

تخصیص بار آلاینده با رویکرد مجموع حداکثر بار آلاینده روزانه با استفاده از الگوریتم کاوش سیستم ذرات باردار

الهام فرجی^۱، عباس افشار^۲، فرزانه فیضی^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
(نویسنده مسئول) faraji101511@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت ۹۱/۱۱/۲۰ آخرین اصلاحات دریافتی: ۹۳/۱۱/۲۶ پذیرش ۹۳/۱۱/۱۲)

چکیده

در این پژوهش قابلیت الگوریتم کاوش سیستم ذرات باردار (CSS) در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی آب بررسی شد. ابتدا دو نمونه از مسائل نسبتاً پیچیده ریاضی توسط الگوریتم CSS حل شد و نتایج آن با نتایج سایر الگوریتم‌های فراکاوشی مقایسه شد. در انتها کاربرد مدل بهینه‌سازی توسعه داده شده توسط الگوریتم CSS در تخصیص بار آلاینده با رویکرد مجموع حداکثر بار روزانه (TMDL) در رودخانه، نشان داده شد. به‌منظور قضاوت درست از کارایی این الگوریتم، نتایج در قالب جداول و نمودارهایی ارائه شد. نتایج نشان داد سرعت الگوریتم مذکور نسبت به سایر الگوریتم‌های فراکاوشی بیشتر است و دقت آن نیز در حل مسائل بهینه‌سازی مهندسی آب رضایت‌بخش است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم‌های فراکاوشی، الگوریتم کاوش سیستم ذرات باردار، تخصیص بار آلاینده، مجموع حداکثر بار آلاینده روزانه

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تخصیص بارهای آلاینده ورودی به منابع آبی صورت گرفته است. افزایش روز افزون مصرف‌کنندگان نیازمند مدیریت صحیحی در سطوح مختلف تصفیه است؛ به طوری که با رعایت مقادیر استاندارد، تخصیص‌های قابل قبولی را هم برای تخلیه‌کنندگان و هم سازمان‌های نظارتی فراهم آورده است؛ تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است [۱ و ۲].

تومن در سال ۱۹۷۲ بررسی نمود که تابع هزینه نقش بسزایی دارد و با درصد تصفیه‌های مورد نیاز رابطه خطی نخواهد داشت [۳]. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در راستای تعیین این روابط و عدم قطعیت ضرایب به‌کار گرفته شده، صورت پذیرفته است. شاخص‌های دیگری نظیر عدالت^۱ و تاسف^۲ و غیره در مطالعات وارد شده‌اند. با گسترش تحقیقات و دستاوردهای جدید محققان، روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی پیشرفت شایان توجهی داشته‌اند [۴]. در فم و همکاران و لوکس و همکاران مدل‌هایی را توسعه

دادند که سطح تصفیه بارهای نقطه‌ای متغیرهای تصمیم و توابع هدف به‌صورت حداکثرسازی بازده اقتصادی در نظر گرفته شده بودند [۵]. کاردول و الیس از یک تقریب رگرسیونی برای مدیریت کیفیت آب استفاده کردند که تأثیر هر کدام از منابع آلاینده به‌صورت غیر خطی بوده است [۶]. مفهوم مجموع حداکثر بار روزانه^۳ تعریفی را برای فرایند تخصیص بار آلاینده معرفی می‌نماید. مجموع حداکثر بار روزانه مقدار بار آلاینده‌ای است که یک پیکره آبی قادر به پذیرش آن بدون تخطی از استانداردهای کیفی است. یانگ و هسبه در سال ۲۰۰۶ استراتژی‌های مختلف کاهش بار آلودگی غیر نقطه‌ای سفر ورودی به مخزن را بر اساس فرایند TMDL با استفاده از مدل BASINS مورد بررسی قرار داده‌اند [۷]. بورا و همکاران در سال ۲۰۰۶ مطالعه جامعی بر روی مدل‌سازی رسوب و مواد مغذی در پیکره‌های آبی انجام داده‌اند. در این پژوهش با اشاره به این که ۳۴۰۰۰ پیکره آبی آسیب دیده در ایالت متحده وجود دارد، لزوم بررسی تخصیص آلاینده‌ها و در نهایت تدوین TMDL بیان شده است. همچنین در این پژوهش مدل‌های مختلفی در پیکره‌های آبی مختلف از جمله رودخانه‌ها،

¹ Equity

² Regret

³ Total Maximum Daily Load (TMDL)

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی الگوریتم بهینه‌سازی کاوش سیستم ذرات باردار
الگوریتم بهینه‌سازی کاوش سیستم ذرات باردار توسط کاوه و طلعت‌اهری در سال ۲۰۱۰ ارائه شد و برای بهینه‌سازی مسائل مربوط به مهندسی سازه مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم از نوع الگوریتم‌های فراکاوشی با منشأ طبیعی، جمعیت محور و دارای حافظه بوده که بر اساس قوانین کولن از فیزیک و قوانین حرکت از مکانیک استوار است [۱۴]. این الگوریتم عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم‌های فراکاوشی متداول مانند الگوریتم ژنتیک^۴ و بهینه‌سازی کلونی مورچگان^۵ در برخی مسائل مهندسی سازه نشان داده است [۱۵ و ۱۶]. این الگوریتم تاکنون تنها در یک مسئله و برای نخستین بار در بهره‌برداری از مخزن توسط افشار و اسدیه در سال ۱۳۹۰ در شاخه مهندسی آب مورد استفاده قرار گرفته است و کارایی بسیار خوبی نشان داده است [۱۷]. ولی کارایی این الگوریتم در مسائل کیفیت آب و در رودخانه و نیز تخصیص بار آلاینده که از مسائل اساسی توسعه‌های آبی است، نشان داده نشده است. الگوریتم بهینه‌سازی کاوش سیستم ذرات تا قبل از مطالعات افشار و اسدیه، در سال ۱۳۹۰ تنها به صورت تک هدفه موجود بود اما در مطالعات اسدیه، روشی برای حل چند هدفه این الگوریتم برای نخستین بار ارائه شد. این الگوریتم در اصل برای جستجو در فضای پیوسته ارائه شده است ولی قابلیت جستجو در محیط‌های گسسته را نیز با استفاده از "روش پرواز به مرزها" دارد [۱۸].

۲-۲- ساختار الگوریتم کاوش سیستم ذرات باردار

در این روش فضای جستجو (فضای مربوط به تمام راه‌حل‌های ممکن برای مسئله) یک فضای n بعدی خواهد بود که n تعداد متغیرهای تصمیم موجود در تعریف مسئله است. هر راه‌حل ممکن در این روش به صورت یک ذره باردار با شعاع تعریف شده در فضای جستجو فرض می‌شود که تحت تأثیر میدان الکتریکی سایر ذرات موجود (راه‌حل‌های ممکن دیگر) قرار می‌گیرد. کمیت نیروهای وارد بر هر ذره توسط قوانین الکترواستاتیکی و کیفیت حرکت بر اساس مکانیک نیوتونی صورت می‌گیرد [۱۴]. هر ذره دارای بار الکتریکی (q_i) است و در نتیجه در اطراف خود میدان الکتریکی به وجود می‌آورد. بزرگی بار هر ذره با توجه به کیفیت راه‌حل آن و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

دریاچه‌ها، مخازن و غیره معرفی و محدودیت‌ها و کارایی هریک توضیح داده شده است [۸]. لیو و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی تخصیص TMDL منابع آلاینده موجود در حوزه آبریز خلیج سنت لوییس پرداخته و برای مدل‌سازی از مدل HSPF استفاده نموده‌اند. آنها در این پژوهش بررسی کرده‌اند که میزان اکسیژن محلول به قدری پایین است که پیکره‌های آبی موجود در این حوزه آبریز، جزو پیکره‌های آبی آسیب دیده می‌باشند. بنابراین لزوم تخصیص TMDL را در این محل نشان داده و برای کاهش آلاینده‌ها، ارزیابی‌هایی با اعمال بهترین شیوه‌های مدیریتی^۱ انجام داده‌اند [۹]. کارآموز و همکاران در سال ۲۰۰۹ به ارزیابی حداکثر بار ورودی TMDL مواد مغذی از حوزه آبریز به مخزن سد ستارخان پرداخته‌اند. آنها از مدل SWAT برای مدل‌سازی مخزن استفاده کرده‌اند. در پژوهش مذکور با اعمال بهترین شیوه‌های مدیریتی، سیاست‌های کاهش آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای تدوین شده است [۱۰].

الگوریتم‌های فراکاوشی^۲ به عنوان ابزاری برای حل مسائل ذکر شده مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا می‌توان به مطالعات چن و چانگ در سال ۱۹۹۸ اشاره نمود که با ترکیب بهینه‌سازی فازی و الگوریتم ژنتیک، مسئله تخصیص بار در رودخانه را حل کرده‌اند [۱۱]. سعادتپور و افشار در سال ۲۰۰۷ با استفاده از مدل شبیه‌ساز QUAL2E و الگوریتم ژنتیک به تخصیص بار آلاینده در شرایط غیر قطعی پرداخته‌اند. در تحقیق آنها تابع هزینه و استانداردهای کیفی آب به صورت فازی در نظر گرفته شده است [۱۲]. حسین‌زاده و همکاران در سال ۲۰۱۰ قابلیت الگوریتم چندجمله‌ای مورچه‌ها را در مسائل چند هدفه تخصیص بار آلودگی در رودخانه بررسی نموده‌اند [۱۳].

پژوهش حاضر بر روی کاربرد الگوریتم سیستم کاوش ذرات باردار^۳ برای حل مسئله تخصیص بار آلاینده انجام شد. ابتدا دو نمونه از مسائل نسبتاً پیچیده ریاضی توسط الگوریتم CSS حل شد و نتایج آن با نتایج الگوریتم‌های دیگر مقایسه شد. به منظور نشان دادن کارایی این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها و کاربرد آن در مسائل بهینه‌سازی، از مدل شبیه‌ساز QUAL2K استفاده شد. شاخص تعیین سطح کیفیت آب رودخانه، اکسیژن محلول موجود در آب در نقاط کنترلی است.

⁴ Genetic Algorithm

⁵ Ant Colony Algorithm

⁶ Fly To Boundary Method

¹ Best Management Practice (BMP)

² Meta-Heuristic

³ Charged System Search Algorithm (CSS)

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{\text{fit}(i) - \text{fitbest}}{\text{fit}(j) - \text{fit}(i)} > \text{rand} \vee \text{fit}(j) > \text{fit}(i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

با توجه به حالات گفته شده، زمانی که یک ذره خوب، یک ذره بد را جذب می‌کند، قابلیت استخراج^۱ الگوریتم فراهم می‌شود و برعکس اگر یک ذره بد به یک ذره خوب نیروی جاذبه وارد کند، توانایی اکتشاف^۲ در الگوریتم ایجاد می‌شود. زمانی که یک ذره باردار به سمت یک ذره خوب حرکت می‌کند، عملکرد آن بهبود پیدا می‌کند و بنابراین اصل خود انطباقی^۳ تضمین شده است. حرکت یک ذره با کیفیت خوب به سمت یک ذره با کیفیت بد ممکن است باعث از دست رفتن موقعیت خوب قبلی شود و یا حداقل این که باعث افزایش هزینه محاسباتی برای پیدا کردن یک راه حل خوب شود. برای حل این مشکل می‌توان یک حافظه که در بردارنده بهترین راه حل‌ها تا تکرار موجود باشد در نظر گرفت [۱۴ و ۱۵].

موقعیت و سرعت جدید هر ذره با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شود

$$X_{j,\text{new}} = \text{rand}_{j1} \cdot k_a \cdot \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + \text{rand}_{j2} \cdot k_v \cdot V_{j,\text{old}} \cdot \Delta t + X_{j,\text{old}} \quad (6)$$

$$V_{j,\text{new}} = \frac{X_{j,\text{new}} - X_{j,\text{old}}}{\Delta t} \quad (7)$$

که در این روابط

k_a ضریب شتاب، k_v ضریب سرعت برای کنترل تاثیر سرعت، rand_{j1} و rand_{j2} دو عدد تصادفی که به صورت یکنواخت در فاصله (0,1) توزیع شده‌اند و m_j جرم ذره j ام که برابر است با q_j و Δt گام زمانی و برابر یک در نظر گرفته می‌شود.

در حقیقت k_a پارامتری برای کنترل استخراج است. بنابراین انتخاب یک تابع افزایشی می‌تواند باعث بهبود عملکرد الگوریتم شود. همچنین جهت سرعت قبلی یک ذره لزوماً هم جهت نیروی برآیند نیست. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ضریب سرعت، k_v عمل اکتشاف را کنترل می‌کند و بنابراین می‌توان یک تابع کاهش‌ی را انتخاب کرد. ضرایب k_a و k_v مطابق روابط زیر تعریف می‌شوند [۱۴]

$$q_i = \frac{\text{fit}(i) - \text{fitworst}}{\text{fitbest} - \text{fitworst}} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که در این رابطه

fitbest و fitworst بهترین و بدترین مقدار تابع هدف همه ذرات، تاکنون است؛ $\text{fit}(i)$ مقدار تابع هدف ذره i و N تعداد کل ذرات باردار است.

مقدار برآیند نیروی الکتریکی وارد بر یک ذره تحت اثر بارهای دیگر به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

$$F_j = q_i \sum_{i, i \neq j} \left(\frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}} \cdot i_2 \right) \text{ar}_{ij} P_{ij} (X_i - X_j) \quad (2)$$

$$\begin{cases} j = 1, 2, \dots, N \\ i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases}$$

که در آن

F_j برآیند نیروهای وارد شونده بر j امین ذره است. در این الگوریتم هر ذره به عنوان یک کره باردار با چگالی بار یکنواخت و به شعاع a در نظر گرفته می‌شود. اندازه شعاع a برابر یک در نظر گرفته می‌شود؛ ولی برای مسائل پیچیده، مقدار مناسب برای آن باید با در نظر گرفتن اندازه فضای جستجو تعریف شود. رابطه زیر می‌تواند به عنوان رابطه عمومی برای شعاع a مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]

$$a = 0.10 \times \max \left\{ \left| x_{i,\text{max}} - x_{i,\text{min}} \right| \quad i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad (3)$$

فاصله میان دو ذره باردار به صورت زیر تعریف می‌شود

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\|(X_i + X_j)/2 - X_{\text{best}}\| + \varepsilon} \quad (4)$$

که در این رابطه

X_i و X_j موقعیت‌های i امین و j امین ذره است، X_{best} موقعیت بهترین ذره در میان جمعیت موجود و ε عدد مثبت کوچکی است که مانع از صفر شدن مخرج کسر می‌شود.

در مورد قابلیت نیرو وارد کردن ذرات بر یکدیگر، می‌توان چنین گفت که همه ذرات خوب می‌توانند ذرات بد را جذب کنند و فقط تعدادی از ذرات بد توانایی جذب ذرات خوب را دارند، که این مسئله با استفاده از تابع احتمال به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

¹ Exploration
² Exploitation
³ Self-Adaptation

(۸)

$$k_a = \alpha \times (1 + \text{iter} / \text{iter}_{\max})$$

$$k_v = \beta \times (1 - \text{iter} / \text{iter}_{\max})$$

در این رابطه iter شماره تکرار فعلی، iter_{max} برابر تعداد کل تکرارها، α ضریب سرعت و β ضریب شتاب است. با استفاده از این روابط با افزایش تعداد تکرار، k_v به صورت خطی تا صفر کاهش پیدا می‌کند و k_a به مقدار یک افزایش می‌یابد. بنابراین تعادل میان اکتشاف و نرخ سریع همگرایی برقرار می‌شود. با در نظر گرفتن مقادیر این پارامترها، روابط موقعیت و سرعت هر ذره باردار به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴]

(۹)

$$X_{j,\text{new}} = \alpha \cdot \text{rand}_{j1} \cdot (1 + \text{iter} / \text{iter}_{\max}) \cdot \sum_{i,i \neq j} \left(\frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) p_{ij} (X_i - X_j) + \beta \cdot \text{rand}_{j2} \cdot (1 - \text{iter} / \text{iter}_{\max}) \cdot V_{j,\text{old}} + X_{j,\text{old}}$$

(۱۰)

$$V_{j,\text{new}} = X_{j,\text{new}} - X_{j,\text{old}}$$

دو مشکل اصلی در ارتباط با تعداد زیادی از الگوریتم‌های فراکاوشی وجود دارد: اولین مسئله تعادل میان اکتشاف و استخراج در آغاز، در ادامه و در انتهای جستجو است. و دومین مسئله، چگونگی برخورد با شرایطی است که یک ذره از شرایط مرزی به وجود آمده توسط حدود متغیرها خارج شود.

اولین مسئله به طور طبیعی با استفاده از قوانینی که گفته شد، حل شده است. هرچند به منظور حل دومین مشکل، یکی از ساده‌ترین روش‌ها، استفاده از نزدیک‌ترین مقدار محدود شده برای متغیری است که تخلف کرده است. همچنین می‌توان متغیری را که تخلف کرده است مجبور به بازگشت به موقعیت قبلی خود کرد؛ و یا این که می‌توان مقدار حداکثر سرعت را کاهش داد تا تعداد کمتری از ذرات از مرزهای متغیرها تجاوز کنند. اگر چه این روش‌ها ساده هستند ولی به اندازه کافی موثر نیستند و ممکن است منجر به کاهش توانایی اکتشاف در فضای جستجو شوند. این مشکل قبلاً با استفاده از روشی که بر اساس الگوریتم جستجوی هارمونی^۱ است، حل شده است. بر طبق این مکانیسم هر متغیری از بردار حل که از مرزهای متغیرها تجاوز کند، می‌تواند با استفاده از حافظه ذرات باردار، دوباره تولید شود [۱۴]

(۱۱)

$$x_{i,j} = \begin{cases} \text{w.p. CMCR} & \Rightarrow \text{Select a new value for a variable from CM} \\ & \Rightarrow \text{w.p. (1 - PAR) do nothing} \\ & \Rightarrow \text{w.p. PAR choose a neighboring value} \\ \text{w.p. (1 - CMCR)} & \Rightarrow \text{select a new value randomly} \end{cases}$$

که در این رابطه

x_{i,j} برابر است با i امین متغیر در ذره j، CMCR برابر است با احتمال انتخاب یک مقدار برای بردار راه حل جدید از مقادیر ذخیره شده در حافظه ذرات، و (1-CMCR) برابر است با احتمال انتخاب تصادفی یک مقدار از میان مقادیر مجاز. مرحله تنظیم درجه فقط زمانی اجرا می‌شود که یک مقدار از حافظه ذرات انتخاب شده باشد. مقدار (1-PAR) نشان دهنده این است که هیچ عملی انجام نمی‌شود و مقدار PAR برابر است با احتمال انتخاب یک مقدار از همسایگی بهترین ذره باردار [۱۴].

کاوه و طلعت‌اهری طی مقاله‌ای در سال ۲۰۱۱ یک تعبیر جدید از بعد زمانی در الگوریتم CSS را پیشنهاد دادند [۱۹]. در این پژوهش، آنها مفاهیم بعد زمانی و مکانی در الگوریتم‌های فراکاوشی را مورد بررسی قرار دادند و در نهایت پیشنهاد نمودند که در الگوریتم CSS، هر ذره پس از ارزیابی تابع هدف و کسب بار، می‌تواند حرکت کرده و جواب جدیدی تولید کند و جواب جدید تولید شده، می‌تواند برای هدایت بهتر سایر ذرات مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت، واحد زمانی عملکرد الگوریتم، از یک تکرار، به یک بار ارزیابی تابع هدف تقلیل می‌یابد. از آنجا که یک بار ارزیابی تابع هدف را می‌توان کوچک‌ترین واحد زمانی ممکن برای یک الگوریتم فراکاوشی در نظر گرفت، اعمال چنین روندی عملاً منجر به ایجاد بعد زمانی پیوسته در ساختار الگوریتم خواهد شد. کاوه و طلعت‌اهری در مطالعه مذکور، الگوریتم‌های فراکاوشی که از مفهوم بعد زمانی پیوسته در جهت افزایش سرعت الگوریتم استفاده می‌کنند را الگوریتم‌هایی بر مبنای میدان نیروها^۲ و الگوریتم CSS^۳ را که از این مفهوم استفاده می‌نماید، الگوریتم کاوش سیستم ذرات باردار بهبود یافته^۳ نامیدند. ایشان اشاره نمودند که کاربرد این مفهوم در سایر الگوریتم‌های فراکاوشی موجود نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. شرح کامل مفهوم میدان نیروها در مطالعه مذکور ارائه شده است.

² Field of Forces (FOF)

³ Enhanced Charged System Search

¹ Harmony Search

۳- اجرای مدل بهینه‌سازی

۳-۱- بررسی عملکرد الگوریتم CSS در مسائل ریاضی

قبل از پرداختن به حل مدل بهینه‌سازی توسط الگوریتم CSS، لازم است برای جامعیت بخشیدن و آزمون عملکرد الگوریتم، به حل برخی مسائل شناخته شده ریاضی پرداخت. نتایج ارائه شده در ادامه، حاصل اجرای الگوریتم بهینه‌سازی CSS در این مسائل است. در انتخاب توابع ریاضی مورد نظر، سعی شده است به گونه‌ای عمل شود که انواع مسائل بهینه‌سازی با توجه به انواع پیچیدگی‌های موجود مدنظر قرار گیرد تا به این ترتیب جامعیت استفاده از الگوریتم حاضر در حل مثال‌های متفاوت تصدیق و تأیید شده و مورد آزمایش قرار گیرد. مسائل فوق به گونه‌ای انتخاب شده که کاملاً شناخته شده باشند و نتایج حل آنها با دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی موجود در دسترس و قابل مقایسه باشد. این امر کمک خواهد نمود تا بتوان قضاوت درست و منصفانه‌ای از چگونگی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی سیستم کاوش ذرات باردار در قیاس با سایر الگوریتم‌ها ارائه نمود.

ضرایب سرعت و شتاب، ثابت‌های (α و β)، توانایی استخراج و اکتشاف الگوریتم را کنترل می‌نمایند. این ضرایب در مقاله مرجع معرفی الگوریتم، $0/5$ تعریف شده‌اند اما بدیهی است که این ضرایب قابل تغییر است. با انجام اجراهای مختلف مشخص شد که مقدار $0/8$ جواب‌های بهتری در حل مسائل ریاضی می‌دهد. اولین تابع ریاضی تابع اکلی است. تابع اکلی یک تابع کمینه‌سازی پیوسته با توابع غیر خطی نمایی و کسینوسی است. از مشخصات این تابع می‌توان به چند قله‌ای و تفکیک‌ناپذیر بودن آن اشاره نمود.

شکل ۱ تابع دو بعدی اکلی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تابع دارای چندین حداقل موضعی است که از هر طرف به سمت یک حداقل مطلق در حرکت است. به دلیل وجود این حداقل‌های موضعی، روش‌های بهینه‌سازی صریح که مبتنی بر صعود قله می‌باشند، مطمئناً در یکی از این حداقل‌های موضعی محصور خواهند شد.

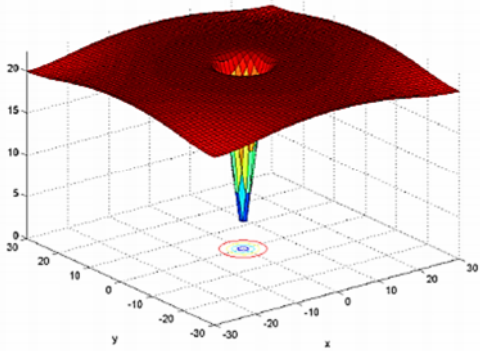
اما راهکارهای جستجو که محدوده همسایگی وسیع‌تری را در بر می‌گیرند، همانند الگوریتم‌های فراکاوشی، ممکن است به جواب‌های بهتری ختم شوند. به دلیل مقارن بودن تابع نسبت به متغیرهای تصمیم آن، مقادیر بهینه این متغیرها مساوی یکدیگر بوده و فارق از بعد مسئله می‌باشند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مقدار بهینه مطلق این تابع در مقادیر صفر متغیر تصمیم اتفاق افتاده و معادل صفر است. رابطه تابع هدف و محدوده مجاز متغیرهای تصمیم به صورت زیر است

(۱۲)

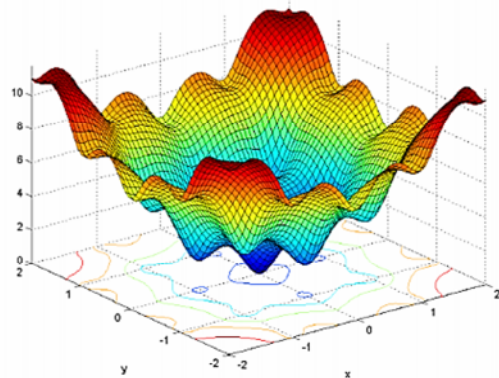
$$\text{Min } f(x) = 20 + e - 20 \exp \left[-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right] -$$

$$\exp \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i) \right]$$

$$-5 \leq x_i \leq 5 \quad (I = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$



شکل ۱- رویه تابع دو بعدی اکلی در محدوده ۳۰ و -۳۰



شکل ۲- رویه تابع دو بعدی اکلی در محدوده ۲ و -۲

با حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک، بهترین جواب حاصل به شکل زیر است [۲۰]

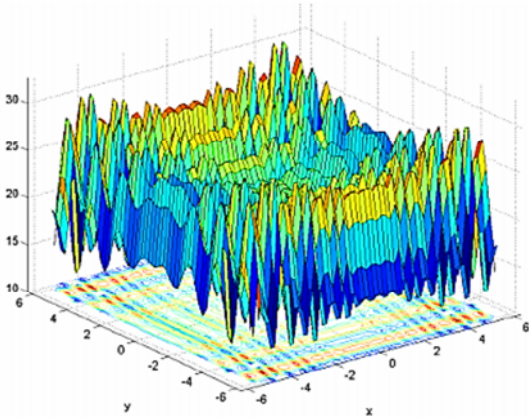
$$f(x_1^*, x_2^*) = -0.005456$$

این مسئله همچنین توسط الگوریتم جفت‌گیری زنبورهای عسل، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات در حالت دو بعدی و الگوریتم جامعه مورچگان در حالت ۱۰ بعدی نیز حل شده است [۲۱، ۲۲ و ۲۳].

تابع اکلی توسط الگوریتم CSS و CSS بهبود یافته حل شده است و پاسخ‌های بسیار نزدیکی به پژوهش حاضر داشته است [۱۷]. به دلیل دقت و سرعت بیشتر نرم‌افزار متلب در مقایسه با VBA، پاسخ‌ها کمی دقیق‌تر و در اجراهای کمتری نسبت به

$$-3 \leq x_1 \leq 12.1 \quad (15)$$

$$4.1 \leq x_2 \leq 5.8 \quad (16)$$



شکل ۳- رویه تابع سینوسی نامقید در محدوده ۵ و -۵

با حل مسئله توسط الگوریتم ژنتیک، بهترین جواب حاصل به شکل زیر است [۲۰]

$$f(11.6314, 5.734824) \quad n=38.818108$$

این مسئله همچنین توسط الگوریتم جفتگیری زنبورهای عسل، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات در حالت دوبعدی و الگوریتم جامعه مورچگان در حالت ۱۰ بعدی نیز حل شده است [۲۱، ۲۲ و ۲۳].

تابع سینوسی نامقید توسط الگوریتم CSS و CSS بهبود یافته، حل شده است و پاسخ‌های بسیار نزدیکی به مطالعه حاضر داشته

پژوهش حاضر به پاسخ صحیح رسیده است. همچنین نشان داده شده است که CSS بهبود یافته تأثیر خوبی در سرعت الگوریتم داشته است (در حدود ۱۰٪) [۱۷].

مقدار بهینه تابع هدف برای این مسئله توسط الگوریتم سیستم کاوش ذرات باردار، عدد ۱۶ - ۸/۹E در نقاط صفر و صفر پس از ۹۵۰ بار ارزیابی تابع هدف (۹۵ تکرار توسط ۱۰ ذره باردار) به دست آمده است که این عدد بهینه مطلق تابع بوده و هر ۱۰ اجرای الگوریتم در نهایت به این عدد همگرا شده‌اند. الگوریتم PSO به عنوان قدرتمندترین رقیب الگوریتم CSS، در ۵۰۰ بار ارزیابی تابع هدف به ۰/۰۰۰۰۰۰۲ می‌رسد و طبق مطالعات گزارش شده، قادر به دستیابی به تابع هدف‌های بهتری نبوده است.

جدول‌های ۱ و ۲ مقادیر نهایی و همگرا شده تابع هدف و تعداد ارزیابی تابع هدف را برای ۱۰ بار اجرای مجزای الگوریتم CSS در حل مسئله بهینه‌سازی تابع اگلی و بهترین نتیجه حاصل از الگوریتم CSS را در مقایسه با برخی دیگر از الگوریتم‌های فراکاوشی متداول نشان می‌دهد.

مثال بعد یک مسئله بیشینه‌سازی سینوسی نامقید با متغیرهای تصمیم پیوسته است. این تابع دارای دو متغیر تصمیم بوده و از مشخصات این تابع می‌توان به چند قله‌ای و تفکیک‌ناپذیر بودن آن اشاره نمود. شکل ۳، رویه این تابع را نشان می‌دهد. رابطه تابع هدف و محدوده مجاز متغیرهای تصمیم به صورت زیر است

$$\text{Max } f(x_1, x_2) = 21.5 + x_1 \sin(4\pi x_1) + x_2 \sin(4\pi x_2) \quad (14)$$

جدول ۱- مقادیر نهایی و همگرا شده تابع هدف و تعداد ارزیابی تابع هدف برای ۱۰ بار اجرای تابع اگلی

شماره اجرا										
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱۰۱۰	۹۵۰	۱۱۰۰	۱۰۸۰	۹۷۰	۱۰۰۰	۹۶۰	۱۰۶۰	۱۰۲۰	۹۸۰	تعداد ارزیابی‌های تابع هدف
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	مقدار تابع هدف

جدول ۲- عملکرد الگوریتم CSS در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها در حل تابع اگلی دو متغیره

الگوریتم CSS بهبود یافته	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم HBMO	الگوریتم PSO	الگوریتم CSS مطالعه حاضر	
۹۳۰	-	۱۷۴۰۰۰	۵۰۰	۹۵۰	کمترین تعداد ارزیابی‌های تابع هدف
۰	-۰/۰۰۵۴۵۶	-۰/۰۰۵۴۶۱۸	۰/۰۰۰۰۰۲	۰	مقدار تابع هدف

عملکرد مناسبی در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی در زمینه مدیریت منابع آب داشته باشد.

۲-۳- حل مسئله تخصیص بار آلاینده توسط الگوریتم CSS

در این پژوهش برای حل مدل تخصیص آلاینده ورودی با رویکرد TMDL از الگوریتم CSS استفاده شد. به این صورت که در ابتدا بارهای ورودی به صورت تصادفی از یک فضای پیوسته انتخاب شده سپس با اجرای مدل Q2K و تعیین کیفیت آب در نقاط کنترلی الگوریتم CSS اجرا شده و توابع هدف محاسبه و در هدف محاسبه و در تکرارهای متوالی به سمت بهترین پاسخ یعنی کمترین تابع هدف با حداکثر بار ورودی و تخطی صفر حرکت می‌کند.

در مدت اجرای الگوریتم تنها مقادیر مربوط به میزان آلاینده ورودی و به عبارتی خروجی واحدهای تخلیه کننده متغیر بوده و دیگر پارامترهای شبیه‌سازی ثابت هستند (شکل ۴).

از نکات قابل توجه در تدوین مدل این است که مدل بهینه‌ساز در محیط ویژوال بیسیک اکسل برنامه QUAL2K توسعه داده شده است. یعنی مدل بهینه‌ساز، اطلاعات مورد نیاز را از داخل مدل شبیه‌ساز استخراج می‌نماید و در نتیجه زمان محاسبات به اندازه قابل توجهی کاهش یافته است. متغیر تصمیم در این مسئله بار آلاینده ورودی به رودخانه در نقاط مختلف است. تابع هدف می‌تواند اهدافی از قبیل کاهش هزینه‌های تصفیه، رعایت شاخص و استانداردهای مشخص برای کاربری‌های مختلف و یا تصفیه و کنترل آلاینده‌های ویژه‌ای در رودخانه باشد. در پژوهش حاضر، به یافتن بهترین تخصیص آلاینده در مسیر رودخانه به طوری که مجموع بارهای ورودی حداکثر باشند و در هیچ یک از نقاط کنترلی

است [۱۷]. به دلیل دقت و سرعت بیشتر نرم‌افزار متلب در مقایسه با VBA پاسخ‌ها کمی دقیق‌تر و در اجراهای کمتری نسبت به مطالعه حاضر به پاسخ صحیح رسیده است. همچنین نشان داده شده است CSS بهبود یافته تأثیر خوبی در سرعت الگوریتم داشته است. (در حدود ۱۰ درصد) [۱۷].

مقدار بهینه تابع هدف برای این مسئله توسط الگوریتم سیستم کاوش ذرات باردار، عدد ۳۸/۸۵۰۲۹۴۴۸ در نقاط ۱۱/۶۲۵۵۴۴ و ۵/۷۲۵۰۴۴ پس از ۱۶۲۰ بار ارزیابی تابع هدف (۵۴ تکرار توسط ۳۰ ذره باردار) به دست آمده است که این عدد بهینه مطلق تابع بوده و هر ۱۰ اجرای الگوریتم در نهایت به این عدد همگرا شده‌اند.

جدول‌های ۳ و ۴ مقادیر نهایی و همگرا شده تابع هدف و تعداد ارزیابی تابع هدف را برای ۱۰ بار اجرای مجزای الگوریتم CSS در حل مسئله بهینه‌سازی تابع سینوسی نامقید و بهترین نتیجه حاصل از الگوریتم CSS را در مقایسه با برخی دیگر از الگوریتم‌های فراکاوشی متداول نشان می‌دهد.

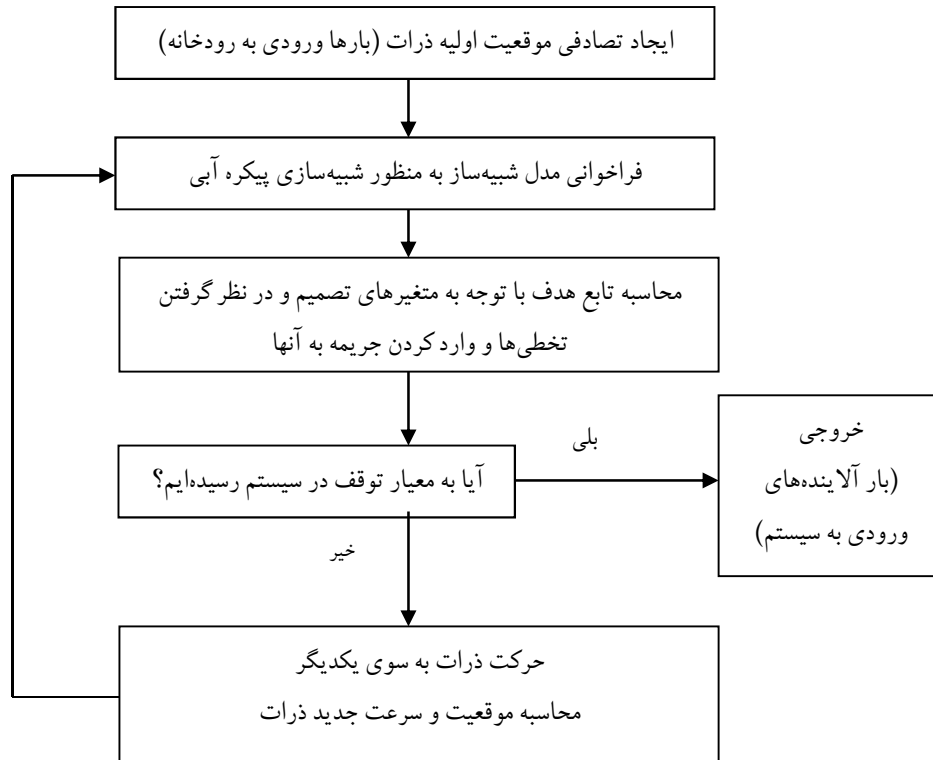
نتایج حاصل از حل دو تابع ریاضی بالا فوق به خوبی نشان می‌دهد که الگوریتم CSS، الگوریتمی با دقت و سرعت همگرایی بالا بوده و عملکرد مناسبی در حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده، تفکیک‌ناپذیر و چند قله‌ای نشان می‌دهد. همچنین نتایج به خوبی نشان دهنده این مطلب است که الگوریتم بهینه‌سازی CSS، در این مسائل دقیق‌تر و سریع‌تر از رقبای معروف خود، همچون الگوریتم ژنتیک، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان (ACO) و الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی زنبورهای عسل HBMO عمل می‌کند و به نظر می‌رسد

جدول ۳- مقادیر نهایی و همگرا شده تابع هدف و تعداد ارزیابی‌ها برای ۱۰ بار اجرای تابع سینوسی نامقید

شماره اجرا									
۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
۱۸۳۰	۱۷۲۰	۲۱۷۰	۱۸۹۰	۲۱۸۰	۲۳۶۰	۱۷۸۰	۱۶۲۰	۲۶۵۰	۱۹۵۰
تعداد ارزیابی‌های تابع هدف									
۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵	۳۸/۸۵
مقدار تابع هدف									

جدول ۴- عملکرد الگوریتم CSS در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها در حل تابع سینوسی نامقید

الگوریتم CSS بهبود یافته	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم HBO	الگوریتم PSO	الگوریتم CSS پژوهش حاضر
۱۵۹۰	-	۱۷۴۰۰۰	۱۵۰۰۰	۱۶۳۰
کمترین تعداد ارزیابی‌های تابع هدف				
۳۸/۸۵۰۲۹۴۴۸	۳۸/۸۵۰۲۹۴۴۸	۳۸/۸۵۰۲۹۴۴۶	۳۸/۸۵۰۲۹۳۹	۳۸/۸۵۰۲۹۴۴۸
مقدار تابع هدف				



شکل ۴- عملکرد کلی مدل شبیه‌ساز - بهینه‌ساز در حل مدل TMDL

در هر مرحله از اجرای الگوریتم در صورت وجود تخطی، ضریب جریمه‌ای به تابع هدف وارد می‌شود که اصطلاحاً به این تابع هدف، تابع جریمه شده می‌گویند. با چندین برابر کردن مجموع تخطی‌ها، مدل بهینه‌ساز سعی در هر چه کمتر کردن تخطی‌ها و در عین حال تغییر بارهای ورودی می‌نماید تا زودتر به جواب بهینه تابع هدف (که در اینجا صفر است) برسد.

$$\text{Minimize} \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_c} \text{Deviation}_i \text{ PC}}{\sum_{j=1}^{N_p} \text{Laod}_j} \right] \quad (19)$$

$$\text{If } DO_{\text{standard}} - DO_i > 0 \rightarrow \text{Deviation}_i = DO_{\text{standard}} - DO_i \quad (20)$$

$$\text{If } DO_{\text{standard}} - DO_i \leq 0 \rightarrow \text{Deviation}_i = 0$$

در رابطه ۱۹ PC، ضریب جریمه است که در این پژوهش با انجام یک سری تحلیل حساسیت‌ها بر روی مدل بهینه‌ساز عدد ۱۰۰ انتخاب شده است.

مدل بهینه‌ساز به منظور محاسبه تابع هدف مربوط به کیفیت رودخانه، نیازمند اطلاعات کیفی مربوط به هریک از نقاط کنترلی است. مدل شبیه‌ساز کیفی با توجه به بارهای ورودی انتخابی

تخطی از حد استاندارد وجود نداشته باشد، پرداخته شد. بدیهی است برای دستیابی به این هدف تابعی باید تعریف شود که همزمان با کاهش و در نهایت عدم وجود تخطی، بیشترین مجموع بارهای ورودی را به دست آورد که این تابع به صورت زیر است

$$\text{Minimize} \left[\frac{1}{\sum_{j=1}^{N_p} \text{Laod}_j} \right] \quad (17)$$

به گونه‌ای که

$$DO_i \geq DO_{\text{standard}} \quad (18)$$

که در این روابط

N_c تعداد نقاط کنترلی، N_p تعداد واحدهای تخلیه‌کننده، Deviation_i مقدار تخطی از میزان اکسیژن محلول در هر یک از نقاط کنترلی و Laod_j میزان بارهای آلاینده ورودی به رودخانه در هریک از نقاط است. مقدار اکسیژن محلول مجاز ۵ میلی‌گرم در لیتر است. نقاط کنترلی در وسط هر بازه و در سه نقطه بحرانی (باتوجه به نمودار اکسیژن محلول) در نظر گرفته شده است.

با شیب کناره‌های ۱:۱ با عرض‌ها و شیب‌های متفاوت در بازه‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. ۹ منبع بار آلاینده نقطه‌ای ناشی از cBOD که در ابتدای برخی بازه‌ها وارد می‌شوند، همانند جدول ۸ در نظر گرفته شد. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول ۵، می‌توان فهمید که کیفیت آب در سرشاخه در اثر آلودگی‌های بالادست بسیار پایین است؛ به طوری که میزان اکسیژن محلول کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر است. بنابراین برای استفاده از داده‌های این رودخانه برای مدل‌سازی و آزمون کارایی الگوریتم توسعه داده شده، باید مقادیر آلاینده‌ها در بالادست کاهش داده شود. این مطلب را این طور می‌توان بیان نمود که در رودخانه نیو ریور به منظور اعمال قوانین و رعایت حد استاندارد اکسیژن محلول و TMDL باید به

جدول ۵- مشخصات سر شاخه

پارامترهای سر شاخه	واحد	مقدار
دبی	m ³ /s	۳/۶۲۵
دما	°C	۳۰/۵۰
کدورت	Umhos	۵۷۸۶/۰۰
مواد معدنی جامد	mg/L	۴۶/۰۰
اکسیژن محلول	mg/L	۰/۶۶
CBODslow	mgO ₂ /L	۳۰/۰۰
CBODfast	mgO ₂ /L	۲۰/۰۰
نیتروژن آلی	ugN/L	۵۸۹۰/۰۰
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	۸۱۶۱/۰۰
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	۲۰۰/۰۰
فسفر آلی	ugP/L	۳۴۰۰/۰۰
فسفر معدنی	ugP/L	۵۱۶۰/۰۰
فیتوپلانکتون	ugA/L	۴/۰۰
قلیابیت	mgCaCO ₃ /L	۲۳۳/۰۰
pH	-	۷/۸۲

الگوریتم بهینه‌ساز اجرا می‌شود و اطلاعات کیفی مورد نظر را در اختیار مدل بهینه‌ساز قرار می‌دهد.

۳-۲-۱- مطالعه موردی

در این پژوهش از رودخانه نیو ریور^۱ برای مدل‌سازی و نشان دادن کارایی مدل بهینه‌ساز استفاده شد (شکل ۵). داده‌های مورد نیاز برای مدل‌سازی از گزارش ارائه شده توسط سازمان حفاظت از محیط زیست آمریکا^۲ و گروه کنترل کیفیت آب منطقه کالیفرنیا^۳ تهیه شد [۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷].

قسمتی از رودخانه به طول ۱۰۶/۶۳ کیلومتر که در محدوده اینترنشنال تا خروجی دریای سالتون قرار دارد، مدل‌سازی شد. داده‌های استفاده شده در این گزارش، از برنامه‌های کاربردی پیش‌نیو ریور و داده‌های کنترل آفت‌کش‌ها در نیو ریور استخراج شد. رودخانه برای شرایط بحرانی دمای آب ۳۰/۵ درجه سلسیوس در تابستان (ماه جولای) سال ۲۰۰۶ مدل شد و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های ماه ژوئن سال ۲۰۰۶ در شرایط دمای آب ۲۸/۵ درجه سلسیوس استفاده شد.

برای سادگی فرض شد هیچ جریانی ناشی از آب‌های زیرزمینی وارد سیستم نمی‌شود اما رواناب سطحی در محدوده‌های اطراف رودخانه تجمع شده و در قالب جریان‌های فرعی در قسمت‌هایی به رودخانه وارد می‌شود که در همین جریان، آلودگی‌های ناشی از زمین‌های کشاورزی اطراف رودخانه دیده شد.

رودخانه به ۳۳ بازه با طول‌های متفاوت تقسیم شد و هر بازه به المان‌های محاسباتی که طولی کمتر از ۲ کیلومتر دارند نیز تقسیم شد. تعداد سرشاخه‌ها و جریان‌های فرعی به ترتیب ۱ و ۸ عدد بود. پارامتر کیفی مورد مطالعه در این پژوهش کمبود اکسیژن نسبت به حالت اشباع^۴ است که در ۳۵ نقطه کنترلی در طول رودخانه چک شد. داده‌های مربوط به دبی و پارامترهای کیفیت آب در سرشاخه در جدول‌های ۵ و ۶ آورده شده است. سطح مقطع کانال دوزنقه‌ای

¹ New River

²United State Environmental Protection Agency(USEPA)

³California Regional Water Quality Control Board

⁴ Do Deficit



شکل ۵- شکل فرضی رودخانه در مدل

جدول ۶- مشخصات اصلاح شده سرشاخه

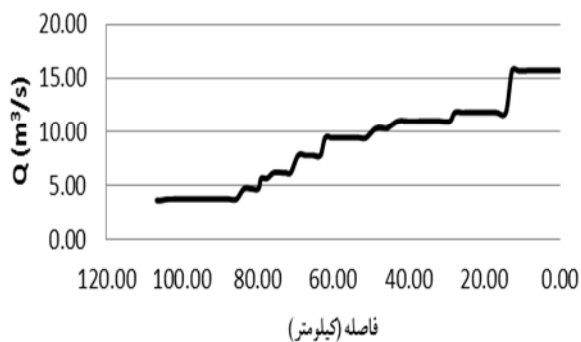
پارامترهای سرشاخه	واحد	مقدار
دبی	m ³ /s	۳/۶۲۵
دما	°C	۳۰/۵۰
کدورت	Umhos	۵۷۸۶/۰۰
مواد معدنی جامد	mg/L	۴۶/۰۰
اکسیژن محلول	mg/L	۵
CBODslow	mgO ₂ /L	۰/۰۰
CBODfast	mgO ₂ /L	۰/۰۰
نیتروژن آلی	ugN/L	۱۰۰۰/۰۰
NH ₄ -Nitrogen	ugN/L	۱۵۵۰/۰۰
NO ₃ -Nitrogen	ugN/L	۲۰۰/۰۰
فسفر آلی	ugP/L	۱۰۰۰/۰۰
فسفر معدنی	ugP/L	۱۰۰۰/۰۰
فیتوپلانکتون	ugA/L	۴/۰۰
قلیائیت	mgCaC O ₃ /L	۲۳۳/۰۰
pH	-	۷/۸۲

جدول ۷- مشخصات هیدرولیکی رودخانه

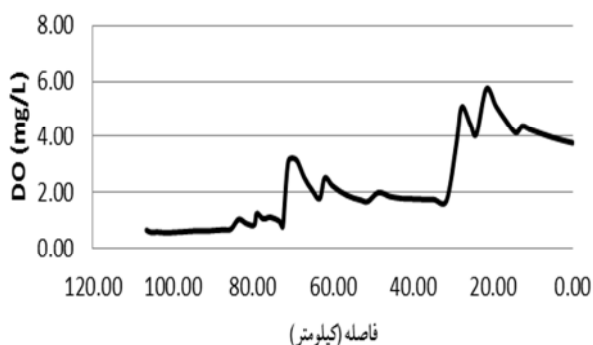
شماره بازه	عرض کانال	شیب کانال	شیب کناره	ضریب مانینگ	کیلومتر شروع	کیلومتر پایان
۱	۵/۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۰۶/۶۳	۱۰۵/۵۵
۲	۵/۰۷	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۰۵/۵۵	۱۰۳/۹
۳	۵/۲۰	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۰۳/۹	۱۰۰/۶۸
۴	۵/۳۳	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۰۰/۶۸	۹۷/۴۴
۵	۵/۴۴	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۹۷/۴۴	۹۴/۷۳
۶	۵/۵۶	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۹۴/۷۳	۹۱/۷۹
۷	۵/۷۴	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۹۱/۷۹	۸۷/۴۱
۸	۵/۸۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۸۷/۴۱	۸۵/۵۳
۹	۶/۰۶	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۸۵/۵۳	۷۹/۷۱
۱۰	۶/۰۸	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۹/۷۱	۷۹/۰۵
۱۱	۶/۱۳	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۹/۰۵	۷۷/۴۴
۱۲	۶/۲۰	۰/۰۰۰۳۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۷/۴۴	۷۵/۶۸
۱۳	۶/۲۹	۰/۰۰۰۳۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۵/۶۸	۷۳/۳۵
۱۴	۶/۳۳	۰/۰۰۰۳۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۳/۳۵	۷۲/۵۳
۱۵	۶/۳۸	۰/۰۰۰۳۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۲/۵۳	۷۱/۱۶
۱۶	۶/۷۰	۰/۰۰۰۳۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۷۱/۱۶	۶۳/۳
۱۷	۶/۷۵	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۶۳/۳	۶۲/۰۸
۱۸	۷/۰۵	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۶۲/۰۸	۵۴/۷۷
۱۹	۷/۲۰	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۵۴/۷۷	۵۱/۲۷
۲۰	۷/۴۱	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۵۱/۲۷	۴۶/۰۸
۲۱	۷/۴۳	۰/۰۰۰۴	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۴۶/۰۸	۴۵/۶۳
۲۲	۷/۸۸	۰/۰۰۰۴۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۴۵/۶۳	۳۴/۶۳
۲۳	۸/۰۰	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۳۴/۶۳	۳۱/۶
۲۴	۸/۴۸	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۳۱/۶	۲۹/۰۷
۲۵	۸/۷۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۲۹/۰۷	۲۷/۷۹
۲۶	۹/۱۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۲۷/۷۹	۲۵/۶۷
۲۷	۹/۴۲	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۲۵/۶۷	۲۴/۱۲
۲۸	۱۱/۲۹	۰/۰۰۰۳۵	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۲۴/۱۲	۱۴/۲۶
۲۹	۱۱/۶۰	۰/۰۰۰۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۴/۲۶	۱۲/۶۴
۳۰	۱۱/۹۳	۰/۰۰۰۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۲/۶۴	۱۰/۹۱
۳۱	۱۲/۷۶	۰/۰۰۰۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۱۰/۹۱	۶/۵۳
۳۲	۱۳/۰۹	۰/۰۰۰۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۶/۵۳	۴/۸
۳۳	۱۴/۰۰	۰/۰۰۰۳	۰/۲۴	۰/۰۴۵	۴/۸	۰

جدول ۸- مشخصات جریان‌های فرعی و آلاینده‌های ورودی به رودخانه

بار آلاینده‌های ورودی و جریان‌های فرعی	کیلومتر از	دبی (m^3/s)	دما (C^0)	DO (mg/L)	CBOD (mg/L)
Calexio_WWTP	۱۰۴/۹۳	۰/۱۱۱۶	۳۰/۸۳	۴/۰۷	۲۹/۹
Greeson(Drain	۸۴/۹۲	۰/۹۵۹	۲۹/۶۵	۴/۰۹	۲
Wormwood_Drain	۷۹/۱	۰/۹۵۹	۲۹/۶۵	۴/۰۹	۲
Fig_Drain	۷۷/۴۳	۰/۵۳۱۹	۲۸/۸۱	۴/۵۵	۲
Seeley_WWTP	۷۲/۵۱	۰/۰۰۵۷	۳۰	۱۰/۱	۳۰/۸
Bullhead_Slough	۷۱/۱۵	۱/۵۹۳	۲۹/۶۵	۷/۴۵	۲
SaltCreek_Slough	۶۳/۲۹	۱/۵۹۳	۲۹/۶۵	۷/۴۵	۲
CentinelaPrisonWWTP	۶۳/۲۹	۰/۰۲۶۳	۳۰	۵	۱۰
ElcentroWWTP	۶۲/۳۷	۰/۰۰۴۸	۳۰	۵	۶/۴
DateGardensMHP&McCabeSchools	۵۴/۷۵	۰/۰۰۰۵	۳۰	۴/۳	۸/۲
Rise_Drain	۵۱/۲۵	۰/۸۸۶۶	۲۹/۰۹	۷/۴۵	۲
N.Central_Drain	۴۵/۶۲	۰/۶۶۳۲	۲۹/۵۹	۱/۲۴	۲
Drop3_Drain	۲۹/۰۷	۰/۶۶۳۲	۲۹/۶۵	۴/۰۹	۲
Brawley_WWTP	۲۷/۸	۰/۱۶۶۵	۳۱/۷	۳/۴	۱۱/۲
Timothy2_Drain	۱۲/۶۵	۳/۹۰۰۹	۲۹/۲۸	۵/۷۸	۲
WestmorelandWWTP	۱۰/۰۸	۰/۰۰۷	۳۰	۴/۴	۲۴/۴



شکل ۶- نمودار دبی در شرایط پایه رودخانه و آلاینده‌های ورودی



شکل ۷- نمودار اکسیژن محلول در شرایط پایه رودخانه و آلاینده‌های ورودی

منابع بالادست توجه بیشتری نمود و ابتدا افزایش تصفیه و یا اعمال محدودیت‌های تخلیه آلاینده‌ها به رودخانه، در بالادست اعمال شود. بعد از کالیبراسیون مدل، درصد تصفیه‌هایی به مقادیر آلودگی در بالادست اعمال شد و با انجام اجراهای مختلفی مقادیر بهینه جدول ۶ برای محاسبه شد. لازم به ذکر است غلظت‌ها تا مرز تأمین شرایط اکسیژن محلول ۵ میلی‌گرم در لیتر که حد استاندارد در رودخانه است، کاهش داده شد. بهبود بیشتر شرایط کیفی سرشاخه فرض غیر واقعی را در مسئله ایجاد می‌نمود بنابراین حد مرزی اکسیژن محلول برای کاهش آلودگی در نظر گرفته شد. نتایج دبی و اکسیژن محلول بعد از کالیبراسیون در طول رودخانه در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. چون رودخانه در منطقه‌ای با شیب زیاد قرار دارد هوادهی خوبی صورت می‌گیرد. مطابق شکل ۶ دبی جریان از بالادست به سمت پایین دست در اثر وارد شدن جریان‌های فرعی افزایش می‌یابد. با توجه به داده‌ها، در سرشاخه، اکسیژن محلول ۰/۶۶ میلی‌گرم در لیتر است. با توجه به شکل ۷ در سه کیلومتر ابتدایی، اکسیژن محلول کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر است که نشان از وضعیت بسیار بد بالادست می‌دهد. در کیلومتر ۷۳/۳ رودخانه، یک صخره به عرض ۱۲ متر و ارتفاع ۲ متر در بستر رودخانه وجود دارد که اکسیژن دهی خوبی انجام می‌دهد و اکسیژن محلول تا حدود ۳ میلی‌گرم در لیتر افزایش می‌یابد. به دلیل ورود آلاینده‌ها در طول

جدول ۹- نتایج اجراهای متفاوت

شماره اجرا	TMDL (kg/day)
۱	۵۱۹۱۷/۲۳
۲	۴۹۵۶۴/۱۶
۳	۵۱۱۹۵/۲۷
۴	۵۱۶۴۴/۸۶
۵	۴۹۴۸۳/۱۲
۶	۴۹۷۲۵/۶۱
۷	۵۱۳۶۴/۸۱
۸	۵۰۲۸۷/۹۸
۹	۵۱۷۶۳/۸۲
۱۰	۴۹۹۶۱/۳۷
میانگین	۵۰۶۹۰/۸۵
انحراف معیار	۹۷۹/۱۷

جدول ۱۰- نتایج بهینه بارهای آلاینده ورودی مربوط به اجرای ۱

شرایط پایه	بار آلاینده‌های ورودی
۱	Calexio-WWTP
۲۲۶۲/۲۸	Seeley-WWTP
۱۸۲/۹۷	Eulhead-Sleugh
۳۲/۵۵	SahCreek-Slough
۶۱۳۵/۲۶	Centinela Prison WWTP
۱۹۰۰/۰۵	Elcentro WWTP
۱۹۶/۳	DateGardensMHP&McCabeSchools
۴۰۲۱۸/۸۱	Brawley-WWTP
۲۷۷۹/۱	Westmoreland-WWTP
۵۱۹۱۷/۲۳	TMDL (kg/day_

اهمیت‌اند و لزوماً استفاده از حداکثر ظرفیت رودخانه در یک بازه به معنای استفاده از ظرفیت کل رودخانه نیست بلکه تخصیص به‌صورتی باید انجام شود که بیشترین مجموع در کل مسیر مورد نظر رودخانه به‌دست آید.

برای اطمینان از صحت و کارایی الگوریتم توسعه یافته دو آزمون مختلف انجام شد. در آزمون اول نتایج ۱۰ اجرا مورد بررسی قرار گرفت تا دقت عملکرد الگوریتم در رسیدن به بهترین پاسخ ارزیابی شود. روشن است الگوریتم در صورت رسیدن به پاسخ‌های نزدیک به محدوده بهینه مورد قبول خواهد بود. مجموع حداکثر بارها در هر اجرا آورده شده است. در جدول ۱۰ پاسخ‌های بهینه برای بیشترین TMDL که همان اجرای شماره ۱ است آورده شده است. این تخصیص به‌عنوان بهینه‌ترین حالت ممکن می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری در مورد مجوز تخلیه آلاینده برای مدیران و برنامه‌ریزان حوزه مهندسی آب قرار گیرد که هدف اصلی انجام پژوهش‌هایی همانند پژوهش حاضر است.

داده‌های جدول ۹ نشان می‌دهد که اجراهای مختلف کمتر از ۵ درصد با یکدیگر اختلاف دارند و نیز انحراف معیار تقریباً ۱/۹ درصد میانگین پاسخ‌ها است که نشان از قابل قبول بودن پاسخ‌ها و کارایی الگوریتم توسعه یافته است. در صورتی که مدل به پاسخ‌هایی با انحراف معیار بیشتر از ۵ درصد برسد، نشان دهنده عدم همگرایی مناسب الگوریتم و عدم توانایی یافتن پاسخ‌هایی نزدیک به نقطه بهینه است.

در شکل ۸، میزان اکسیژن محلول در طول رودخانه با اعمال TMDL در شرایط پایه نشان داده شده است که عدم تخطی از میزان اکسیژن محلول را در طول رودخانه تأیید می‌نماید. مقدار تخطی که در ۱۰ کیلومتر ابتدای رودخانه مشاهده می‌شود ناشی از بار آلاینده‌های ورودی نیست و دلیل آن شرایط هیدرولوژیکی رودخانه و شرایط بالادست رودخانه است که نیازمند بازبینی و کاهش آلاینده‌ها در بالادست محدوده در نظر گرفته شده در این پژوهش است. الگوریتم بهینه‌ساز توسعه داده شده، مقدار بار آلاینده ۱ کیلوگرم در روز که مقدار بسیار کمی است را در ۱۰۴/۹۳ کیلومتر ۱۰۴ در نظر گرفته است که تأثیر چندانی در اکسیژن محلول در این محدوده ندارد.

آزمون دیگری نیز که برای حصول اطمینان از کارایی صحیح الگوریتم توسعه یافته می‌توان انجام داد این است که اثبات شود پاسخ به‌دست آمده، بهینه است. به این معنی که در صورت افزایش بار ورودی حتی به مقدار اندک حداقل در یک نقطه، شرایط مورد نظر نقض شده است، به‌عنوان مثال حداقل در یک نقطه تخطی از مقدار اکسیژن محلول به‌وجود بیاید. این آزمون این‌طور انجام شد

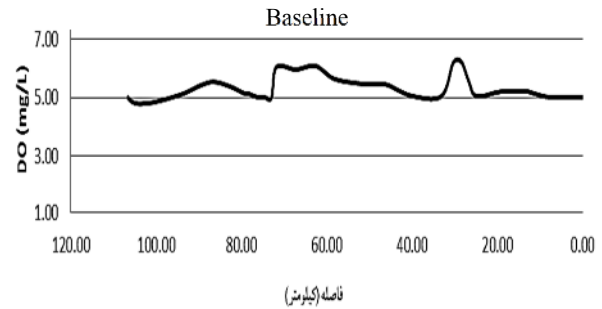
رودخانه، اکسیژن محلول تا کیلومتر ۳۱/۶ کاهش می‌یابد اما با وجود سه آبشار در کیلومترهای ۳۱/۶ و ۲۹ و ۲۴/۱ هوادهی خوبی صورت می‌گیرد و اکسیژن محلول افزایش پیدا می‌کند. مشخصات آبشارها در کیلومتر ۳۱/۶، عرض ۱۶ متر و ارتفاع ۳ متر، در کیلومتر ۲۹، عرض ۱۶ متر و ارتفاع ۲ متر و در کیلومتر ۲۴/۱، عرض ۱۸ متر و ارتفاع ۲ متر می‌باشند. برنامه QUAL2K امکان مدل‌سازی آبشارها را در مشخصات المان‌ها دارا است. پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، مدل شبیه‌ساز-بهینه‌سازی توسعه داده شده، اجرا شد.

همانطور که پیشتر اشاره شد، مدل بهینه‌ساز از رویکرد TMDL برای تخصیص بهترین بار آلاینده در سراسر رودخانه استفاده می‌کند به نحوی که استانداردهای کیفیت آب در تمام نقاط رعایت شده باشند. به این مفهوم که در این مدل مجموع بارهای اعمالی حائز

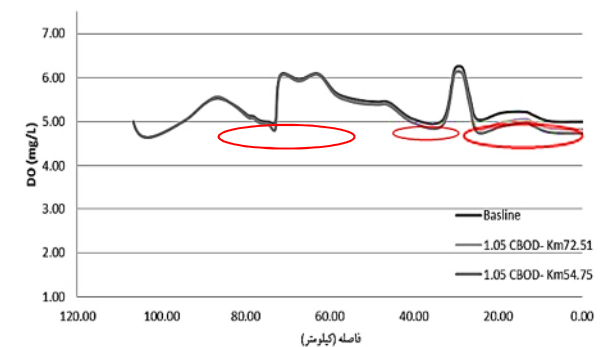
اکسیژن محلول از ۵ میلی‌گرم در لیتر کمتر خواهد شد و این نشان می‌دهد که TMDL تخصیص یافته بیشترین مجموع بار ورودی است و افزایش کمی در این میزان، موجب ایجاد تخطی در رودخانه می‌شود. در شکل ۹ روند تغییرات اکسیژن محلول در شرایط پایه و در دو حالت افزایش بار نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به توسعه مدل تخصیص بار آلاینده با رویکرد TMDL به نحوی که سازمان‌های مربوطه بتوانند مجوزهای تخلیه را با استفاده از آن صادر نمایند، پرداخته شد. مدل بهینه‌ساز از رویکرد مجموع بهینه‌ساز بار آلاینده که روزانه می‌تواند وارد رودخانه شود برای تخمین آلاینده‌های ورودی استفاده می‌نماید. برای حل این مدل از الگوریتم بهینه‌سازی کاوش سیستم ذرات باردار استفاده شد. کارایی این الگوریتم در حل مسائل پیچیده ریاضی و مقایسه آن با سایر الگوریتم‌ها، نشان دهنده برتری و سرعت این الگوریتم است. نمودار اکسیژن محلول ارائه شده تحت TMDL محاسباتی الگوریتم بهینه‌سازی به خوبی نشان می‌دهد که از ظرفیت رودخانه استفاده شده است و در هیچ نقطه‌ای تخطی از اکسیژن محلول وجود ندارد. بنابراین تخصیص آلاینده به این روش می‌تواند مبنای کار مدیران و برنامه‌ریزان قرار گیرد. با توجه به اینکه مسائل مهندسی آب غالباً پیچیده و توابع هدف چندگانه دارند، سرعت الگوریتم مذکور کمک شایان توجهی در بهتر و سریع‌تر حل شدن این مسائل خواهد داشت.



شکل ۸- نمودار TMDL اکسیژن محلول



شکل ۹- نمودار تغییرات اکسیژن محلول در اثر افزایش بار ورودی در کیلومتر ۷۲/۵۱ و ۵۴/۷۵

که در کیلومتر ۷۲/۵۱ و ۵۴/۷۵ (که به‌طور اتفاقی انتخاب شده‌اند) به‌طور جداگانه، به میزان ۵ درصد بار ورودی افزایش داده شد. مشاهده شد که با این تغییر اندک در نقاط پایین دست میزان

۵- مراجع

1. Burn, D.H., and McBean, E.H. (1985). "Optimisation modeling of water quality in an un certain environment." *J. of Water Resource Res.*, 21 (7), 1985, 934-940.
2. Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resource systems planning and analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
3. Thomann, R.V. (1972). *System analysis for water quality management*, McGraw- Hill Inc., New York.
4. Loucks, D.P., Revelle, C.S., and Lynn, W.R. (1967), "Linear programming model for water pollution control." *Mgmt. Sci.*, 14(4), 166-181.
5. Dorfman, R., Jacoby, H.D., and Tomas, H.A. Jr. (1975). *Models for managing regional water quality*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
6. Cardwell, H., and Ellis, J.H. (1993), "Stochastic dynamic programming models for water quality management." *Water Resource Res.*, 29(4), 803-813.
7. Hsieh, C. D., and Yang, W. F. (2006). "Study of total maximum daily load and non-point source pollution control strategies for reservoir watershed." *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 10(3), 134-143.

8. Borah, D. K., Yagow, G., Saleh, A., Barnes, P. L., Rosenthal, W., Krug, E. C., and Hauck, L. M. (2006), "Sediment and nutrient modeling for TMDL development and implementation." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49(4), 967-986.
9. Zhijun Liu, Janna M., Kieffer, William L. Kingery, David H. Huddleston, and Faisal Hossain. (2007). "Watershed modeling of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand using a hydrological simulation Fortran program." *J. of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 42, 2023-2032.
10. Karamouz, M., and Baghvand, A., and Taherian, M. (2009). "Evaluation of total maximum daily load of nutrition in basin to reservoir." *The 3rd Conference and Exhibition on Environmental Engineering*, Tehran, Iran.
11. Chen, H.W., and Chang, N.B. (1998), "Water pollution control in the river basin by fuzzy genetic algorithm-based multi objective programming modeling." *Water Sci. and Technol.*, 37(3), 55-63.
12. Saadatpour, M., and Afshar, A. (2005). "Fuzzy waste load allocation ; Simulation-optimization model." MSc Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
13. Hoseinzadeh, H., Afshar, A., and Sharifi, F. (2010). "Multi objective waste load allocation using multicolony ant algorithm." *Iran Water Resource Research*, 6 (2), 10-13.
14. Kaveh, A., and Talatahari, S. (2010). "A novel heuristic optimization method: Charged system search." *Acta Mechanica*, 213 (3/4), 267-289.
15. Kaveh, A., and Talatahari, S. (2010 c). "Charged system search for optimum grillage systems design using the LRFD -AISC code." *J. of Constructional Steel Research*, 66 (6), 767-771.
16. Kaveh, A., and Talatahari, S. (2010d). "Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm." *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41 (6), 893-911.
17. Asadie, B., and Afshar, A. (2012). "Multi-objective design and operation of cyclic storage systems using multi-objective charged system search algorithm" MSc Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (In Persian)
18. Kaveh, A., and Talatahari, S. (2010 b). "A charged system search with a fly to boundary method for discrete optimum design of truss structures." *Asian Journal of Civil Engineering*, 11 (3), 277-293.
19. Kaveh, A., and Talatahari, S. (2011). " An enhanced charged system search for configuration optimization using the concept of fields of forces." *Struct. Multi Discip optim.*, 43(3), 339 -351.
20. Gen, M., and Cheng, R.W. (1997). *Genetic algorithms and engineering design*, John Wiley and Sons, Inc., NY.
21. Bozorghdad, O. (2005). "Design-operation of multi-hydropower reservoirs: HBMO approach." PhD. Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (In Persian)
22. Meraji, H. (2006). "Optimal design of flood storage system using particle swarm optimization algorithm." PhD. Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
23. Jalali, M.R. (2005). "Design and optimal operation of hydro systems with Ant algorithm, a novel meta heuristic approach." PhD. Thesis, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
24. Colorado River Basin RWQCB. (2006). "Draft 9-11-06. TMDL and implementation plan for dissolved oxygen in the New River." Imperial County, California.
25. Annual Project Report. (2006). imperial irrigation district's revised drain water quality improvement plan. <<http://iid.com/homsshowdocumentid=385>>>, (Dec. 2006).
26. National Hydrography Dataset (NHD). (2015). <<http://nhd.usgs.gov/>>
27. Setmire, J.G. (1984). *Water quality conditions in the New River*, USGS Report,