تخلیه‌کننده آلاینده به رودخانه ویلمت، دو منبع مقدار بسیار بیشتری نسبت به سایر منابع دارند. این دو منبع مربوط به شهرهای سالم و پرتلند هستند. در صورتی که مقدار تصفیه در این دو منبع با حداکثر مقدار (۰/۹۸) انجام گیرد، به علت بالا بودن حجم آلاینده ورودی نسبت به میانگین آن در هر حالتی، باعث تحمیل مقدار قابل توجهی از شاخص عدالت به سیستم خواهد شد. مقدار $\frac{W}{W}$ برای خروجی شهر سالم ۲/۶۸ و برای شهر پرتلند ۵/۷۱ است. با توجه به محاسبات انجام شده، مقدار حداقلی که برای شاخص عدالت می‌توان متصور شد، مقدار ۳/۹۳ است. البته این در صورتی است که شاخص عدالت در سایر واحدهای تصفیه (غیر از شهرهای سالم و پرتلند) صفر باشد. از طرفی دیگر قیدهایی که در مسئله وجود دارند صفر بودن شاخص عدالت در سایر واحدها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین نتایج به دست آمده از شکل ۴ برای شاخص عدالت کاملاً منطقی به نظر می‌رسد. نکته جالب توجه این است که در ۸۰ درصد جواب‌های پارتو در واحد شهر سالم و در ۱۰۰ درصد جواب‌ها برای شهر پرتلند، مقدار تصفیه ۰/۹ یا ۰/۹۸ انتخاب شده است که نشان از عملکرد درست الگوریتم دارد. جواب LC در شکل ۴ همان جواب به دست آمده در نقطه NVLC است که متناظر با حداقل هزینه لازم جهت عدم

تخطی از مقدار اکسیژن محلول در کل مسیر است. نقطه LE در تخطی از مقدار اکسیژن محلول بین واحدهای تصفیه کننده شکل ۴ نشان دهنده حداقل مقدار شاخص عدالت است. یعنی با صرف مبلغ حدود ۷۱ میلیون دلار می‌توان بهترین عدالت را بدون



شکل ۳- نمودار مصالحه هزینه-تخطی از استاندارد



شکل ۴- نمودار مصالحه هزینه-عدالت

جدول ۴- مقادیر درصد تصفیه در نقاط پارتو

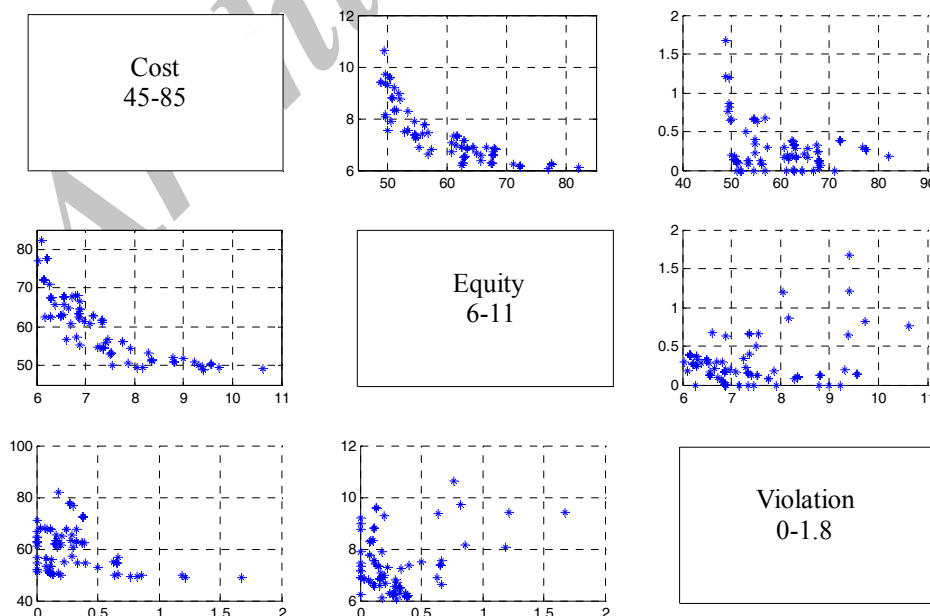
شاخص	جواب پارتو	درصد تصفیه در واحدها
LC	(۳/۱۶۹۲, ۴۶/۰۳۵)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)
NVLC	(۰, ۵۰/۴۹۲)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)
MP	(۰/۶۱۴۴, ۴۸/۴۲۸)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)
LC	(۷۹/۴۹۲, ۵۰/۴۹۲)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)
LE	(۶/۲۵۲۱, ۷۰/۰۷۱)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)
MP	(۶/۷۲, ۶۰/۸۱۶)	(۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵ - ۰/۳۵)

۵-۳- مدل سه هدفه هزینه-عدالت-تخطی

برای اینکه بتوان اثرات همزمان هزینه، عدالت و میزان تخطی از مقدار استاندارد را در اختیار تصمیم گیرنده قرار داد، نیاز به تحلیل مسئله سه هدفه وجود دارد. خاصیت این مدل ارائه شاخص عدالت با اجازه تخطی از مقدار استاندارد اکسیژن محلول است. در واقع برای برقراری شاخص عدالت دیگر نیازی به عدم تخطی از استاندارد اکسیژن محلول وجود ندارد. بنابراین این مدل بصورت انعطاف پذیر در مورد شاخص عدالت و تخطی از اکسیژن استاندارد محلول رفتار می‌کند. گستره جواب‌های این مدل از "حداقل هزینه، حداکثر تخطی و حداقل برقراری عدالت" تا "حداکثر هزینه، حداقل تخطی و حداکثر برقراری عدالت" در ابعاد مختلف گسترده شده است. از مهمترین دستاوردهای این مدل، تصمیم گیرنده می‌تواند با تخصیص مقدار مشخص برای یکی از این اهداف (مثلاً هزینه) روند تغییرات سایر اهداف (شاخص عدالت-تخطی) را مشاهده و بر اساس آن تصمیم‌گیری کند.

در شکل ۵ نمایشی از حالت‌های مختلف نمودارهای پراکنندگی سه متغیر تصمیم هزینه، عدالت و تخطی مشاهده می‌شود. تعداد حالت‌های ممکن $\binom{3}{2}$ یعنی ۶ حالت است. از تفاوت‌هایی که در منحنی‌های مصالحه این مدل نسبت به حالت‌های مشابه در مدل‌های قبلی وجود دارد، مقدار تخطی در برخی موارد بیش از یک

مورد صفر است که هر کدام متناظر با مقادیر یک زوجی از ترکیبات هزینه با شاخص عدالت می‌باشد. آزاد بودن تخطی در این مدل باعث تفاوت مقادیر شاخص عدالت در این مدل نسبت به مدل هزینه-عدالت شده است. نمودار دوجه دوی مصالحه در هر یک از جواب‌ها به شکل سابق نبوده است. محقق ساختن سه هدف به صورت هم زمان باعث تغییر در این نمودارها شده است. آن چیزی که می‌توان از نمودار مصالحه استخراج کرد، کاهش مقادیر کلی تخطی، شاخص عدالت و افزایش بازه هزینه است. برای برقراری مقدار بهینه شاخص عدالت در کل مسیر، افزایش در مقادیر هزینه (یا افزایش مقادیر تصفیه) را به دنبال خواهد داشت. افزایش مقادیر تصفیه، کاهش تخطی در کل سیستم را در پی خواهد داشت. همان طوری که انتظار می‌رود، نتایج به دست آمده کاهش کلی در مقادیر شاخص عدالت و تخطی را نشان می‌دهند. مقدار حداکثر تخطی در حالت مدل هزینه تخطی $3/15$ بوده در حالی که همین مقدار در مدل سه هدفه (با در نظر گرفتن شاخص عدالت) $1/67$ است. و همین طور مقدار حداقل شاخص عدالت در حالت مدل هزینه-عدالت $6/25$ بوده و در مدل سه هدفه (با در نظر گرفتن تخطی) $6/04$ به دست آمده است. با آزادسازی تخطی در حضور شاخص عدالت، مشاهده می‌شود که با لحظ کردن مقدار کمی از تخطی، شاخص عدالت کاهش پیدا می‌کند و در عین حال افزایش نسبی هزینه‌ها را در پی خواهد داشت. سیاست‌های بدست آمده در این قسمت می‌تواند حق انتخاب‌های بیشتری را در اختیار تصمیم گیرنده قرار دهد.



شکل ۵- نمودار مصالحه هزینه-عدالت-تخطی

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این تحقیق بهینه‌یابی چند هدفه تخصیص بار آلاینده در رودخانه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اهداف شامل هزینه، تخطی از مقدار اکسیژن محلول استاندارد و شاخص عدالت بوده و مدل شبیه‌ساز کیفی به کار رفته، معادلات استریتر-فلیس بوده است. الگوریتم بهینه‌یابی مورد استفاده از کار Afshar et al. (2008) گرفته شده و سه مدل مختلف برای استفاده تصمیم‌گیرندگان طرح‌های مربوطه، مورد تحلیل قرار گرفته است. دو مدل بصورت دو هدفه و یک مدل به صورت سه هدفه بررسی شده است. قابلیت الگوریتم کلونی مورچه‌ها در گسسته‌سازی اولیه مقادیر تصفیه که باعث اجرایی بودن نتایج تحقیق می‌شود یکی از برتری‌های کلونی مورچه‌ها نسبت به الگوریتم‌های دیگر بوده است. بررسی سه هدفه مسئله تخصیص بار آلاینده می‌تواند تصمیم‌گیری سیاست‌های بهینه را با در نظر گرفتن معیارهای مختلف به صورت همزمان تسهیل کند. نتایج نشان می‌دهند که برقراری هرچه بیشتر شاخص عدالت نیازمند صرف هزینه بیشتری است. در نتایج بدست آمده از مدل سه هدفه می‌توان تغییرات شاخص عدالت و مقادیر تخطی را مشاهده کرد. سیاست‌های بدست آمده در این قسمت می‌تواند حق انتخاب‌های بیشتری را در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار دهد. برای ادامه تحقیق می‌توان از مدل‌های شبیه‌ساز حجیم‌تر با صرف زمان بیشتر نتایج را مورد تحلیل قرار داد. از سویی دیگر می‌توان انواع آلاینده‌ها را بصورت اختصاصی و یا در کنار همدیگر مورد بررسی قرار داد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Meta heuristic Pareto
- 2- Inequity
- 3- Wilmate river
- 4- Discretization
- 5- Standard water quality level
- 6- Streeter-Phelps Equation

۷- مراجع

- Afshar, A., Kaveh, A. and Shoghli, O.R. (2007), "Multi-Objective Optimization of Time-Cost-Quality Using Multi-Colony Ant Algorithm" *Asian Journal of Civil Engineering* (Building and Housing). 8(2), pp. 149-160.
- Afshar, A., Sharifi, F. and Jalali, M. R. (2008), "Nondominated ARCHRIVING Multicoloni and Ant Algorithm for Multi Objective Optimization; Application to Multi propose Reservoir Operation", *journal of Engineering Optimization*. 41(4), pp. 313-325 (13).
- Baran, B. and Schaerer, M. (2003), "A Multiobjective Ant Colony System for Vehicle Routing Problem with Time Windows", Twenty first IASTED International Conference on Applied Informatics, Innsbruck, Austria, February 10-13, pp. 97-102.
- Burn, D. H. and McBean, E. A. (1985), "Optimization modeling of water quality in an uncertain environment", *Water Resour. Res.*, 21(7), pp. 934-940.
- Burn, D. H. and Yulianti, J. S. (2001), "Waste-load allocation using genetic algorithms", *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 127(2), pp. 121-129.
- Cardwell, H. and Ellis, J. H. (1993), "Stochastic dynamic programming models for water quality management.", *Water Resour. Res.*, 29(4), pp. 803-813.
- Chen, H. W. and Chang, N.B. (1998), "Water pollution control in the river basin by fuzzy genetic algorithm-based multiobjective programming modeling." *Water Sci. and Technol.*, 37(3), pp. 55-63.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T. (2002), "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II" *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 6(2), pp. 182-197.
- Doerner, K., Gutjahr, W.J., Hartl, R.F., Strauss, C. and Stummer, C. (2004), "Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection, *Annals of Operations Research*, 131, pp. 79-99.
- Dorfman, R., Jacoby, H. D. and Thomas, H. A., Jr. (1972), "Models for managing regional water quality", Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Ellis, J. H. (1987), "Stochastic water quality optimization using imbedded chance constraints", *Water Resour. Res.*, 23(12), pp. 2227-2238.
- Fujiwara, O., Gnanendran, S. K. and Ohgaki, S. (1986), "River quality management under stochastic streamflow" *J. Envir. Engrg.*, ASCE, 112(2), pp. 185-198.
- Iredi, S. D. and Middendorf 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.
- Loucks, D. P., ReVelle, C. S. and Lynn, W. R. (1967), "Linear programming models for water pollution control", *Mgmt. Sci.*, 14(4), B-166-B-181.
- Mariano, C. E. and Morales, E. (2002), "A Multiple Objective Ant-Q Algorithm for the Design of Water

- Wang, X. L. and M. Mahfouf, (2004), “ACSAMO: An Adaptive Multiobjective Optimization Algorithm using the Clonal Selection Principle”, The Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China
- Yandamuri, S. R., Srinivasan, K. and Bhallamudi, M. S. (2006), “Multiobjective Optimal Waste Load Allocation Models for Rivers Using Nondominated Sorting Genetic Algorithm-II” *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 132(3), pp. 133–143.
- Distribution Irrigation Networks”, instituto Mexicano de Tecnologia del Agua, Mexico.
- Sasikumar, K. and Mujumdar, P. P. (1998). “Fuzzy optimization model for water quality management of river system” *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 124(2), pp. 79–84.
- Takyi, A. K. and Lence, B. J. (1999). “Surface water quality management using a multiple-realization chance constraint method”, *Water Resour. Res.*, 35(5), pp. 1657–1670.

Archive of SID