



Development of Planning and Management Model for Reuse and Optimal Allocation of Municipal Effluent

A. Jahani-Bahnamiri^{1*}, N. Mehrdadi²,
Gh. Nabi-Bidhendi³, and M. Hosseinzadeh⁴

Abstract

Urbanization growth, increasing population and water demand, especially the increasing demand for drinking water in Iranian cities, particularly metropolises, have created a great challenge for water resources management in the country. Optimal use of effluent in urban water management prevents the inter-basin water transfer plans from being tolerated and consequently reduces heavy costs and reduces negative social consequences. In this paper, an extended model for planning, management and optimal allocation of municipal effluent by mapping the network flow and applying optimization methods is introduced. The objectives of this model are to minimize the total cost of the system by considering the technical, economic and environmental constraints as well as minimizing the use of existing raw water. By solving an application problem, the model's performance is verified and its validation is achieved by using MATLAB optimization software. This model can facilitate the policy making and decision making of managers in the licensing of municipal effluent allocation.

Keywords: Allocation Model, Optimization, Effluent, Inter Basin.

Received: August 27, 2019

Accepted: November 15, 2019

توسعه مدل برنامه‌ریزی و مدیریت در استفاده مجدد و تخصیص بهینه پسابهای شهری

اصغر جهانی بهنمیری^{۱*}، ناصر مهرداد^۲، غلامرضا
نبی‌بیدهندی^۳ و مجید حسین‌زاده^۴

چکیده

یکی از راهکارهای تامین آب با توجه به رشد شهرنشینی و افزایش جمعیت، اجرای طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای می‌باشد که براساس تجارب قبلی بدست آمده، این طرح تبعات منفی جدی اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی در بردارد. در مقابل طرح استفاده بهینه از پساب در مدیریت آب شهری، مانع روی آوردن به اجرای طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای بوده و در نتیجه کاهش هزینه‌های سنگین و کاهش تبعات منفی اجتماعی را به دنبال خواهد داشت. سیاستهای جدید وزارت نیرو و مدیریت آب کشور مبتنی بر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از پسابها از طریق جایگزینی آن با منابع آب باکیفیت در دسترس صنعت، فضای سبز و کشاورزی و آزادسازی این منابع جهت استفاده شرب می‌باشد. لیکن در برنامه‌ریزی‌ها و صدور مجوزهای تخصیص، مسائل کیفیت پساب و همچنین بررسی‌های اقتصادی سناریوها لحاظ نمی‌گردد. در این مقاله یک مدل توسعه یافته جهت برنامه‌ریزی، مدیریت و تخصیص بهینه پسابهای شهری با ترسیم جریان شبکه و استفاده از روشهای بهینه‌سازی معرفی می‌گردد. از اهداف این مدل کمینه‌کردن هزینه کل سیستم با در نظر گرفتن محدودیتهای فنی، اقتصادی و زیست محیطی و همچنین کمینه کردن استفاده از آب خام موجود می‌باشد. با حل یک مساله کاربردی، کارایی مدل به اثبات رسیده و صحت‌سنجی آن با استفاده از انجام بهینه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB صورت گرفته است. این مدل می‌تواند سیاستگذاری‌ها و تصمیم‌سازی مدیران در بخش صدور مجوزهای تخصیص پسابهای شهری را تسهیل نماید.

کلمات کلیدی: بین حوضه‌ای، مدل تخصیص پساب، بهینه‌سازی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۶/۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۸/۲۴

1- Ph.D. in Environmental Engineering -Water and Wastewater Engineering, University of Tehran & Head of Operation of Treated Wastewater and Non-conventional Water at Iranian Water Resources Management Company. Email: jahanib@ut.ac.ir

2- Professor, Department of Environment, University of Tehran, Tehran. Email: mehrdadi@ut.ac.ir

3- Professor, Department of Environment, University of Tehran, Tehran. Email: ghendi@ut.ac.ir

4- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran. Email: hosseinzadeh_m@iust.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- دکتری مهندسی محیط زیست- آب و فاضلاب دانشگاه تهران و رئیس واحد بهره‌برداری از پسابها و آب‌های غیرمتعارف شرکت مدیریت منابع آب ایران.

۲- استاد دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۳- استاد دانشکده محیط زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

مدل‌های مدیریتی به عنوان اساسی‌ترین راه حل برای ارزیابی و بهینه‌سازی استفاده و تخصیص منابع آب بکار می‌رود. در سال ۱۹۷۰ چندین مطالعات مدل‌سازی و تحلیل‌های سیستم بر روی مدیریت استفاده مجدد انجام شده بود که یکی از ابتدایی‌ترین کارهای کاربردی توسط Bishop and Hendricks (1971) انجام شده بود. آنها مسأله را به عنوان یک مسأله انتقال بدون ظرفیت با در نظر گرفتن هزینه‌های تصفیه و انتقال در فرم خطی مدل کردند. Mulvihill and Dracup (1974) در زمینه تخصیص چند منبع تولید آب بین چند مصرف کننده، تلاش کردند تا هزینه‌های تامین آب از منابع مختلف را به حداقل برسانند. مدل‌سازی همه کاربران به عنوان یک کاربر بزرگ با یک نیاز کیفیت، ضعف عمده این مدل بود.

مطالعه دیگر، مدل غیرخطی (Pingry et al., 1979) بود که هردو نیاز جریان و کیفیت آب را مورد توجه قرار داد. این مدل منابع تامین آب مستقل را مورد توجه قرار داده و به برقراری ارتباط متقابل میان کاربران و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب منجر شده است، اما ملاحظات سطوح مختلف تصفیه فاضلاب را شامل نبوده است. برخی از مطالعات اکولوژیکی صنعتی نیز در دهه گذشته از مدل‌های استفاده مجدد از آب کمک کرده‌اند. مدل استفاده مجدد از مواد ارائه شده توسط Keckler (1998) یکی از مدل‌های اکولوژیکی صنعتی است که طراحی جریان آب در پارک‌های صنعتی را نشان می‌دهد. این مدل فرصت‌های استفاده مجدد آب بین صنایع مختلف را با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی مشخص می‌کند. Nobel (2000) بر اساس مدل استفاده از مواد Keckler، یک مدل ArcView GIS را برای شناسایی و نمایش نتایج جفت‌های مورد تطابق منبع-مقصد در نقشه‌های GIS جهت استفاده مجدد از آب توسعه داد. Keckler، فرصت‌های استفاده مجدد آب از بین صنایع را با ایجاد ترکیبی از خروجی‌های مختلف صنعتی در نظر گرفت، درحالی‌که کار Nobel، متمرکز بر تجسم GIS از فرصت‌های استفاده مجدد از آب با یک مکانیزم ساده تطبیق کیفیت می‌باشد. با این حال، مدل‌های آنها در ارتباط با سیستم آب شهری توسعه نیافته بود. Chu et al. (2004) سناریوهای مختلف تأثیر عدم قطعیت‌های مختلف در تصمیم‌گیری‌های استفاده از پساب را شبیه‌سازی نمودند. Bruk et al. (2016)، نشان دادند که با بهره‌گیری از تکنولوژی‌های بازیافت آب با هزینه‌های اقتصادی در مجتمع‌های مسکونی می‌توان تقاضای آب را تا ۵۰ درصد کاهش داد. همچنین Ryan (2016) یک مدل بهینه‌سازی با استفاده از سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی برای یافتن منابع بالقوه آب بازیافتی و تقاضاهای آن در یک محیط شهری را ارائه داده است.

در طی قرن اخیر شهرنشینی سریع و رشد جمعیت در بسیاری از کشورها از جمله ایران منجر به ایجاد بسیاری از مسائل و مشکلات از جمله چالش تامین آب و ایجاد آلودگی گردیده است. از این رو بسیاری از جوامع در دنیا به دنبال استراتژی مدیریت پایدار منابع آب هستند (Neirizi, 1999). هدف از توسعه پایدار سیستم‌های آب شهری این است که تامین آب شهرها با کمترین هزینه و کمترین تأثیرات اجتماعی و زیست‌محیطی صورت گیرد. به علت افزایش دائمی تقاضای آب و محدودیت منابع آب، استفاده مجدد از فاضلاب‌های تصفیه شده برای جابجایی به نیازهای کوتاه مدت و درازمدت و به ویژه در زمان مواجهه با پیک تقاضا و خشکسالی نقش مهمی را در برنامه‌ریزی منابع آب با رعایت جوانب اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی ایفا می‌کند (Jahani, 2010). از طرفی استفاده مجدد از فاضلاب‌های تصفیه شده شهری به عنوان منابع آب جایگزین در مصارف نیاز به آب با کیفیت پایین‌تر می‌تواند راهکاری پایدار در حل تامین کمبودهای آب به ویژه در بخش شرب و مانع برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی گردد (Tavakoli et al., 2011). یکی از مهمترین مزایای بازیافت پساب در جهان، سهم غیرقابل انکار آن جهت افزایش پایداری مدیریت منابع آب طی دهه‌های آتی خواهد بود (Rezaei and Sarafzadeh, 2016). با توجه به ارزش اقتصادی بالای آب شرب در اکثر نقاط کشور، از این رو بهبود تصفیه‌خانه‌ها و جایگزینی پساب با آب خام یا آب زیرزمینی بسیار باصرفه بوده و می‌توان از سود حاصل جهت بهره‌برداری صحیح و راه‌اندازی واحدهای پیشرفته در تصفیه‌خانه‌ها استفاده کرد. استفاده مجدد آب همچنین هزینه‌های تصفیه فاضلاب جهت تخلیه به منابع آب سطحی را حتی می‌تواند کاهش دهد. به طور خلاصه برنامه استفاده از پساب هم می‌تواند سبب ذخیره و حفاظت از منابع آب با هدف تقویت آبهای زیرزمینی و جبران کمبودهای آب در بخش شرب و هم می‌تواند سبب کاهش ایجاد آلودگی گردد. به خاطر ماهیت پیچیده مسائل منابع آب و پساب، از این رو توسعه مدل برنامه‌ریزی، مدیریت و تخصیص بهینه پسابهای شهری می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد. از میان بسیاری از مدل‌های مدیریت، مدل‌های بهینه‌سازی در ایجاد اطلاعات ضروری برای تصمیم‌گیران در حوزه برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب مفید و کارساز می‌باشد.

برای جوامعی که با مشکل کمبود و تامین منابع آب به ویژه در بخش شرب روبرو هستند، استفاده از فاضلاب تصفیه شده با رویکرد جایگزینی با منابع آب با کیفیت مصرفی بخش‌های مختلف از نکات کلیدی مدیریتی است. معمولاً تخمین پتانسیل‌های استفاده مجدد به دلیل نبود اطلاعات و دانش کافی مشکل است. سال‌هاست که

در ایران تحقیقاتی که در زمینه استفاده مجدد از فاضلاب انجام شده است، بیشتر به بررسی مسائل فنی مسأله پرداخته و کمتر به جنبه‌های مدیریتی توجه داشته است (Abdolghafourian et al., 2012). (Saeedi and Hosseinzadeh, 2006) با طراحی شبکه مناسب بین فرآیندهای مصرف‌کننده آب در صنایع فرآیندی و شیمیایی نظیر صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی جهت استفاده مجدد از پساب یک فرآیند به‌عنوان آب تغذیه سایر فرآیندها، توانستند میزان تولید پساب را کاهش دهند. در این تحقیق از روش برنامه‌ریزی خطی (LP) و برنامه‌ریزی غیر خطی (NLP) برای کمینه‌سازی مصرف آب و تولید پساب برای جریان‌ات تک آلاینده و چند آلاینده در حالت وجود و یا عدم وجود فرآیند احیا در شبکه استفاده شد. استفاده از روش‌های مذکور ضمن کاهش زمان محاسبه، دقت محاسبات را نیز بالا برده و بویژه برای شبکه‌های بزرگتر و مسائل شامل چند آلاینده کاربرد بیشتری دارد. (Fallahnejad and Mehrdadi, 2013) لزوم تهیه شاخص کیفی پساب با رویکرد استفاده مجدد از پساب را بررسی نمودند و نتایج نشان داد که با توجه به مطالعات اندک در زمینه شاخص کیفی پساب و اهمیت این موضوع بدلیل استفاده مجدد از پساب، استفاده از شاخص‌های کیفی آب که عمدتاً در ساختار و پارامترهای کیفی مشترک هستند مناسب نبوده و تهیه یک شاخص کیفی مخصوص پساب با توجه به شرایط ملی و زیست‌محیطی ایران امری ضروری است.

برای رسیدن به جواب طی می‌کند: ۱- امکان‌سنجی: به معنی بررسی امکان انتقال پساب تولیدی به مصرف‌کننده با توجه به کیفیت آب مورد نیاز مصرف‌کننده و کیفیت پساب تولیدی موجود و بهبود یافته، ۲- تعیین مسیر و میزان انتقال پساب در شبکه با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ها.

۲- مواد و روش بررسی

۲-۱- مدل بهینه‌سازی جریان شبکه

برمبنای روش برنامه‌ریزی خطی خاص، نوعاً مدل بهینه‌سازی جریان شبکه برحسب عرضه‌ها و تقاضاهای یک کالا در یک سیستم شبکه توصیف می‌گردد. در این مدل، گره‌ها به‌عنوان نقاط ابتدایی و انتهایی خط‌های انتقال تعریف گردیده، قوس‌ها یا کمان‌ها هم گره‌ها را به هم وصل می‌کنند. گره‌ها معمولاً عرضه‌ها یا تقاضاها هستند، در حالی که ویژگی یا مشخصه کمان‌ها معمولاً ظرفیت‌های جریان آب یا پساب می‌باشد. راه حل بهینه مدل جریان شبکه را می‌توان به‌عنوان حداقل هزینه تصفیه تکمیلی و انتقال پساب به مصرف‌کنندگان شهری، صنعتی و کشاورزی با اولویت آزادسازی منابع آب مصرفی با کیفیت شرب و همچنین تقویت آبخوان در نظر گرفت. میزان آب انتقال یافته از میدا به مقصد، نرخ جریان است که معمولاً متغیر تصمیم‌گیری مسأله بهینه‌سازی می‌باشد. مدل بهینه‌سازی شبکه را می‌توان در فرم کلی زیر بیان کرد:

Minimize:

$$\sum_{(i,j) \in A} C_{i,j} x_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{(j,k) \in A} x_{j,k} - \sum_{(k,i) \in A} x_{k,i} = b_k \quad \forall k \in N$$

$$0 \leq x_{i,j} \leq U_{i,j} \quad \forall (i,j) \in A$$

که معادلات فوق قیدهای بالانس جریان و قیدهای ظرفیت جریان هستند؛ علائم و نشانه‌ها در زیر فهرست شده‌اند:

$i, j \in N$ گره‌های شبکه

$i, j \in A$ قوس‌های شبکه

b_k تقاضای خالص گره k است ($b_k \geq 0$)

$|b_k|$ میزان آب تامین شده خالص گره k است ($b_k \leq 0$)

$(k,i) \in A$ قوس‌هایی که گره k را ترک می‌کنند.

$(j,k) \in A$ قوس‌هایی که وارد گره k می‌شوند

$C_{i,j}$ هزینه جریان واحد روی $\text{arc}(i,j)$

$x_{i,j}$ نرخ جریان روی $\text{arc}(i,j)$

$U_{i,j}$ ظرفیت جریان روی $\text{arc}(i,j)$

دیگرام ساده شبکه جریان (گره-کمان) برای مدل استفاده از پسابهای شهری در شکل ۱ نشان داده شده است.

علی‌رغم وجود یک مرجع سیاستگذاری و تصمیم‌گیری پیرامون تخصیص پسابهای شهری در ایران، لیکن تا به حال برای هیچ کدام از شهرهای ایران، شبکه کامل منابع و مصارف پساب با رویکرد جایگزینی مورد مطالعه قرار نگرفته است. همچنین هیچ‌گونه بهینه‌سازی در زمینه تخصیص پساب شهری با رویکرد جایگزینی با منابع آب با کیفیت مصرفی در بخشهای کشاورزی، فضای سبز، صنعت و غیره انجام نشده است. بهینه‌سازی با هدف کمینه کردن هزینه‌های تصفیه تکمیلی و انتقال پساب در کنار کمینه کردن مصرف آب خام (با اولویت آب مخزن سدها و آبهای زیرزمینی با کیفیت شرب) فرصت مناسبی برای درک الزام تغییر الگوی مصرف بسیاری از مصرف‌کنندگان عمده از جمله فضای سبز شهری و پارک‌های جنگلی، صنایع، کشاورزی و غیره و عملیاتی نمودن استفاده از پساب تصفیه‌خانه‌های شهری به‌عنوان منبع آب جایگزین برای مصارف مذکور است.

مدل توسعه یافته در این مطالعه تحت عنوان مدل "برنامه‌ریزی استفاده مجدد و تخصیص بهینه پساب شهری" با رویکرد جایگزینی و با هدف جبران کمبودهای شرب و همچنین تقویت آبخوان، دو مرحله زیر را

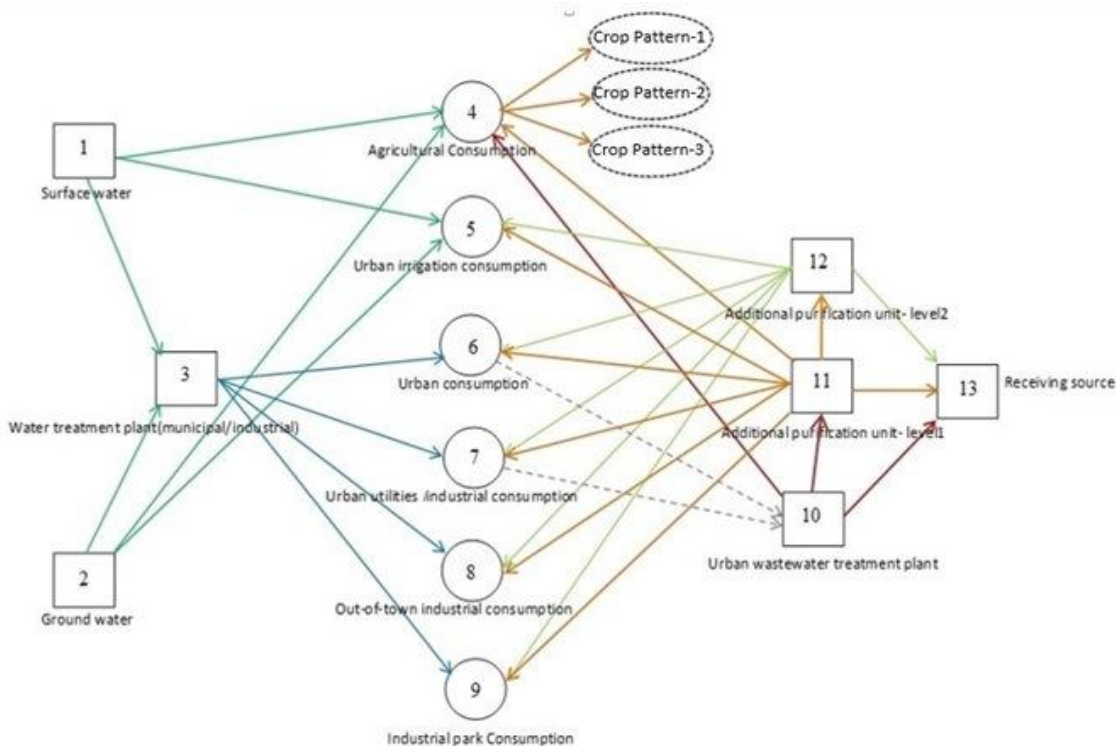


Fig. 1- Schematic diagram of water and wastewater allocation

شکل ۱- دیاگرام شماتیک جریان تخصیص آب و پساب

$XSW_{i,j}$: میزان آب انتقالی از منبع آب سطحی i به گره مصرف کننده j
 $XGW_{k,j}$: میزان آب انتقالی از منبع آب زیرزمینی k به گره مصرف کننده j
 $XSW_{i,l}$: میزان جریان آب خام انتقالی از منبع آب سطحی i به گره تصفیه‌خانه آب l
 $XGW_{k,l}$: میزان آب خام انتقالی از منبع آب زیرزمینی k به گره تصفیه‌خانه آب l
 $XTW_{l,j}$: میزان آب تصفیه شده انتقالی از گره تصفیه‌خانه آب l به مصرف کننده j
 $XTWW_{h,j}$: میزان پساب انتقالی از گره تصفیه‌خانه فاضلاب h به مصرف کننده j
 $XWW_{j,h}$: میزان جریان فاضلاب از گره مصرف کننده j به گره تصفیه‌خانه فاضلاب h
 $XWW_{j,r}$: میزان جریان فاضلاب از گره مصرف کننده j به محیط پذیرنده r
 $XTWW_{h,r}$: میزان جریان پساب از تصفیه‌خانه فاضلاب h به محیط پذیرنده r
 EXS_j : میزان جریان آب از منبع آبرسانی خارجی به مصرف کننده j واحدهای جریان مترمکعب در روز ($\frac{m^3}{day}$) می‌باشد.

برخی از متغیرهای نوعی مدل و پارامترها در شکل نشان داده شده است. برای توسعه مدل برنامه‌ریزی استفاده مجدد و تخصیص پسابهای شهری تقاضای D برای کاربران تعریف می‌شود. تقاضای D مقدار کل آب مورد نیاز کاربر می‌شود که معمولاً شامل تقاضای خالص b و مقدار آب تخلیه شده از کاربر بعد از مصرف می‌باشد. برای کاربران آبیاری تقاضای D معادل تقاضای خالص b می‌باشد چون که تمام آب تامین شده بدون تخلیه مصرف شده است. همچنین برای توسعه مدل برنامه‌ریزی استفاده مجدد از پساب شهری، دیگر پارامترها نظیر کیفیت آب و ظرفیت منابع حتماً باید مورد ملاحظه قرار گیرد. بنابراین علاوه بر قیدهای بالانس جریان، همچنین تقاضا، کیفیت و حد ظرفیت، قیدهای اصلی مدل مذکور را می‌سازند.

همانطور که در بالا گفته شد، در این مطالعه، مدل بهینه‌سازی بر مبنای مدل بهینه‌سازی جریان شبکه توسعه یافته است. در ادامه متغیرهای اصلی تصمیم‌گیری، قیدها و تابع هدف آمده است:

۲-۲- متغیرهای تصمیم‌گیری مدل

متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تمام نرخ‌های جریان بین گره‌های منبع و مصرف در سیستم شبکه و به شرح زیر می‌باشد:

۳-۲- پارامترها و داده‌های ورودی مورد نیاز

برای برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده مجدد آب شهری، پارامترهای مورد نیاز مدل به شرح زیر است:

US: مجموعه کاربران (مصرف‌کننده‌ها)

SU: مجموعه منابع آب سطحی

GR: مجموعه منابع آب زیرزمینی

R: مجموعه محیط‌های پذیرنده

P: مجموعه آلاینده‌ها

WTP: مجموعه تصفیه‌خانه‌های آب

WWTP: مجموعه تصفیه‌خانه‌های فاضلاب

DEM_j: میزان تقاضای آب مصرف‌کننده j

NDL_j: میزان تقاضای خالص مصرف‌کننده j

LT_i: میزان تلفات آب در تصفیه‌خانه‌های آب یا فاضلاب

SWA_i: حداکثر آب موجود برای استحصال از منبع آب سطحی i

GWA_k: حداکثر آب موجود برای استحصال از منبع آب زیرزمینی k

QR(P_n)_r: حداکثر دبی جرمی آلاینده p و مورد قبول محیط پذیرنده r

CS(P_n)_i: غلظت آلاینده n منبع آب سطحی i

CG(P_n)_k: غلظت آلاینده n منبع آب زیرزمینی k

STD(P_n)_j: حداکثر غلظت آلاینده n مورد قبول کاربر (مصرف‌کننده) j

CTW(P_n)_l: غلظت آلاینده n خروجی از تصفیه‌خانه آب l

CTWW(P_n)_h: غلظت آلاینده n خروجی از تصفیه‌خانه فاضلاب h

C(P_n)_t: غلظت آلاینده n خروجی از واحد مصرف‌کننده t

CAP_l and CAP_h: به ترتیب ظرفیت‌های تصفیه‌خانه آب l و تصفیه‌خانه فاضلاب h

که واحد غلظت آلاینده mg/l است و تقاضا و ظرفیت همانطوری که قبلاً توصیف شد برحسب مترمکعب در روز می‌باشد.

۴-۲- قیدهای مدل

۱-۴-۲- قید تقاضا

قید تقاضا که مدل را اجبار می‌کند تا تقاضای همه کاربران را برآورده کند به شرح زیر است:

$$\left(\sum_{i \in SW} XSW_{i,j} + \sum_{k \in GW} XGW_{k,j} + \sum_{l \in WTP} XTW_{l,j} + \sum_{h \in WWTP} XTWW_{h,j} + EXS_j \right) \geq DEM_j \quad \forall j \in US \quad (2)$$

این قیدها این اطمینان را حاصل می‌کنند که آب تامین شده از تمامی منابع ممکن در سیستم به هر کاربر اغلب بزرگتر مساوی تقاضا باشد.

۲-۴-۲- قید بالانس جریان شبکه

قیدهای بالانس جریان گاهی قیدهای حفاظت در مدل جریان شبکه نامیده می‌شود که اطمینان می‌دهد که جریان در هر گره از شبکه متعادل می‌باشد.

$$\left(\sum_{i \in SW} XSW_{i,j} + \sum_{k \in GW} XGW_{k,j} + \sum_{l \in WTP} XTW_{l,j} + \sum_{h \in WWTP} XTWW_{h,j} + XS_j - \sum_{h \in WWTP} XWW_{j,h} - \sum_{r \in RS} XWW_{j,r} \right) = NDL_j \quad \forall j \in US \quad (3)$$

۳-۴-۲- قیدهای ظرفیت

قیدهای ظرفیت، آب ورودی به تصفیه‌خانه آب یا فاضلاب را محدود به ظرفیت اسمی طرح می‌نماید. برای تصفیه‌خانه‌های آب، این قیدها به شرح زیر است:

$$\sum_{i \in SW} XSW_{i,l} + \sum_{k \in GW} XGW_{k,l} \leq CAP_l \quad l \in WTP \quad (4)$$

قیدهای ظرفیت برای فرایند چندسطحی تصفیه فاضلاب شهری (با فرض وجود دو سطح تصفیه تکمیلی) به صورت زیر لحاظ گردیده است:

$$\sum_{h_1 \in WWTP} XTWW_{h_1,j} \leq CAP_{h_1}$$

$$\sum_{h_2 \in WWTP} XTWW_{h_2,j} \leq CAP_{h_2}$$

$$CAP_{h_2} \leq CAP_{h_1} - \sum_{h_1 \in WWTP} XTWW_{h_1,j} \quad \sum_{h_3 \in WWTP} XTWW_{h_3,j} = CAP_{h_3} \quad (5)$$

$$CAP_{h_3} = CAP_{h_2} - \sum_{h_2 \in WWTP} XTWW_{h_2,j} + \sum_{h_1 \in WWTP} XTWW_{h_1,j} + \sum_{h_2 \in WWTP} XTWW_{h_2,j} + \sum_{h_3 \in WWTP} XTWW_{h_3,j} \leq CAP_{h_1}$$

۲-۴-۴- قید الزامات کیفیت

الزامات کیفیت مورد نیاز مصرف کننده‌ها: این قیده‌ها جریانهای موجود در سیستم را الزام می‌کند تا نیازهای کیفیت هر نوع استفاده را برآورده سازد (یعنی غلظت‌های آلاینده کمتر از حد مجاز در نظر گرفته شده می‌باشد).

این قیده‌ها با این فرض لحاظ گردیده‌اند که غلظت آبی که به کاربر تحویل داده می‌شود در واقع مخلوطی از تمام جریانهای ورودی به گره کاربر می‌باشد. بنابراین قید الزام می‌کند که غلظت حاصل از آلاینده‌ها در جریان مخلوط بیش از حد بیشینه مورد نظر کاربر نباشد. فرمت قطعی این قیده‌ها (محدودیتها) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} & \left[\sum_{i \in \text{SU}} \text{CS}(\text{P}_n)_i \text{XSW}_{i,j} + \sum_{k \in \text{GR}} \text{CG}(\text{P}_n)_k \text{XGW}_{k,j} \right. \\ & + \sum_{l \in \text{WTP}} \text{CTW}(\text{P}_n)_l \text{XTW}_{l,j} \\ & + \sum_{h \in \text{WWTP}} \text{CTWW}(\text{P}_n)_h \text{XTWW}_{h,j} \left. \right] \\ & - \text{STD}(\text{P}_n)_j \left[\sum_{i \in \text{SU}} \text{XSW}_{i,j} \right. \\ & + \sum_{k \in \text{GR}} \text{XGW}_{k,j} + \sum_{l \in \text{WTP}} \text{XTW}_{l,j} + \sum_{h \in \text{WWTP}} \text{XTWW}_{h,j} \left. \right] \\ & \leq 0 \quad \forall j, n \end{aligned} \quad (6)$$

۲-۵- تابع هدف

هدف از این مدل، بهینه نمودن استفاده مجدد و تخصیص پساب (تخصیص حداکثری پساب و حداقلی آب خام) با تعیین حداقل هزینه تصفیه تکمیلی و انتقال به هر کاربر در یک سیستم می‌باشد که استفاده مجدد آب مطرح باشد. لذا کلیه هزینه‌های عملیاتی و اجرای استفاده از پساب باید تخمین زده شود. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های زیرساختی، هزینه‌های بهره‌برداری تصفیه فاضلاب، هزینه‌های پمپاژ و انتقال می‌گردد. هدف این مدل به شرح زیر است:

$$\text{Minimize: } C(X) = C_{(\text{WWTP})} + C_{(\text{pumping})} + C_{(\text{infrastructure})} \quad (7)$$

که در آن $C_{(\text{WWTP})}$: هزینه‌های تصفیه فاضلاب تا سطح مشخص جهت استفاده مجدد یا تخلیه به محیط، $C_{(\text{pumping})}$: هزینه‌های پمپاژ ناشی از مصرف انرژی در انتقال آب و $C_{(\text{infrastructure})}$: هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه می‌باشند. تخصیص بهینه آب و پساب از نتایج این مدل در سیستم می‌باشد که در واقع نرخ جریان بهینه بین هر تامین کننده و هر مصرف کننده است.

۳- مثال کاربردی، داده‌های ورودی و اجرای مدل، نتایج و بحث

در این تحقیق برای حل مسأله و صحت‌سنجی مدل توسعه یافته، شهر یاسوج مورد مطالعه قرار گرفته است. سیستم مورد مطالعه شامل ده منبع آب زیرزمینی، دو منبع آب سطحی، یک تصفیه‌خانه فاضلاب شهری، یک منبع پذیرنده و ۱۱ مصرف کننده (کاربر) می‌باشد. مصرف کنندگان (کاربران) اصلی شامل ۴ شهرک صنعتی، ۲ ناحیه صنعتی، ۳ واحد صنعتی، ۱ آبیاری فضای سبز شهری و ۲ ناحیه کشاورزی می‌باشند (جدول ۱). فرض می‌شود سه سطح فرایند تصفیه در تصفیه‌خانه فاضلاب بکار رفته باشد که سطح پایه تصفیه الزامات تخلیه فاضلاب به منبع پذیرنده را برآورده کرده و سطوح ۲ و ۳ تصفیه، آب احیاء شده برای استفاده مجدد را تولید می‌کند (جدول ۲). تصفیه‌خانه فاضلاب سطح ۱ می‌تواند به کاربران کشاورزی آبرسانی کرده و همچنین به تصفیه‌خانه فاضلاب سطح ۲ و منبع پذیرنده تخلیه گردد. تصفیه‌خانه فاضلاب سطح ۲ می‌تواند به تمام کاربران آبرسانی نموده و همچنین به تصفیه‌خانه فاضلاب سطح ۳ و منبع پذیرنده تخلیه گردد. در نهایت تصفیه‌خانه فاضلاب سطح ۳ می‌تواند به تمام کاربران آبرسانی نموده و به منبع پذیرنده تخلیه گردد. با تعریف یک ماتریس گره-قوس مناسب در مدل بهینه‌سازی جریان شبکه، نحوه ارتباط بین گره‌ها مشخص می‌گردد. تامین آب فعلی کاربران از منابع سطحی و زیرزمینی تامین می‌گردد. برای الزامات کیفیت، چهار پارامتر اصلی کیفیت شامل مواد جامد معلق (TSS)، نیاز اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)، مواد جامد محلول (TDS) و کلیفرم گرمپای در نظر گرفته شده است.

کیفیت مورد نیاز اشاره شده در جدول شماره ۱ از نشریه «راهنمای طبقه‌بندی کیفیت آب خام، پساب‌ها و آبهای برگشتی برای مصارف صنعتی و تفریحی» (Ministry of Energy Guideline (No.462, 2009) و نیز استاندارد شماره ۲-۲۱۸۷۶: «طرح‌های استفاده از فاضلاب تصفیه شده در آبیاری» (ISIRI Standard (No.21876-2, 2016) گرفته شده است.

مدل در نرم‌افزار MATLAB کدگذاری و حل مسأله با استفاده از حل‌کننده بهینه‌سازی (fmincon) MATLAB انجام شده است که قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی با قیده‌های خطی و غیرخطی را دارد. برای اطلاعات ورودی داده شده به مدل، تخصیص این منابع تحت قیده‌های مختلفی چون تقاضا، کیفیت، ظرفیت و بیلان شبکه بهینه گردیده است. در جدول ۳ نتایج مدل براساس اطلاعات داده شده ارائه شده است.

Table 1- Consumer specifications and demands

جدول ۱- مشخصات مصرف کننده ها و تقاضاها

User	Current water source	Demand (m ³ /day)	Current water quality				Distance to WWTP (km)				User height above sea level(m)	Distance to WWTP (km)
			COLIFORM (MPN)	TDS (mg/l)	TSS (mg/l)	BOD (mg/l)	COLIFORM (MPN)	TDS (mg/l)	TSS (mg/l)	BOD (mg/l)		
Downstream WWTP Farming(j ₁)	(i ₄) Bashar river	16000	240	262	5.48	6.19	200	500	90	60	1680	7
Downstream of the Shah Qaem dam(j ₂)	(i ₅) Shah Qaem dam	32800	15	293	5	8.1	200	500	25	20	1875	5
limited green space irrigation (j ₃)	(i ₆) well	2470	5	300	0	2	200	500	25	20	1840	4.3
unlimited green space irrigation(j ₄)	(i ₇) well	3560	5	300	0	2	10	500	10	10	1840	4.3
Yasooj steel factory (j ₅)	(i ₈) well	40000	5	350	1	3	100	200	10	10	1990	11
Margoon cement factory (j ₆)	(i ₉) well	190	2	350	0	2	200	1000	100	75	238	7.52
Yasooj cement factory (j ₇)	(i ₁₀) well	820	5	381	0	2	200	1000	100	75	2122	8.15
Yasooj industrial park No.1 (j ₈)	(i ₁₁) well	13700	0	303	0	9.1	100	500	20	25	1766	24.2
Yasooj industrial park No.2 (j ₉)	(i ₁₂) well	820	5	300	0	2	100	500	10	20	1848	9
Yasooj industrial park No.3 (j ₁₀)	(i ₁₃) well	3290	5	247	27	9.3	100	500	20	25	1778	28.2
Yasooj industrial park No.4 (j ₁₁)	(i ₁₄) well	3560	1	300	0	1	100	500	20	25	2140	7.18
Delibejak industrial area (j ₁₂)	(i ₁₅) well	3560	0	350	0	1	100	500	10	20	2265	2.17
Amirabad industrial area(j ₁₃)	(i ₁₆) well	685	0	347	0	5.1	100	500	10	20	2128	7.10

Table 2- Specifications of effluent sources

جدول ۲- مشخصات منابع تولید پساب

No.	Parameter Unit	water production (cubic meters per day)	Water quality				Level (m)
			BOD (mg/l)	TSS (mg/l)	TDS (mg/l)	COLIFORM (MPN)	
1	Yasooj Wastewater Treatment Plant(i ₁)	43835	60	100	490	200	1752
2	Level 1 Supplementary Treatment Unit(i ₂)	variable	20	10	450	50	1752
3	Level 2 Supplementary Treatment Unit(i ₃)	variable	10	5	400	5	1752

Table 3- Matrix of optimal water and effluent allocation by minimizing system costs (cubic meters per day)

جدول ۳- ماتریس نتایج تخصیص بهینه آب و پساب با کمینه شدن هزینه های سیستم (مترمکعب در روز)

User Producer	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀	j ₁₁	j ₁₂	j ₁₃
i ₁	14400	8200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ₂	0	0	1235	0	0	0	0	11231	0	3290	0	0	0
i ₃	0	0	1235	1775	0	0	0	2469	0	0	0	0	0
i ₄	1600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ₅	0	24600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ₆	0	0	0	1785	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i ₇	0	0	0	0	40000	0	0	0	0	0	0	0	0
i ₈	0	0	0	0	0	190	0	0	0	0	0	0	0
i ₉	0	0	0	0	0	0	820	0	0	0	0	0	0
i ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	820	0	0	0	0	0
i ₁₃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3560	0	0
i ₁₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3560	0
i ₁₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	685

i₁ تا i₃ منبع پساب تخصیص یافته و i₄ تا i₁₅ منابع آب تخصیص یافته می‌باشند، همانگونه که در نتایج خروجی مدل در جدول فوق مشخص است، پساب تصفیه‌خانه تکمیلی سطح ۱ به مصرف‌کننده‌های i₃ (آبیاری فضای سبز محدود)، i₈ (شهرک صنعتی شماره ۱ یاسوج) و i₁₀ (شهرک صنعتی شماره ۳ یاسوج) و پساب تصفیه‌خانه تکمیلی سطح ۲ نیز به مصرف‌کننده‌های i₃ (آبیاری فضای سبز محدود)، i₄ (آبیاری فضای سبز نامحدود) و i₈ (شهرک صنعتی شماره ۱ یاسوج) اختصاص یافت. میزان آب تخصیصی از منابع i₄ تا i₁₅ نیز در جدول مشهود می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، الگوریتم و مدل بهینه تخصیص پساب شهری با رویکرد جایگزینی و بهره‌برداری تلفیقی توسعه داده شده و صحت‌سنجی آن نیز براساس نتایج داده‌های حاصله در مثال کاربردی مورد تأیید واقع گشت. از آنجایی که الگوریتم توسعه مدل برنامه‌ریزی تخصیص پساب شهری با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود می‌بایست در قالب یک مسأله (مثال کاربردی) و در محیط نرم‌افزار بهینه‌سازی به جواب برسد، از این رو با ارائه یک مثال کاربردی و با سعی‌های متعدد و رفته خطاهای پیش رو، سرانجام با ارائه جواب از سوی مدل نرم‌افزاری، موفقیت در توسعه الگوریتم و مدل تخصیص پساب به دست آمد. صحت مدل توسعه یافته در نتایج حاصل (جدول ۳) مشهود است، به این صورت که با توجه به نیازهای کمی و کیفی تقاضاهای موجود در مسئله، تخصیص بهینه پساب شهری از هر سطح تصفیه با لحاظ کمینه شدن جمع هزینه‌های طرح صورت گرفت. درخصوص هزینه‌ها، لازم به توضیح است که در این مسأله، هزینه بهره‌برداری تصفیه‌خانه اصلی، هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری سیستم تصفیه تکمیلی هر دو سطح (۱) و (۲) و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری کلیه مسیرهای انتقال پساب به تقاضاها محاسبه گشته و به مدل داده شد. همانطور که از نتایج اجرای مدل توسعه یافته برنامه‌ریزی و تخصیص پساب‌های شهری در جدول مشهود است، با لحاظ نمودن سطوح مختلف تصفیه تکمیلی و در نتیجه اعمال بهبود کیفیت پساب‌های شهری و همچنین با در نظر گرفتن حداقل هزینه‌ها و اعمال قیود تقاضا، ظرفیت جریان و کیفیت از سوی دیگر، می‌توان حداکثر نیاز آبی مصارفی چون فضای سبز، کشاورزی، صنعت و غیره را از طریق پساب تامین کرد. به این صورت که در این مسئله از آنجایی که تعریف شده بود که از پساب تصفیه‌خانه اصلی صرفاً به دو مصرف‌کننده کشاورزی تخصیص یابد، از این رو جمع حجم پساب تخصیصی از تصفیه‌خانه اصلی به تقاضاهای کشاورزی به میزان ۲۲۶۰۰ مترمکعب در روز (با توجه به نیازهای کمی و کیفی مصارف

کشاورزی و میزان کمی و کیفی پساب و لحاظ حداقل هزینه) تعیین گشته بود. از طرفی مطابق الگوریتم طراحی شده، حجم مازاد بر حجم پساب تخصیص یافته از تصفیه‌خانه اصلی وارد سیستم تصفیه تکمیلی مرحله اول و همچنین حجم پساب مازاد بر حجم پساب تخصیص یافته از سیستم تصفیه تکمیلی مرحله اول وارد سیستم تصفیه تکمیلی مرحله دوم می‌شود. از طرفی در این مدل توسعه یافته، تعیین حجم یا ظرفیت بهینه واحدهای تصفیه تکمیلی ۱ و ۲ به‌عده مدل گذاشته شد که منتها لازم بود رابطه معناداری بین ظرفیت واحدهای مختلف تصفیه و سرجمع تخصیص‌های لحاظ شده از هر واحد برقرار گردد که از الگوریتم ارائه شده در بخش ۲-۴-۳ بهره گرفته شد. مطابق با نتایج مدل، مازاد بر حجم پساب تخصیصی از تصفیه‌خانه اصلی به میزان ۲۱۲۳۵ مترمکعب در روز وارد واحد تصفیه تکمیلی سطح ۱ که از این میزان، ۱۵۷۵۶ مترمکعب در روز ۱ به تقاضاها تخصیص یافته و مازاد آن به میزان ۵۴۷۹ مترمکعب در روز وارد واحد تصفیه تکمیلی سطح ۲ گردیده که این میزان هم تماماً به تقاضاها تخصیص یافت. با توجه به هزینه بالاتر تصفیه تکمیلی سطح ۲ نسبت به سطح ۱ (در واقع مازاد سطح ۱ که وارد سطح ۲ می‌شود یکبار در سطح ۱ هم هزینه روی آن انجام گردیده است)، لحاظ شدن حجم تخصیصی پساب حدود ۱۵۷۵۶ مترمکعب در روز از سیستم تصفیه تکمیلی سطح ۱ و حجم تخصیصی ۵۴۷۹ مترمکعب در روز از سطح ۲ توسط مدل، کاملاً منطقی و نشانگر صحت عملگری مدل توسعه یافته است. با عنایت به تخصیص بهینه پساب حاصل از نتایج مدل توسعه یافته، از اینرو می‌توان از آب خام و آب زیرزمینی ذخیره شده به میزان حدود ۱۶ میلیون مترمکعب در سال، برای دیگر مصارف استراتژیک از جمله شرب و بهداشت استفاده کرده و همچنین مشکل کمبود آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی را جبران کرد.

۵- مراجع

- Abdolghafourian A, Tajrishi M, Abrishamchi M (2012) Urban water management in case of wastewater and runoff as new water resources (Case Study: Tehran). Journal of Water and Wastewater 34 (In Persian)
- Bishop B, Hendricks D (1971) Water reuse system analysis. Journal of the Sanitary Engineering Division (ASCE) 97(1):41-57
- Bruk M, Berhanu N, Blackhurst M, Kirisits M (2016) Feasibility of water efficiency and reuse technologies as demand-side strategies for urban water management". Journal of Industrial Ecology 21(2):320-331
- Chu J, Chen J, Wang C, Fu P (2004) Wastewater reuse potential analysis: Implications for China's water

- Neirizi S (1999) Reuse of treated wastewater as a solution for water supply. *Journal of Water and Environment* 34 (In Persian)
- Nobel CE, Allen DT (2000) Using geographic information Systems (GIS) in industrial water reuse modelling. *Trans IChemE* 78
- Pingry M, Shaftel J (1997) Integrated water management with reuse: a programming approach. *Water Resources Research* 15(1):8-14
- Rezaei M, Sarafzadeh M (2006) Investigation of opportunities and obstacles for effluent recycling in urban use. *Journal of Iran-Water Resources Research* 12(4) (In Persian)
- Ryan T (2016) A model for analyzing water reuse potential in urban areas. *Proceedings of the Water Environment Federation*
- Saeedi M, Hosseinzadeh M (2006) Optimization of water consumption in industrial systems using linear and nonlinear programming. *Journal of Applied Science* 6(11):2396-2393
- Tavakoli M, Jahani A, Mahmoodi Sh (2011) Planning and management of municipal effluent. *Iran Water Resources Management Company* 150p (In Persian)
- resources management. *Journal of Water Research* 38:2746-2756
- Fallahnejad M, Mehrdadi N, Torabian A (2013) Formulation of qualitative index of urban wastewater with Wastewater reuse approach. *Journal of Environmental Science and Technology* 21(4) (In Persian)
- Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI) (2016) Plans for the use of treated wastewater in irrigation. No. 21876-2
- Jahani A (2010) A Look at the reuse plans for urban effluents in Iran. *Journal of Water and Environment* 77 (In Persian)
- Keckler S (1998) A materials reuse model. M.Sc. Thesis, University of Texas at Austin
- Ministry of Energy of Iran (2006) Guidelines for quality classification of raw water, effluent, and reused water for industrial and recreational use. No. 462
- Mulvihill ME, Dracup JA (1974) Optimal timing and sizing of a conjunctive urban water supply and wastewater system with nonlinear programming. *Journal of Water Resources* 10(2):171-175