Archive of SID

تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۸
Volume 15, No. 4, Winter 2020 (IR-WRR)
۲۷۳-۲۸۱

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

اصغر جهانی بهنمیری[۱*]، ناصر مهردادی[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 نظرگرفتن محدودیتهای فنی، اقتصادی و زیست محیطی و همچنین کمینه کردن استفاده از آب خام موجود می‌باشد. با حل یک مساله کاربردی، کارآیی 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

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.

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

A. Jahani-Bahnamiri[1], N. Mehrdadi[2], Gh. Nabi-Bidhendi[3], and M. Hosseinzadeh[4]*

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

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: ghhendi@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

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

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 تأمین 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 جوابگویی 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 زیست محیطی 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 تأمین 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 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 نظرگرفتن هزینه‌های تصفیه و انتقال در فرم خطی مدل کردند. Mulvihil 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 قرارداده 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 اکولوژی 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 مجدد 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 این‌حال، 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 سیستم-های اطلاعات جغرافیایی برای یافتن منابع بالقوه آب بازیافتی و تقاضاهای آن در یک محیط شهری را ارائه داده است.

www.SID.ir

Archive of SID

در ایران تحقیقاتی کــه در زمینه استفاده مجدد از فاضلاب انجام شده است، بیشتر بــه بــررسی مسائل فنی مسأله پرداخته و کمتر بــه جنبه‌های مــدیــریتی تــوجــه 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.

علی رغم 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 بعنوان 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 برای رسیدن به جواب طی می کند: ۱- امکان‌سنجی: به معنی بررسی امکان انتقال پساب تولیدی به مصرف کننده با توجه به کیفیت آب مورد نیاز مصرف کننده 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 بعنوان نقاط ابتدایی و انتهایی خطهای انتقال تعریف گردیده، قوس‌ها یا کمان‌ها هم گره‌ها را به هم وصل می‌کنند. گره‌ها معمولا عرضه‌ها یا تقاضاها هستند، در حالی‌که 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 مصرف کنندگان 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 مبدا به مقصد، نرخ جریان است که معمولاً متغیر تصمیم‌گیری مسأله بهینه‌سازی می‌باشد. مدل بهینه‌سازی شبکه را می‌توان در فرم کلی زیر بیان کرد:

$$\text{Minimize: } \sum_{(i.j)\epsilon A} C_{i.j}\, x_{i.j}$$

$$\sum_{(j.k)\epsilon A} x_{j.k} - \sum_{(k.i)\epsilon A} x_{k.i} = b_k \quad \forall k \epsilon N \qquad (۱)$$

$$0 \le x_{i.j} \le U_{i.j} \forall (i.j) \epsilon A$$

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

$i.j \epsilon N$ گره‌های شبکه

$i.j \epsilon A$ قوس‌های شبکه

b_k تقاضای خالص گره k است $(\text{if } b_k \ge 0)$

$|b_k|$ میزان آب تامین شده خالص گره k است $(\text{if } b_k \le 0)$

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

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

$C_{i.j}$ هزینه جریان واحد روی arc(i.j)

$x_{i.j}$ نرخ جریان روی arc(i.j)

$U_{i.j}$ ظرفیت جریان روی arc(i.j)

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

www.SID.ir

Archive of SID

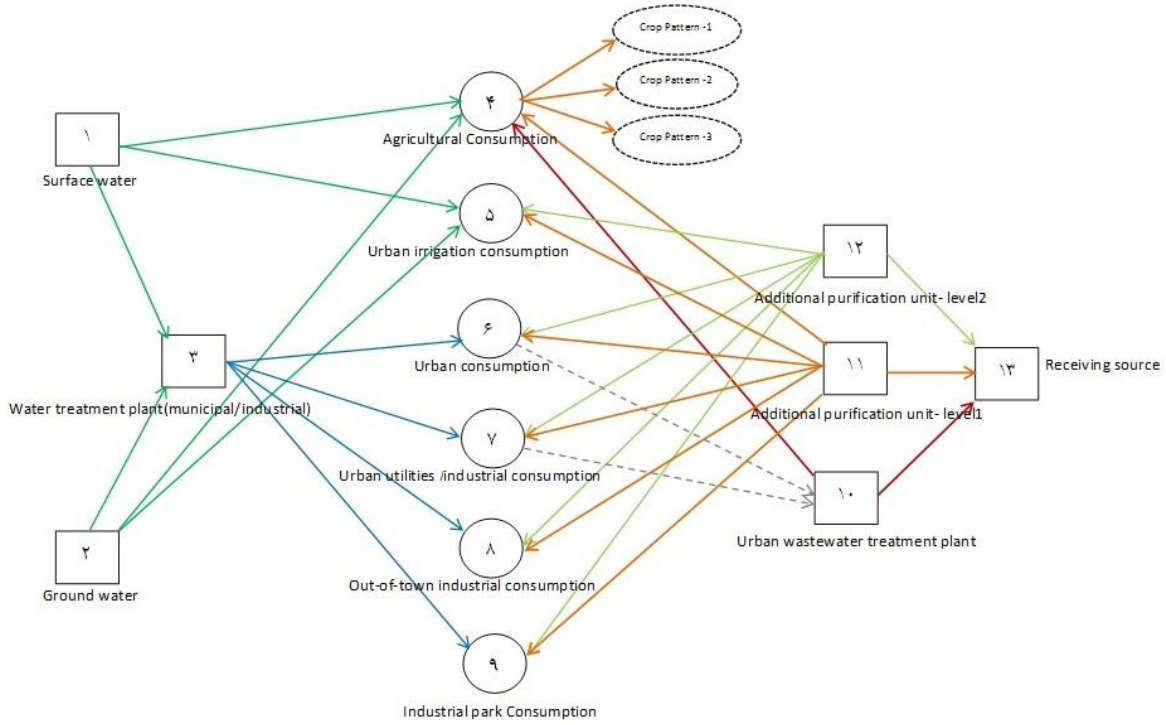

Fig. 1- Schematic diagram of water and wastewater allocation

شکل ۱- دیاگرام شماتیک جریان تخصیص آب و پساب

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 می‌شد 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 چون‌که 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:

$XSW_{i,j}$: 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 مصرف‌کننده j به گره تصفیه‌خانه فاضلاب h

$XWW_{j,r}$: میزان جریان فاضلاب از گره مصرف‌کننده 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 مصرف‌کننده j

واحدهای جریان مترمکعب در روز $(\frac{m^3}{day})$ می‌باشد.

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۳- پارامترها و داده‌های ورودی مورد نیاز

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

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_l: میزان تلفات آب در تصفیه‌خانه‌های آب یا فاضلاب l

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 (مصرف کننده) 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 مصرف کننده 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 همانطوری‌که قبلا توصیف شد برحسب مترمکعب در روز می‌باشد.

۲-۴- قیدهای مدل

۲-۴-۱- قید تقاضا

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

$$\left(\sum_{i\epsilon SW} XSW_{i,j} + \sum_{k\epsilon GW} XGW_{k,j} + \sum_{l\epsilon WTP} XTW_{l,j} + \sum_{h\epsilon WWTP} XTWW_{h,j} + EXS_j\right) \geq DEM_j \quad \forall j\epsilon US \qquad (۲)$$

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.

$$\left(\sum_{i\epsilon SW} XSW_{i,j} + \sum_{k\epsilon GW} XGW_{k,j} + \sum_{l\epsilon WTP} XTW_{l,j} + \sum_{h\epsilon WWTP} XTWW_{h,j} + XS_j - \sum_{h\epsilon WWTP} XWW_{j,h} - \sum_{r\epsilon RS} XWW_{j,r}\right) = NDL_j \quad \forall j\epsilon US \qquad (۳)$$

۲-۴-۳- 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:

$$\sum_{i\epsilon SW} XSW_{i,l} + \sum_{k\epsilon GW} XGW_{k,l} \leq CAP_l \quad l\epsilon WTP \qquad (۴)$$

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

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

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

$$CAP_{h_2} \leq CAP_{h_1} - \sum_{h_1\epsilon WWTP} XTWW_{h_1,j}$$

$$\sum_{h_3\epsilon WWTP} XTWW_{h_3,j} = CAP_{h_3} \qquad (۵)$$

$$CAP_{h_3} = CAP_{h_2} - \sum_{h_2\epsilon WWTP} XTWW_{h_2,j}$$

$$\sum_{h_1\epsilon WWTP} XTWW_{h_1,j} + \sum_{h_2\epsilon WWTP} XTWW_{h_2,j} + \sum_{h_3\epsilon WWTP} XTWW_{h_3,j} \leq CAP_{h_1}$$

www.SID.ir

Archive of SID

۲-۴-۴- قید الزامات کیفیت

الزامات کیفیت مورد نیاز مصرف کننده‌ها: این قیدها 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 قیدها 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 درجریان مخلوط بیش از حد بیشینه مورد نظرکاربر نباشد. فرمت قطعی این قیدها (محدودیتها) به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}&[\sum_{i\epsilon SU} CS(P_n)_i XSW_{i,j} + \sum_{k\epsilon GR} CG(P_n)_k\, XGW_{k,j} \\ &+ \sum_{l\epsilon WTP} CTW(P_n)_l\, XTW_{l,j} \\ &+ \sum_{h\epsilon WWTP} CTWW(P_n)_h\, XTWW_{h,j}] \\ &- STD(P_n)_j\,[\sum_{i\epsilon SU} XSW_{i,j} \\ &+ \sum_{k\epsilon GR} XGW_{k,j} + \sum_{l\epsilon WTP} XTW_{l,j} + \sum_{h\epsilon WWTP} XTWW_{h,j}] \\ &\leq 0 \qquad \forall j.\, n\end{aligned} \tag{۶}$$

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:

$$\text{Minimize: } C(X) = C_{(WWTP)} + C_{(Pumping)} + C_{(Infrastructure)} \tag{۷}$$

که در آن $C_{(WWTP)}$: هزینه‌های تصفیه فاضلاب تا سطح مشخص جهت استفاده مجدد یا تخلیه به محیط، $C_{(pumping)}$: هزینه‌های پمپاژ ناشی از مصرف انرژی در انتقال آب و $C_{(infrastructure)}$: 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 مصرف‌کننده 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 اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD)، مواد جامد محلول (TDS) و کلیفرم گرماپای 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 تفرجی» (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 MATLAB (fmincon) انجام شده است که قابلیت حل مسائل بهینه‌سازی با قیدهای خطی و غیرخطی را دارد. برای اطلاعات ورودی داده شده به مدل، تخصیص این منابع تحت قیدهای مختلفی چون تقاضا، کیفیت، ظرفیت و بیلان شبکه بهینه گردیده است. در جدول ۳ نتایج مدل براساس اطلاعات داده شده ارائه شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

Table 1- Consumer specifications and demands

جدول ۱- مشخصات مصرف‌کننده‌ها و تقاضاها

User	Current water source	Demand ($\frac{m^3}{day}$)	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 Qasem dam	32800	15	293	5	8.1	200	500	25	20	1875	5
limitedgreen space irrigation (j_3)	(i_6) well	2470	5	300	0	2	200	500	25	20	1840	4.3
unlimitedgreen space irrigation(j_4)	(i_6) well	3560	5	300	0	2	10	500	10	10	1840	4.3
Yasooj steel factory (j_5)	(i_7) well	40000	5	350	1	3	100	200	10	10	1990	11
Margoon cement factory (j_6)	(i_8) well	190	2	350	0	2	200	1000	100	75	238	7.52
Yasooj cement factory (j_7)	(i_9) well	820	5	381	0	2	200	1000	100	75	2122	8.15
Yasooj industrial park No.1 (j_8)	(i_{10}) well	13700	0	303	0	9.1	100	500	20	25	1766	24.2
Yasooj industrial park No.2 (j_9)	(i_{11}) well	820	5	300	0	2	100	500	10	20	1848	9
Yasooj industrial park No.3 (j_{10})	(i_{12}) well	3290	5	247	27	9.3	100	500	20	25	1778	28.2
Yasooj industrial park No.4 (j_{11})	(i_{13}) well	3560	1	300	0	1	100	500	20	25	2140	7.18
Delibejak industrial area (j_{12})	(i_{14}) well	3560	0	350	0	1	100	500	10	20	2265	2.17
Amirabad industrial area(j_{13})	(i_{15}) 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)

جدول۳- ماتریس نتایج تخصیص بهینه آب و پساب با کمینه شدن هزینه‌های 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		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
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
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

www.SID.ir

Archive of SID

i_1 تا i_3 منبع پساب تخصیص یافته و i_4 تا i_{15} منابع آب تخصیص یافته می‌باشند، همانگونه که در نتایج خروجی مدل در جدول فوق مشخص است، پساب تصفیه‌خانه تکمیلی سطح ۱ به مصرف‌کننده‌های j_3 (آبیاری فضای سبز محدود)، j_8 (شهرک صنعتی شماره ۱ یاسوج) و j_{10} (شهرک صنعتی شماره ۳ یاسوج) و پساب تصفیه‌خانه تکمیلی سطح ۲ نیز به مصرف کننده‌های j_3 (آبیاری فضای سبز محدود)، j_4 (آبیاری فضای سبز نامحدود) و j_8 (شهرک صنعتی شماره ۱ یاسوج) اختصاص یافت. میزان آب تخصیصی از منابع i_4 تا i_{15} 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 آنجایی‌که 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 رفه 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 درنظر 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 آنجایی‌که تعریف شده بود که از پساب تصفیه‌خانه اصلی صرفاً به دو مصرف کننده 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 می شود. از طرفی در این مدل توسعه‌یافته، تعیین حجم یا ظرفیت بهینه واحدهای تصفیه تکمیلی ۱ و ۲ بعهده 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 (درواقع 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

www.SID.ir

Archive of SID

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, Hosseinzedeh 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

Mulvihil 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

www.SID.ir