

بهینه‌سازی بهره‌برداری چندهدفه کمی - کیفی از مخزن در شرایط بروز آلاینده ناگهانی نفتی MTBE

اشکان شکری^{۱*} و امید بزرگ حداد^۲

چکیده

آلودگی‌های مخزن‌ها، می‌توانند به‌صورت ناگهانی با عوامل انسان‌ساخت عمدی و غیرعمدی یا عوامل طبیعی وارد مخزن‌ها شده و باعث ایجاد بحران شوند. اما با وجود آسیب‌های ناشی از ورود آلودگی ناگهانی، تاکنون توجه کمی به این‌گونه اتفاقات شده است. آسیب‌های ناشی از ورود آلودگی به مخزن‌ها، به دو صورت می‌تواند سامانه منابع آب را تحت تأثیر قرار دهد: (۱) آسیب‌هایی که به سبب عدم استفاده از آب به مصرف‌کنندگان وارد می‌شود و (۲) آسیب‌هایی که به سبب استفاده از آب آلوده گریبان‌گیر مصرف‌کنندگان می‌شود. این دو آسیب در مقابل یکدیگر قرار گرفته‌اند. به همین دلیل انجام مدیریت صحیح ضروری است. پس در این پژوهش، راهکارهای مدیریت بحران ایجاد شده از ورود ۳۰ مترمکعب آلودگی MTBE به‌صورت ناگهانی به مخزن سد کرج بررسی می‌شود. بدین منظور مدل بسط داده شده بر مبنای مدل CE-QUAL-W2 به نحوی توسعه داده شده است که توانایی شبیه‌سازی MTBE را داشته باشد. همچنین برای یافتن تصمیم‌های بهینه، از الگوریتم تلفیقی بهینه‌سازی دو هدفه NSGAII-ALANN، استفاده شده است. پس از حل مسئله به‌عنوان مثال، اگر آلودگی در ابتدای تابستان وارد مخزن شود، با استفاده از یکی از سیاست‌های بهینه استخراج شده، با ۳۶٪ کاهش میزان برآورده ساختن نیاز، در کل آلودگی خروجی ۶۰٪ و بیشترین غلظت خروجی ۷۶٪ کاهش ایجاد شد. همچنین این نتایج برای فصل زمستان به‌ترتیب ۳۸٪، ۵۱٪ و ۶۷٪ هستند. در فصل‌های دیگر نیز نتایج مشابه به دست آمده‌اند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم تلفیقی NSGAII-ALANN، بحران کیفیت آب، بهره‌برداری از مخزن، بهینه‌سازی چندهدفه، شبیه‌سازی MTBE.

ارجاع: شکری ا. و بزرگ حداد ا. ۱۳۹۳. بهینه‌سازی بهره‌برداری چندهدفه کمی- کیفی از مخزن در شرایط بروز آلاینده ناگهانی نفتی MTBE. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۶۵-۱۷۳.

۱- دانشجوی دکتری گروه سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فن‌آوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

* نویسنده مسئول: Shokri@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۵/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۰۶

مقدمه

امروزه همواره پایش و بررسی آلودگی‌ها در مخزن‌ها، همچنین شناخت سامانه مخزن‌ها برای مقابله با آلودگی‌ها ضروری است. این شناخت، شامل مقدار و نوع آلودگی ورودی و همچنین نحوه عکس‌العمل سامانه به انواع تصمیم‌های گرفته شده است. برای تشخیص عکس‌العمل احتمالی سامانه به تصمیم‌های گوناگون، استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز به‌عنوان قسمتی از سامانه‌های پشتیبان تصمیم‌گیری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از انواع آلودگی‌های قابل ورود به مخزن‌ها سطحی، آلودگی‌های ناگهانی هستند که به طور عموم به‌صورت نقطه‌ای وارد مخزن‌ها می‌شوند و ممکن است به طور مستقیم وارد مخزن‌ها شده یا با رودخانه‌های منتهی به مخزن از فاصله‌ای دورتر حمل شده و وارد مخزن شوند. این آلودگی‌ها می‌توانند در اثر واژگون شدن حامل‌های مواد سمی، نشت‌های ناگهانی، حملات تروریستی یا مواردی از این قبیل پدید آیند و همین امر می‌تواند باعث آسیب رساندن به محیط‌زیست پایین‌دست سدها شده و امر آبرسانی به مصارف مختلف را مختل کرده و باعث بروز زیان‌های سنگین شود. به همین دلیل برای این که کمترین آسیب به سامانه برسد باید سریع اقدامات لازم جهت تخلیه و کنترل آلودگی وارد شده انجام شود. یکی از این اقدامات، تعیین سیاست بهره‌برداری بهینه است. در این راستا همواره، دو هدف (که ممکن است لزوماً هم‌جهت نباشند) در پیش روی تصمیم‌گیرندگان قرار دارد. یکی کمیت تأمین آب برای نیازهای تعریف شده و دیگری کیفیت آب تأمین شده است. بدیهی است که ارزش این دو هدف در طول زمان نه فقط برابر نیست بلکه مقدار ثابتی نیز به خود نمی‌گیرد. به این معنی که گاهی هدف تأمین کیفیت آب مهم‌تر و گاهی هدف تأمین کمیت با ارزش‌تر می‌شود. بدین منظور روندیابی صحیح و دقیق آلودگی در مخزن و استخراج مقادیر بهره‌برداری کوتاه‌مدت با ابزار تصمیم‌گیری چند معیاره ضروری خواهد بود تا بتوان مدیریت مناسب کمی-کیفی آب مخزن را در شرایط مختلف انجام داد. بدین منظور، استفاده از مدل شبیه‌سازی و الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه مناسب ضروری است.

یکی از اولین مطالعات در زمینه بهره‌برداری کمی-کیفی، توسط فونتانو و همکاران (۱۹۸۱) انجام شد. آن‌ها با تلفیق

مدل‌های شبیه‌سازی کیفی و روش برنامه‌ریزی پویا^۱ (DP)، مدل بهره‌برداری کمی-کیفی از مخزن‌ها سدها را توسعه دادند. لفتیز و همکاران (۱۹۸۵) بهره‌برداری کمی-کیفی قطعی از سامانه‌های چند مخزنه را مطالعه کردند. دندی و کروالی (۱۹۹۲) یک قاعده بهره‌برداری برای تأمین نیاز آبی با در نظر گرفتن کیفیت را توسعه دادند. کراچیان و کارآموز (۲۰۰۶) یک مدل شبیه‌سازی کیفیت آب و یک روش حل اختلاف تصادفی براساس تئوری نش را برای استخراج قاعده بهره‌برداری بهینه استفاده کردند. همچنین کراچیان و کارآموز (۲۰۰۷) قاعده بهره‌برداری بهینه در راستای مدیریت کیفیت آب در سامانه مخزن-رودخانه را توسعه دادند.

شیررنگی و همکاران (۲۰۰۷) با تلفیق یک مدل تکاملی چندهدفه و مدل شبیه‌سازی کیفیت یک بعدی به بهینه‌سازی چندهدفه پرداختند. حکیمی و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از روشی با نام الگوریتم ژنتیک خودآموزگار^۲ (SLGA) و بهینه‌سازی چندهدفه با سه هدف تأمین آب، تولید انرژی برقی و تأمین کیفیت برای سامانه سه مخزنه کارون-دز با هدف‌ها تأمین نیاز و تولید انرژی برقی، قاعده بهره‌برداری را استخراج کردند و نتیجه گرفتند که برای مسئله مذکور عملکرد روش SLGA نسبت به ویرایش قبلی آن که بر مبنای نقشه خود سازمانده^۳ (SOM) توسعه داده شده بود عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد.

حمزه (۱۳۸۹) با شبیه‌سازی آلودگی بیولوژیکی ناگهانی وارد شده به مخزن و با در نظر گرفتن عامل‌های دخیل بر چگونگی پخشیدگی^۴، جابجایی^۵ و زوال^۶ کلیفرم در سناریوهای محتمل، عدم وابستگی دو عامل رهاسازی از مخزن و میزان آلودگی خارج شده از مخزن و همچنین تأثیر برداشت آب از لایه‌های مختلف مخزن در شرایط وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن را نتیجه‌گیری کرد.

بیگی (۱۳۸۹) پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل شبیه‌ساز کیفیت CE-QUAL-W2 از مدل حل اختلاف توسعه داده شده استفاده کرد و بهره‌برداری و تخصیص آب در شرایط بروز آلاینده ناگهانی و بیوتروریستی را بهینه

1- Dynamic Programming

2- Self Learning Genetic Algorithm

3- Self-Organizing Map

4- Diffusion

5- Advection

6- Decay

که در معادله فوق، Φ_s غلظت آلاینده در حالت اشباع در آب، Φ_t غلظت آلاینده در سطح آب در زمان t ، h ضخامت لایه سطحی و k_{OL} سرعت انتقال^۱ کل هستند. ویژگی‌های هر دو فاز مایع و گاز و ضریب‌های پخشودگی و سرعت انتقال در هر دو فاز مهم است. ولی به طور کلی، در مورد آلاینده‌های خانواده VOC ویژگی‌های فاز مایع تأثیر بیشتری دارد. جدول ۱ پارامترهای لازم برای محاسبه سرعت انتقال کل را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- معادلات لازم برای محاسبه سرعت انتقال کل

رابطه	سال	ارایه کننده
$D_L = \frac{7.48 \times 10^{-8} \sqrt{2.26 M_{H_2O} T_w}}{\mu V_m^{0.6}}$	۱۹۷۴	هایدوک و لاودیه
$k_{OL}^{-1} = k_L^{-1} + RT_w H^{-1} k_G^{-1}$	۲۰۰۰	رائیون
$k_G = \left(\frac{D_a(VOC)}{D_a(H_2O)} \right) (0.15 U_w)$	۲۰۰۳	بندر و همکاران
$\left(\frac{D_a(VOC)}{D_a(H_2O)} \right) = \sqrt{\frac{M_{H_2O}}{M_{VOC}}} \left(\frac{T_a}{293.16} \right)^{3/2}$	۲۰۰۳	بندر و همکاران
$K_L = 0.45 \sqrt{\frac{600 D_L U_w^{1.64}}{\nu}}$	۲۰۰۳	بندر و همکاران

در این جدول، k_{OL} سرعت انتقال کل بر حسب متر بر ثانیه، k_L سرعت انتقال برای فاز مایع بر حسب متر بر ثانیه، k_G سرعت انتقال هوا بر حسب متر بر ثانیه، R ثابت جهانی گازها برابر با، $8.2 \times 10^{-5} (atm.m^3.mol^{-1})$ ، T_w دمای آب بر حسب کلون، H ضریب هنری مربوط به نوع آلاینده بر حسب $(atm.m^3.mol^{-1})$ ، U_w سرعت وزش باد بر حسب متر بر ثانیه، $D_a(H_2O)$ و $D_a(VOC)$ به ترتیب ضریب پخش^۲ آب و بخار VOC، M_{H_2O} و M_{VOC} به ترتیب وزن مولکولی آب و VOC است، T_a درجه حرارت هوا بر حسب کلون، ν لزجت سینماتیک آب بر حسب سانتی‌مترمربع بر ثانیه، D_L ضریب پخشودگی مولکولی برای VOC در آب بر حسب سانتی‌مترمربع بر ثانیه،

کلیفرم، به عنوان مطالعه موردی استفاده کرد. هدف از این پژوهش استخراج قاعده بهره‌برداری بهینه در شرایط بروز آلاینده ناگهانی با هدف‌های کمی- کیفی با رویکرد چندهدفه است. بدین منظور از سد کرج و ورود ناگهانی آلاینده MTBE به عنوان مورد مطالعاتی استفاده شده است. در همین راستا قصد بر آن است که با توسعه مدل شبیه‌سازی آلاینده‌هایی مانند MTBE بر پایه مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 و استفاده از یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه (NSGAII-ANN)، مقادیر بهره‌برداری از مخزن در شرایط بروز آلاینده ناگهانی با هدف‌های کمی- کیفی استخراج شود.

مواد و روش‌ها

شبیه‌سازی MTBE در مخزن

مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی انتقال آلودگی در آب‌های سطحی وجود دارد. اما در این بین مدل مناسبی برای شبیه‌سازی آلودگی MTBE موجود نیست به همین دلیل در این پژوهش برای شبیه‌سازی آلودگی MTBE در مخزن، مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 توسعه داده شده است. این شبیه‌ساز برای شبیه‌سازی آلودگی‌های دلخواه فقط ترم‌های زوال مرتبه اول، ته‌نشینی، انتقال و انتشار را پشتیبانی می‌کند. این در حالی است که تبخیر یکی از مهم‌ترین عامل‌های حذف آلاینده MTBE از سطح آب مخزن‌ها است. پس در این پژوهش با استفاده از تئوری پخش دو لایه (لوئیس و ویتمن، ۱۹۲۴) که توسط هیلد و همکاران (۲۰۰۵) برای شبیه‌سازی تبخیر آلاینده‌های فرار مانند MTBE از مخزن‌ها استفاده شده است، مدل CE-QUAL-W2 به صورتی توسعه داده شد که برای آلاینده انتخابی، علاوه بر ترم‌های ذکر شده، از تبخیر نیز پشتیبانی کند. مقدار تغییرات MTBE در اثر تبخیر در واحد زمان $(d\Phi/dt)$ براساس معادله ۱ محاسبه می‌شود.

$$(d\Phi/dt) = k_{OL}(\Phi_s - \Phi_t)/h \quad (۱)$$

سد قشلاق سنج، در اثر حادثه به داخل مخزن سد کرج سقوط کند. محل ورود آلودگی دورترین فاصله مخزن تا بدنه سد در نظر گرفته شده است. که این فاصله در زمان‌های مختلف متفاوت است. با توجه به دسترسی داده‌های موجود اعم از داده‌های آب‌سنجی و هواشناسی در سال ۱۳۸۵ و نیز هماهنگی آمار این سال با متوسط بلندمدت، اطلاعات شبیه‌سازی و بهینه‌سازی‌های انجام شده در این سال انجام شده است.

عمده خسارت‌های ناشی از چنین حادثه‌ای را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: دسته اول، خسارت‌های ناشی از عدم توانایی تأمین آب است به این مفهوم که به دلیل بی‌کیفیت بودن آب مخزن، نیاز مصرف‌کننده تأمین نمی‌شود. این دسته از خسارت‌های جنبه کمی دارند. دسته دوم از خسارت‌های وارده، خسارت‌هایی هستند که از نظر بدبودن کیفیت آب خارج شده از سد ایجاد می‌شود. این خسارت‌های می‌توانند، خسارت‌های وارده به مصرف‌کنندگان در اثر مصرف آب آلوده باشد که در بخش‌های شرب، کشاورزی و محیط‌زیست تأثیرات نامطلوب خواهند داشت. پس از دو تابع هدف برای حل این مسئله استفاده می‌شود. تابع هدف اول از نوع کمی و دیگری تابع هدف کیفی هستند.

مدل بهینه‌سازی

برای حل مسائل بهینه‌سازی، لازم است مسئله به یک مدل بهینه‌سازی توسط رابطه‌های ریاضی تبدیل شود. پس از تولید این مدل، می‌توان آن را با الگوریتم‌های مختلف حل کرد و متغیرهای تصمیم بهینه را استخراج کرد. مسئله تعریف شده در این بخش نیز برای حل با بهینه‌سازها باید به فرم ریاضی تبدیل شود. معادله‌های ۲ تا ۹ مدل بهینه‌سازی متناظر با این مسئله را نمایش می‌دهند.

$$\text{Min: } f_1(X, Y) = a \sum_{i=1}^K \left(\frac{X_i - De_i}{X_i} \right)^2 \quad (2)$$

$$+ (1-a) \left(\frac{S_{\max} - S_L}{S_{\max}} \right) \quad (3)$$

$$\text{Min: } f_2(X, Y) = \sum_{j=1}^m M_j^2$$

$$M_j = h(X, Y), j = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$S_{j+1} = S_j + Q_j - X'_j - Y'_j - Sp_j, j = 1, \dots, m \quad (5)$$

μ لزجت آب بر حسب سانتی‌پویز و V_m حجم مولار VOC است که با تقسیم وزن مولی بر چگالی VOC مورد نظر به دست می‌آید که برای MTBE برابر ۱۱۹ $\text{cm}^{-1} \text{mol}^{-1}$ است.

توسعه الگوریتم بهینه‌سازی - شبیه‌سازی NSGAI-ANN انجام بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه برای مسائل مهندسی که دارای شبیه‌سازی‌های زمان‌بر هستند، زمان زیادی لازم دارد. این امر باعث می‌شود که استفاده از این بهینه‌سازها با مشکلاتی همراه باشد. لذا در این پژوهش از ترکیب الگوریتم تکاملی چندهدفه NSGAI^۱ (دب، ۲۰۰۲) با شبکه عصبی مصنوعی^۲ ANN الگوریتم NSGAI-ANN توسعه داده شد و از این الگوریتم برای افزایش سرعت بهینه‌سازی تکاملی برای مسئله حاضر استفاده شده است. با استفاده از این الگوریتم در حین بهینه‌سازی، ANN در نقاط مورد نیاز و پرکاربرد بیشتر آموزش داده می‌شود و بعد از آموزش کافی برای جواب‌هایی که دقت شبیه‌سازی با ANN مناسب بود، به جای شبیه‌ساز زمان‌بر از آن استفاده خواهد شد.

مطالعه موردی

همان‌طور که ذکر شد در این پژوهش از سد کرج، بر روی رودخانه کرج، به‌عنوان مورد مطالعاتی استفاده شده است. این رودخانه در محل ورودی سد به طور متوسط سالانه ۴۰۰ میلیون مترمکعب رواناب دارد. همچنین پارامترهای مربوط به تبخیر MTBE که در این پژوهش استفاده شده‌اند در جدول ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۲- پارامترهای شبیه‌سازی تبخیر و زوال MTBE (هیلد و همکاران، ۲۰۰۵)

پارامتر	مقدار (واحد)
M_{VOC}	88.15 (gr)
V_m	119 ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{mol}^{-1}$)
K_1	$2 \times 10^{-3} (\text{day}^{-1})$
H	$4 \times 10^{-4} (\text{atm} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1})$

که در این جدول، V_m حجم مولار و K_1 ضریب زوال مرتبه اول MTBE است.

مسئله‌ای که در این پژوهش بحث قرار خواهد شد، به این شرح است: فرض می‌شود که کامیونی به حجم ۳۰ متر مکعب حامل ماده آلاینده MTBE (مانند اتفاق رخ داده در

1- Non Dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA)

2- Artificial Neural Network (ANN)

نتایج و بحث

پس از تعریف مسئله، واسنجی مدل شبیه‌ساز انتقال آلودگی و طراحی مدل ریاضی بهینه‌سازی، مسئله مورد نظر باید با الگوریتم تلفیقی NSGAI-ANN حل شود. از آنجایی که شرایط مخزن از جمله حجم آب موجود، نیازها، آورد آب و شاخص‌های هواشناسی، در طول سال متغیر هستند و از طرفی این شاخص‌ها تأثیر زیادی بر روی رفتار آلودگی در مخزن دارد، پس برای بررسی انواع این حالت‌ها، حادثه ورود آلودگی MTBE به داخل مخزن، طی چهار سناریو در اول هر فصل بررسی شد. به این ترتیب فقط چهار حالت از ترکیبات پارامترهای ذکر شده در مخزن ارزیابی خواهد شد. این سناریوهای مختلف که وقوع آلودگی در ابتدای هر فصل هستند، از بهار تا زمستان به ترتیب S1 تا S4 نامگذاری می‌شوند. در سناریو اول اختلاف بین حجم آورد و مجموع نیاز در طول دوره برابر ۱۳۲ میلیون مترمکعب است. این در حالی است که فقط ۱۰۷ میلیون مترمکعب در ابتدای این دوره از ظرفیت ذخیره‌سازی باقیمانده است. به همین دلیل در طول این دوره ۲۵ میلیون مترمکعب آب مازاد وجود دارد که پس از پر شدن مخزن سرریز خواهد شد. علاوه بر زمان وقوع آلودگی، برای ضریب وزنی a که در تابع هدف کمی به کار برده شد مقدار مختلف ۰/۷۵، ۰/۵۰ و ۰/۲۵٪ در نظر گرفته شده است. این حالت‌ها در این پژوهش به ترتیب با نام‌های ۷۵، ۵۰ و ۲۵ نام‌گذاری شده‌اند. در نهایت مسئله مورد نظر برای چهار سناریو و هر سناریو سه حالت که در مجموع ۱۲ حالت را تشکیل می‌دهد، حل شده است.

پرتوهای استخراج شده برای حالت‌های مختلف، حاوی مجموعه تصمیم‌های بهینه زیادی هستند که بنا به شرایط موجود می‌توان هر یک از آن‌ها را انتخاب کرد. برای مثال در این پرتوها نقطه انتهای بالا سمت چپ، مربوط به تصمیم‌هایی است که کمترین اهمیت را برای کیفیت قایل شده و هیچ توجهی به آلودگی وارد شده نمی‌کند. با حرکت به سمت دیگر پرتو، از درجه اهمیت تابع هدف کمی کاسته شده و به اهمیت تابع هدف کیفی افزوده می‌شود و در نهایت در نقطه انتهای سمت راست، فقط کیفیت آب تخصیص یافته مهم بوده و کمیت آب اهمیتی نخواهد داشت. در این پژوهش برای نمونه، یکی از نقاط موجود در میانه هر کدام از پرتوها با روش ینانگ (۱۹۹۳) انتخاب شده و عملکرد تصمیم‌های متناظر با آن نقطه

$$Sp_j = \begin{cases} 0 & , Aw_j \geq S_{\max} \\ Aw_j - S_{\max} & , Aw_j < S_{\max} \end{cases} \quad (۶)$$

$$Aw_j = S_j - X'_j - Y'_j + Q_j \quad (۷)$$

$$X_i, Y_i \geq 0, i = 1, \dots, K \quad (۸)$$

$$S_j \geq S_{\min}, j = 1, \dots, m \quad (۹)$$

که در این معادله‌ها، X و Y مجموعه متغیرهای تصمیم هستند، که X مقادیر آب خارج شده از مخزن برای تأمین نیاز مصرف کنندگان است و Y مقادیر آبی است که از مخزن خارج می‌شود ولی برای تأمین نیاز نیست و در بستر رودخانه رها می‌شود؛ X_i و Y_i عضو m ام به ترتیب از مجموعه X و Y ؛ K تعداد اعضای مجموعه X ؛ De_i نیاز در گام زمانی m ام، S_L حجم آب باقیمانده در مخزن در آخر دوره مورد مطالعه؛ f_1 و f_2 توابع هدف؛ a نسبت اهمیت تأمین نیاز در طول دوره مورد بررسی به اهمیت ذخیره آخر دوره مورد بررسی؛ X' و Y' خروجی‌های مخزن به صورت روزانه متناظر با مجموعه X و Y ؛ M_j میانگین وزن آلودگی خارج شده از مخزن در روز j ام؛ m تعداد روزهای دوره مورد مطالعه؛ $h(X, Y)$ تابعی است که غلظت آلودگی خروجی را در طول زمان بهره‌برداری، شبیه‌سازی می‌کند. که در این پژوهش از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 با توسعه انجام شده برای شبیه‌سازی MTBE بدین منظور استفاده شده است؛ S_j حجم آب در ابتدای روز j ام؛ Q_j حجم ورودی آب در روز j ام؛ $S_{\min}$ و $S_{\max}$ رتیب بیشترین و کمترین حجم ذخیره مخزن و Sp_j حجم سرریز در روز j ام است. برای بهینه‌سازی این مسئله، طول دوره بهره‌برداری به هشت گام زمانی تقسیم شده است. به این مفهوم که برای هر کدام از گام‌های زمانی، مقداری مشخص به عنوان تابع هدف یا همان دبی خروجی در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل ماهیت بحرانی مسئله، به این ترتیب پس از انجام بهینه‌سازی و استخراج تصمیم‌ها بهینه در شرایط وقوع آلودگی در حالت‌های مختلف، می‌توان از این تصمیم‌ها به عنوان دستورالعمل بهره‌برداری از مخزن در شرایط مشابه استفاده کرد.

حالت‌های برای هر مسئله است و به‌ترتیب از راست به چپ حالت‌های ۷۵، ۵۰ و ۲۵ را نمایش داده شده‌اند.

در شکل‌های ۱-۱ چ الی ۱-۲ همان‌طور که ذکر شد، مقادیر دبی خروجی از مخزن در اثر اتخاذ سیاست‌های مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار خروجی از مخزن در اثر اتخاذ سیاست با مدیریت، در سناریو S1 با توجه به وجود آب مازاد، مقادیر زیادی آب جهت تخلیه آلودگی از مخزن خارج می‌شود. این در حالی است که سیاست با مدیریت در دیگر سناریوها، آبی به مراتب کمتر را برای تخلیه آلودگی استفاده می‌کنند. البته لازم به ذکر است که هرچه مقدار اهمیت تأمین نیاز در طول دوره کاهش یابد (از شکل ۱-۲ به شکل ۱-۳)، آب رها شده کمتر و حجم آب ذخیره شده در انتهای دوره بیشتر می‌شود.

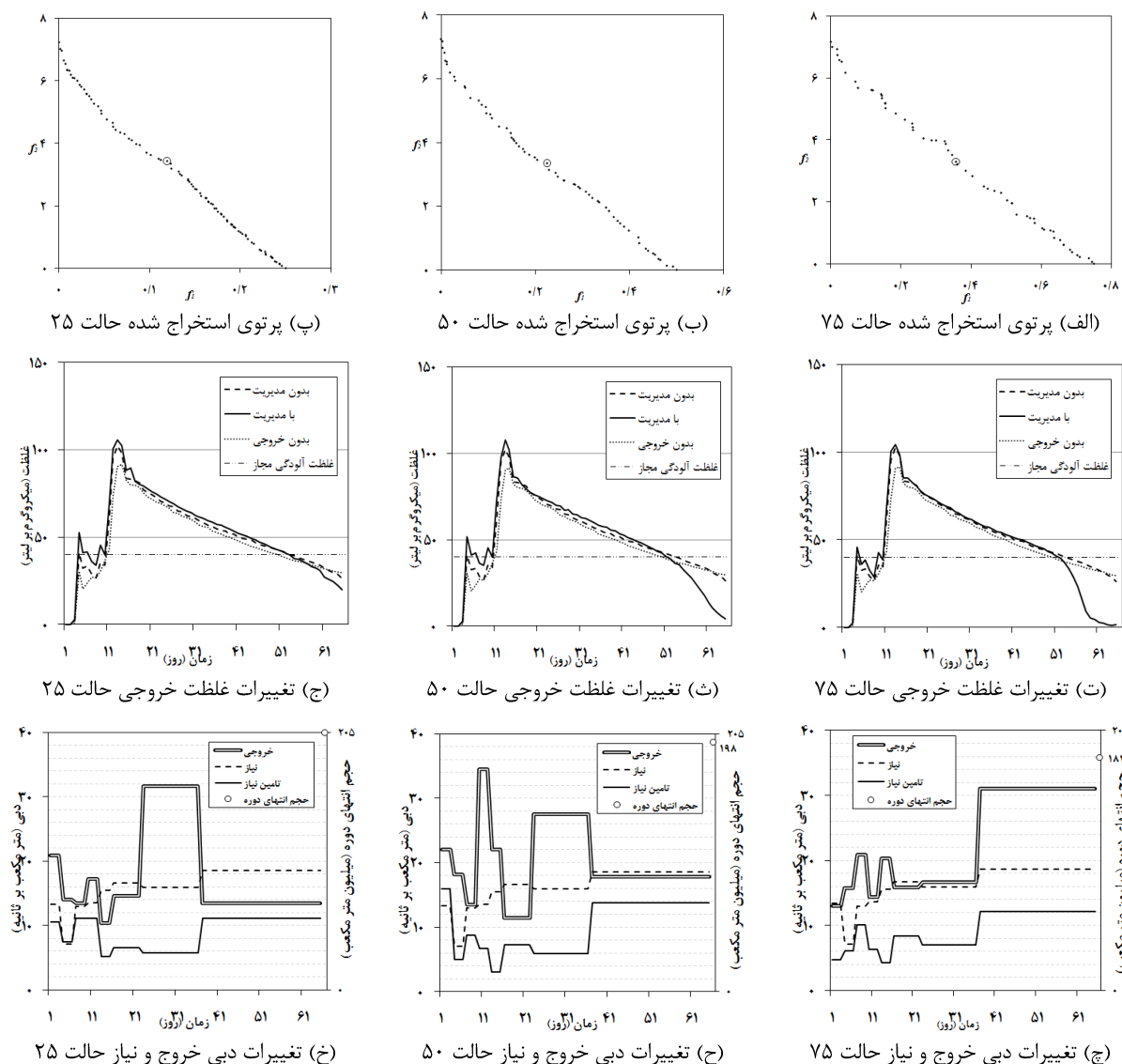
با نگاه کلی به میزان آب تخصیص داده شده، در سیاست با مدیریت، می‌توان دریافت که درصد تأمین نیاز در تمامی سناریوها در ابتدا و انتهای دوره مورد بررسی نسبت به اواسط آن بیشتر بوده است. دلیل تغییر در درصد تأمین نیاز طی دوره مورد بررسی، کم بودن غلظت آلودگی در ابتدا و انتهای دوره نسبت به اواسط دوره است. به بیان بهتر در گام‌های زمانی میانی، به دلیل غلظت بالای آلاینده خروجی، درصد آب کمتری در اختیار مصرف‌کننده قرار گرفته است. به طور کلی مقادیر تخصیص‌طوری استخراج شده‌اند که، نرخ آلودگی خروجی، تا حد امکان کم و آب تخصیص داده شده تا حد امکان زیاد باشد. به همین دلیل، همان‌طور که شکل‌های ۱-۱ د الی ۱-۲ مشخص است، در حالت اعمال سیاست منتخب در هر حالت، مشاهده می‌شود که نرخ خروج آلودگی، در طول دوره مورد مطالعه به طور یکنواخت بوده است. به طور کلی، نرخ آلودگی خروجی از دو نقطه نظر قابل بررسی است: (۱) وزن کل آلودگی‌هایی که به همراه آب تخصیص یافته به مصرف‌کننده از مخزن خارج شده است. چرا که نرخ آلودگی که توسط آب تخصیص یافته به مصرف‌کننده، از مخزن خارج می‌شود، باید تصفیه شده و سپس به دست مصرف‌کننده برسد و انجام تصفیه نیاز به صرف هزینه دارد و (۲) بیشترین نرخ آلودگی که با آب تخصیص یافته برای مصرف‌کننده تخلیه شده است. به این دلیل که ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها محدود بوده و قادر به تصفیه آب خروجی از مخزن‌ها بیشتر از یک مقدار خاص نیستند. پس بیشترین

بررسی شده است. در همین راستا در شکل ۱ علاوه بر پرتوهای هر حالت، غلظت‌های خروجی، دبی آب خروجی و نرخ آلودگی خروجی از مخزن در اثر گرفتن تصمیم‌های مختلف، از جمله تصمیم‌های استخراج شده توسط روش یانگ (۱۹۹۳) برای سناریو S1 به‌عنوان نمونه نمایش داده شده است. شکل‌های ۱-۱ ت الی ۱-۲ ج، تغییرات غلظت برای سه سیاست مختلف برای بهره‌برداری نمایش داده شده است: (۱) سیاست بدون مدیریت که بدون توجه به آلودگی وارد شده فقط به اندازه نیاز آب رها می‌شود، (۲) سیاست با مدیریت که از روش یانگ استخراج شده است و (۳) سیاست بدون خروجی که در پیچه‌های مخزن پس از ورود آلودگی بسته شده و تا آخر دوره بسته می‌ماند. لازم به ذکر است که سیاست بدون خروجی، سیاست انتهایی پایین سمت راست پرتوها و سیاست بدون مدیریت در اکثر پرتوها نقطه انتهایی بالا سمت چپ پرتوها است. تنها پرتوی که سیاست بدون مدیریت، نقطه بالا سمت چپ پرتوها نبود، حالت ۲۵ از سناریو S3 است. در این سناریو به علت کم بودن اهمیت تأمین نیاز، تمامی سیاست‌های موجود در پرتوی استخراجی برای این حالت سیاست مشابهی را پیشنهاد می‌کنند. سیاست بهینه در این حالت تخلیه آب بسیار اندک در طول این دوره است. چرا که با تخلیه آب مقدار تابع هدف کمی به دلیل کاهش حجم ذخیره که از مهم است، کم شده و همچنین آلودگی تخصیص داده شده نیز مقدار تابع هدف کیفی را نامطلوب می‌کند.

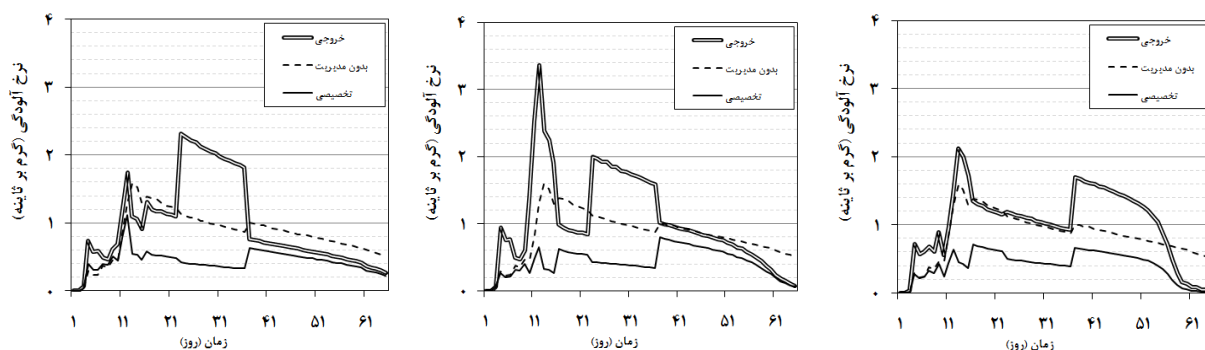
شکل‌های ۱-۱ چ الی ۱-۲ خ، مقادیر خروجی از سد و مقادیر اختصاص یافته به تأمین نیاز برای سیاست با مدیریت به همراه تغییرات دبی نیاز در طول دوره و حجم انتهای دوره مخزن در اثر اتخاذ سیاست با مدیریت نمایش داده شده است. همچنین که با توجه به مدل بهینه‌سازی مسئله حاضر، خروجی از مخزن دارای دو بخش است: (۱) بخشی که برای تأمین نیاز پایین دست اختصاص داده می‌شود و (۲) بخشی که بدون استفاده فقط برای تخلیه آلودگی در بستر رودخانه رها شده و استفاده نمی‌شود. یعنی اختلاف بین مقادیر دبی تخصیصی و خروجی در این نمودار مربوط به بخش دوم از خروجی‌ها است. در نهایت در شکل‌های ۱-۱ د الی ۱-۲ ر آلودگی خارج شده متناظر با هر یک از نمودارهای موجود در شکل‌های ۱-۱ چ الی ۱-۲ خ نمایش داده شده است. همچنین هر ستون مربوط به یکی از

با توجه به این جدول، می‌توان دریافت که با استفاده از سیاست با مدیریت، که با بهینه‌سازی استخراج شده است، نسبت به حالت بدون مدیریت، مقادیر به مراتب کمتری آلودگی به مصرف‌کننده تخصیص داده شده است. همچنین بیشترین نرخ آلودگی تخصیصی نیز در تمامی حالات کمتر شده است. اما این کاهش حجم و بیشینه نرخ آلودگی تخصیصی منجر به کاهش جزیی در درصد تأمین آب مورد نیاز مصرف‌کننده شده است.

نرخ آلودگی خارج شده با آب تخصیص یافته به مصرف‌کننده، نباید از ظرفیت تصفیه خانه‌ها بیشتر باشد. بنابراین کم بودن بیشترین نرخ آلودگی‌ای که با آب تخصیص یافته برای مصرف‌کننده خارج می‌شود، مهم است. در جدول ۳ حجم آلودگی خارج شده از مخزن و میزان آلودگی که با آب تخصیص داده شده به مصرف‌کننده وجود دارد، به همراه بیشترین نرخ آلودگی تخصیصی، در حالت‌های مختلف از سناریوهای مختلف ارائه شده است.



شکل ۱- نتایج استخراج شده از سناریو S1



(د) تغییرات نرخ آلودگی خروجی حالت ۷۵ (ذ) تغییرات نرخ آلودگی خروجی حالت ۵۰ (ر) تغییرات نرخ آلودگی خروجی حالت ۲۵
ادامه شکل ۱-

جدول ۳- حجم‌های آلودگی و بیشترین نرخ آلودگی خروجی از مخزن برای سیاست‌های مختلف

S4			S3			S2			S1			سناریو
C***	B**	A*	C***	B**	A*	C***	B**	A*	C***	B**	A*	سیاست
(mg/s)	(m^3)	(m^3)	(mg/s)	(m^3)	(m^3)	(mg/s)	(m^3)	(m^3)	(mg/s)	(m^3)	(m^3)	
۲/۷۰	۴/۷۳	۴/۷۳	۴/۸۰	۸/۰۸	۸/۰۸	۴/۴۵	۸/۳۱	۸/۳۱	۱/۵۹	۶/۳۴	۶/۳۴	بدون مدیریت
۰/۹۰	۲/۳۱	۲/۵۶	۱/۱۴	۳/۵۶	۴/۸۲	۱/۰۸	۳/۳۲	۳/۵۵	۰/۷۱	۳/۰۷	۷/۶۱	حالت ۷۵
۱/۱۰	۲/۳۵	۲/۴۲	۱/۰۵	۳/۵۹	۳/۹۲	۱/۶۰	۳/۴۰	۳/۶۵	۰/۷۹	۳/۲۵	۷/۹۱	حالت ۵۰
۰/۹۵	۲/۳۴	۲/۳۹	۰/۰۵	۰/۱۳	۰/۱۷	۱/۱۳	۲/۹۱	۳/۱۴	۱/۱۲	۳/۲۸	۷/۳۵	حالت ۲۵

* مقدار کل آلودگی خارج شده از مخزن

** مقدار آلودگی در آب تخصیص یافته به مصرف‌کننده

*** بیشترین نرخ آلودگی خارج شده از مخزن

نتیجه‌گیری

همان‌طور که بحث شد ورود آلودگی ناگهانی به درون مخزن‌های آب سطحی می‌تواند مشکلات بزرگی را برای سامانه‌های تأمین آب ایجاد کند. خطر وقوع حوادث ناگهانی و ورود آلاینده به‌صورت نقطه‌ای و یکباره، برای تمامی مخزن‌های آب سطحی از جمله سد کرج وجود دارد. پس با توجه به نقش مهم این مخزن در تأمین آب شرب شهرهای تهران و کرج، لازم است، تا با انجام مطالعات، بهترین شیوه مدیریت برای این مخزن در شرایط بروز آلودگی ناگهانی بررسی شود. بدین منظور با مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2 که طی این پژوهش، قابلیت شبیه‌سازی MTBE به آن افزوده شد، رفتار سد کرج برای شرایط مختلف بررسی شده است و با الگوریتم تلفیقی NSGAI-ANN، بهترین تصمیم‌ها برای چهار سناریو مختلف استخراج شده است. این سناریوها برای وقوع

آلودگی در اول هر یک از فصول سال بوده است و در نهایت با شبیه‌سازی سیاست‌های مختلف مقابله با بحران وقوع آلودگی در هر یک از چهار سناریو، عملکرد سامانه منابع آب بررسی شده است. با توجه به نتایج استخراج شده، پس از وقوع آلودگی ناگهانی در اول فصل بهار، حدود ۱۲ روز طول خواهد کشید تا آلودگی خروجی به بیشترین مقدار خود برسد. ولی در دیگر فصل‌ها، این مدت زمان بسیار کمتر است. پس در مواقعی که آلودگی در تابستان، پاییز یا زمستان اتفاق می‌افتد، مدیریت بحران با سرعت بیشتری باید انجام شود. همچنین اوج آلودگی خروجی از مخزن در سناریوای که آلودگی در فصل بهار وارد شود بسیار کمتر از دیگر سناریوها بوده و به همین دلیل بحران ناشی از وقوع آلودگی در فصول تابستان، پاییز و زمستان جدی‌تر خواهد بود. همچنین با بهینه‌سازی چندهدفه، تعداد زیادی سیاست به‌عنوان سیاست‌های

- quality managment on reservoir systems. *Advances in Water Resources*. 30(4):866-882.
10. Kerachian R. and Karamuz M. 2006. Optimal reservoir operation considering the water quality issue: adeterministic and stochastic confilict resoulution approach. *Water Resource Research*. 42 (1):1-17.
 11. Lewis W. K. and Witman W. G. 1924. Principles of Gas Absorption. *Indaustrial and Engineering Chemistry*. 16(12):1215-1220.
 12. Lofitis B. Labadie J. W. and Fontane D. G. 1985. Optimal operation of a system of lakes for quality and quantity. *Specialy Conference of computer Application in Water Resources New York*. 693-702.
 13. Rathbun R. E. 2000. Transport Behavior and Fate of Volatile Organic Compounds is Stream. *Environmental Science and Technology*. 30(2):129-295.
 14. Shirangi E. Kerachian R. and Shafai Bejestan M. 2007. A smimplified model for reservoir operation considering the water quality issues: Application of the young conflict resolution theory. *Environment Montitoring Assessment*. 146(1):77-89.
 15. Young H. P. 1993. An evolutionary model of bargaining. *Journal of Economic Theory*. 59:145-168.
- بهینه، استخراج شد که برای شرایط مختلف، قابل استفاده است. در این پژوهش از بین این گزینه‌ها، در هر حالت از هر سناریو، گزینه‌ای با روش یانگ (۱۹۹۳)، استخراج شد. به‌عنوان مثال با استفاده از سیاست استخراج شده، اگر آلاینده در تابستان وارد مخزن شود و تأمین نیاز در طول دوره سه برابر حفظ آب در مخزن در آخر دوره اهمیت داشته باشد، نسبت به حالت بدون مدیریت، تنها با کاهش ۳۶٪ در تأمین نیاز، در مجموع ۶۰٪ آلودگی کمتر و ۷۶٪ کاهش در اوج نرخ آلودگی خروجی را در پی داشت.
- ### منابع
۱. بیگی س. ۱۳۸۹. بهره‌برداری بهینه مخزن در شرایط آلودگی ناگهانی با رویکرد مصالحه کمی- کیفی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، گروه آبیاری و آبادانی. ۱۷۹ ص.
 ۲. علی‌حمزه م. ۱۳۸۹. مدیریت بهره‌برداری از مخزن‌ها در شرایط بحران کیفی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران. ۱۰۰ ص.
 3. Bender D. A. Asher W. E. and Zogorsk J. S. 2003. A deterministic model to estimate volatile organic compound concentrations in lakes and reservoirs. *Resto, VA: U.S. Geological Survey*.
 4. Dandy G. and Crawley P. 1992. Optimum operation of multiple reservoir system inducing salinity effect. *Water Resource Research*. 28 (4):979-990.
 5. Deb K. Partap A. Agarwal S. and Meyarivan T. 2002. Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions Evolutionary Computation*. 6(2):182-197.
 6. Fontan D. Labadie J. W. and Loftis, B. 1981. Optimal control of reservoir discharge quality through selective withdrawal. *Water Resources Research*. 17 (6):1594-1604.
 7. Hakimi-Asiabar M. Ghodsypour H. and Kerachian R. 2010. Deriving operation policies for multiobjective reservoir systems: Application of Self-Learning Genetic Algorithm. *Applied Soft Computing*. 10(4):1151-1163.
 8. Heald P. C. Schladow S. G. Reuter J. E. and Allen B. C. 2005. Modeling MTBE and BTEX in lakes and reservoirs used for recreational boating. *Environmental Science and Technology*. 39(4):1111-1118.
 9. Kerachian R. and Karamouz M. 2007. A stochastic confilict resoulution model for water

