International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2017)

September 2017, Volume 28, Number 4
Pp 633- 647

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

A robust Optimization Model for Designing Reverse Water Network for Agricultural Purposes (Case Study: Tehran Province)

Hojjat Ahmadikord, Saeed Yaghoubi*, & Abdolhakim Taghanzadeh

Hojjat Ahmadikord, *MSc of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of science & Technology*
Saeed Yaghoubi, *Assistant Professor of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of science & Technology*
Abdolhakim Taghanzadeh, *MSc of Industrial Engineering, School of Industrial Engineering, Iran University of science & Technology*

Keywords

Robust optimization;
Reverse network design;
Tehran province;
Wastewater

ABSTRACT

In this paper, a robust optimization model is proposed for collecting and transmissing wastewater network to agricultural areas. That includes the location of wastewater treatment plant and storage tanks as well as decisions on canals construction and allocation wastewater to agricultural areas. At first, a deterministic model is presented for determining the location and allocation decisions and this model by taking the uncertainty in demand of wastewater parameters and wastewater production, has been then developed based on robust optimization approach. In addition, environmental and human healthissues have been considered in the model by using the qualities of the produced waste. Finally, to validate the model, a case study in Tehran province that its data received from the relevant organizations, has been anylized.

© 2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 4, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۸، زمستان ۱۳۹۶
صفحـــه ۶۳۴- ۶۴۷

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

ارائه مدل بهینه‌سازی استوار طراحی شبکه معکوس آب برای مصارف کشاورزی (مطالعه موردی: استان تهران)

حجت احمدی‌کرد، سعید یعقوبی* و عبدالحکیم طاغان‌زاده

کلمات کلیدی

بهینه‌سازی استوار،
شبکه معکوس آب،
بهینه‌سازی فازی،
استان تهران،
پساب

چکیده:

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی استوار به منظور طراحی شبکه جمع‌آوری و انتقال پساب شهری ارائه شده است، که شامل مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب و حوضچه‌ذخیره پساب و نیز تصمیم‌گیری پیرامون احداث کانال و تخصیص بهینه پساب تصفیه شده به مناطق کشاورزی می‌باشد. در ابتدا یک مدل قطعی جهت مشخص کردن تصمیمات مکان‌یابی و تخصیص ارائه شده و سپس این مدل با در نظر گرفتن عدم‌قطعیت در پارامترهای تقاضای پساب و تولید فاضلاب، با استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار توسعه داده شده است. به علاوه، مباحث زیست محیطی و سلامت انسان نیز با درنظرگرفتن کیفیت‌های پساب تولیدی در مدل لحاظ شده است. درنهایت برای اعتبارسنجی، مدل بر روی مطالعه موردی استان تهران که داده‌های آن برگرفته از سازمان‌های ذیربط می‌باشد، مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار گرفته است.

۱. مقدمه

در سالیان اخیرکشور ایران، مشابه اکثر کشورهای جهان، درگیر کمبود آب‌شیرین شده است. عوامل بسیاری زمینه‌ساز و تشدیدکننده چنین بحرانی می‌باشند. ازجمله این عوامل می‌توان به رشد سریع جمعیت در مناطق شهری، تغییرات الگوی آب و هوایی، خشکسالی های پی‌درپی و نیز مهم‌تر از همه این عوامل، مدیریت ناصحیح منابع آب موجود، اشاره کرد[۱]. ضرورت تامین آب شرب و کاهش شدید منابع آب شیرین سبب شده است که تصمیم‌گیران این حوزه با چالش‌های بزرگی روبرو شوند و در سال‌های اخیر به ناچار برای پاسخگویی کامل به تقاضای آب شرب، از حق‌آبه‌های سایر مصارف از جمله کشاورزی کاسته و بر حق‌آبه مصارف شهری افزوده‌اند[۲].اما از طرفی رشد بخش کشاورزی بستر اصلی رشد اقتصاد هر کشور و یکی از ارکان خودکفایی و توسعه پایدار به شمار می‌آید که نیازمند توجه هر چه بیشتر می‌باشد.

تاریخ وصول: ۹۴/۴/۱۵

تاریخ تصویب: ۹۶/۹/۱

حجت احمدی‌کرد ، دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، ahmadikord@ind.iust.ac.ir

عبدالحکیم طاغان‌زاده ، دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، h_taghanzadeh@ind.iust.ac.ir

*نویسنده مسئول مقاله: **سعید یعقوبی**، استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، yaghoubi@iust.ac.ir

از سویی با توجه به بحران آب پیش‌رو امکان انجام فعالیت‌های کشاورزی با منابع آب موجود در آینده نزدیک نخواهد بود و در نتیجه با توجه به رشد جمعیت و نیاز روز افزون به غذا، امنیت غذایی انسان‌های بسیاری به خطر خواهد افتاد[۳]. امروزه تلاش برای کاهش مصرف از منابع محیط زیست و استفاده بهینه از آن از سیاست های اصلی کشورهای در حال توسعه و توسعه یافته می باشد و تحقیقات مناسبی در این زمینه صورت گرفته است[۴]. در چنین شرایطی موضوع استفاده از منابع آبی نامتعارف همچون پساب قوت بیشتری می‌گیرد. گسترش شهرها باعث افزایش تولید فاضلاب و ایجاد ظرفیتی بالقوه جهت تامین بخشی از نیاز آب شیرین برای مصارف شهری و کشاورزی شده است در نتیجه این موضوع یکی از مباحث مطرح شده در محافل علمی و سیاسی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد که موافقان و مخالفانی دارد. حجم عظیم پساب تولیدی و در دسترس بودن آن از نقاط قوت و احتمال آلودگی‌های میکروبی، صنعتی و تأثیرات بد احتمالی بر محیط از نقاط ضعف می‌باشد[۵]. تحقیقات انجام شده نشان داده است که استفاده از پساب در صورتی که به صورت استاندارد تصفیه شود نه تنها برای محیط ضرری نخواهد داشت بلکه گامی بزرگ در جهت حفظ منابع آب خواهد بود[۶]. از این رو محققین به دنبال برنامه‌ریزی و مدل‌سازی برای طراحی شبکه جمع‌آوری پساب و انتقال آن به نقاط تقاضا می باشند. ارائه مدل‌های بهینه‌سازی برای

سیستم‌های جمع‌آوری پساب منطقه‌ای تقریبا از دهه ۶۰ میلادی با مقاله دنینگر[۷] آغاز شد، که از برنامه‌ریزی خطی برای طراحی سیستم جمع‌آوری پساب و انتقال آن استفاده کرده است. مدل وی بسیار ساده و ابتدایی می‌باشد، پس از آن اسمیرز و تایتکا[۸] با الهام از تحقیقات قبلی و توسعه آن‌ها از برنامه‌ریزی غیرخطی برای این کار استفاده کرد. کانورس [۹] و کلمستون و گرنی [۱۰] با تاکید بر تاثیر رشد جمعیت در تولید فاضلاب، از برنامه‌ریزی پویا جهت تفسیر نقش جمعیت در تولید فاضلاب و طراحی سیستم جمع‌آوری فاضلاب استفاده کردند. بریل و ناکامورا [۱۱] از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط برای این منظور بهره بردند، وی در تحقیق خود برای اولین بار مکان‌یابی را نیز وارد کرده است. در مدلی که آن‌ها ارائه داده‌اند مکان تصفیه‌خانه نسبت به مراکز جمعیتی مشخص می‌شود. در ادامه با افزایش استفاده از روش‌های ابتکاری در حل مدل‌های ریاضی به تدریج در این حوزه نیز مورد استفاده قرار گرفتند. لوریا[۱۲]، ویتر و بلاردی[۱۳] روش‌های ابتکاری را برای اولین بار جهت طراحی شبکه تصفیه و انتقال پساب استفاده کردند. با انجام این تحقیقات، حوزه وسیعی برای محققین جهت توسعه مدل‌های ابتدایی معرفی شده بوجود آمد. از سویی به تدریج با پر رنگ شدن نقش پساب در آینده بخش کشاورزی، محققان زیادی نیز بر تاثیرات کیفی احتمالی پساب بر محیط تاکید و در این زمینه به مطالعه پرداختند. اگرافیوتی و دیاماتوپولوس[۱۴] با تهیه یک یک طرح استراتژیکی به امکان‌سنجی استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری محصولات کشاورزی پرداخته‌اند. سوزا و همکاران [۱۵] در مقاله خود مدلی جهت طراحی شبکه فاضلاب و مکان‌یابی تصفیه‌خانه ارائه داده‌اند که برای مشخص کردن مکان‌های بالقوه تصفیه‌خانه‌ها از سیستم کامپیوتری اطلاعات جغرافیایی و نیز برای حل آن از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند. کان‌ها و همکاران [۱۶] نیز نتایج تحقیق خود را برای بهینه‌سازی سیستم فاضلاب منطقه‌ای به صورت مدل ریاضی ارائه کردند، هدف مدل آنها طراحی بهینه شبکه انتقال فاضلاب و همچنین مکان‌یابی جهت احداث تصفیه‌خانه می‌باشد. آنها بر این موضوع تاکید داشتند که طراحی شبکه فاضلاب بدون در نظر گرفتن مباحث اقتصادی و زیست محیطی، از اعتبار کمی برخوردار خواهد بود در نتیجه در تحقیق خود به صورت هم زمان مباحث اقتصادی، زیست محیطی و همچنین تکنیکی را در نظر گرفته و برای حل مدل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید استفاده نموده‌اند و نیز جهت اعتبار سنجی نتایج مدل، آن را بر روی داده‌های سه مطالعه موردی متفاوت پیاده‌سازی کرده و نتایج را مقایسه نمودند. ژنگ چنگیو[۱۷] در تحقیق خود بر توسعه مدل‌های ریاضی برای برنامه‌ریزی استفاده مجدد از فاضلاب تاکید نمودند، آن‌ها به این موضوع توجه داشتند که در دنیای واقعی برخی پارامترهای موجود در مسأله می‌توانند تحت تأثیر عدم قطعیت واقع شوند، در نتیجه در مقاله خود تقاضای پساب را به عنوان پارامتر غیر قطعی در نظر گرفته و از برنامه‌ریزی احتمالی دومرحله‌ای برای مدلسازی آن استفاده کردند. با کمک مدل پیشنهادی آن‌ها می‌توان به برنامه‌ریزی استفاده مجدد از فاضلاب در سیستم‌های آب شهری جهت دستیابی به منابع آب پایدار پرداخت. چن و همکاران[۱۸] با انجام یک تحقیق به صورت مطالعه بر روی یک منطقه کشاورزی در پکن بر این موضوع تاکید کردند که حفاظت از محیط زیست و ایمنی آبیاری کشاورزی به وسیله فاضلاب تصفیه شده از موارد بسیار مهم می‌باشد که در صورت تصفیه نادرست، باعث انباشته شدن برخی عناصر خطرناک در خاک و به خطر افتادن سلامت محصولات کشاورزی خواهد شد. وانگ و جیمسون [۱۹] در مقاله خود مدلی ارائه کردند که هدف آن کمینه‌سازی هزینه‌های مکان‌یابی تصفیه‌خانه فاضلاب به کمک الگوریتم ژنتیک می‌باشد. آن‌ها در مدل خود به موضوعات زیست محیطی طراحی شبکه فاضلاب توجه نداشتند، استفاده از مفهوم شبکه‌های عصبی مصنوعی از تفاوت‌های مقاله آن‌ها با سایر تحقیقات می‌باشد. مدل پیشنهادی بر روی حوضه رودخانه تیمز در جنوب انگلیس مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج، کارایی بالای مدل را نشان می‌دهد. داندی و همکاران [۲۰] در مقاله خود به ارائه رویکردی برای بهینه‌سازی سیستم آب آشامیدنی و فاضلاب در یکی از مناطق شهر ملبورن کشور استرالیا با در نظر گرفتن جمعیت منطقه مسکونی پرداختند. آن‌ها سیستم آب آشامیدنی و جمع‌آوری فاضلاب را در یک سطح در نظر گرفته و در طرح خود سعی در ترکیب دو مدل توزیع و جمع آوری کردند به طوری‌که مکان تصفیه‌خانه‌ها با بیشترین سازگاری ممکن نسبت به دو حالت انتخاب شوند از طرفی سه سناریوی مختلف برای طراحی شبکه انتقال آب و جمع آوری فاضلاب ارائه داده و به مقایسه آن‌ها در ساعات اوج مصرف آب شرب که همان ساعات اوج تولید فاضلاب می‌باشد پرداخته‌اند. بکرا و همکاران [۲۱] یک مقاله مروری در مورد موضوع استفاده مجدد فاضلاب در آبیاری کشاورزی از منظر مفاهیم سلامت انسان و محیط زیست ارائه داده‌اند. آن‌ها در تحقیق خود بیان داشتند که استفاده مجدد از پساب تصفیه شده بخاطر در دسترس بودن و داشتن صرفه اقتصادی مورد علاقه دولت‌ها می‌باشد اما استفاده از پساب تصفیه شده ممکن است پیامدهایی در دو سطح داشته باشد. اول اینکه باعث ایجاد اثرات مخرب بر محیط زیست در دراز مدت شود و دوم اینکه خطرات جدی برای سلامت انسان به وجود آورد. سشادری و همکاران [۲۲] به بررسی اثرات آبیاری کشاورزی به وسیله پساب‌های شهری پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود با تاکید براینکه بزرگترین مصرف کننده پساب‌های شهری استرالیا بخش کشاورزی می‌باشد سعی در بررسی راه‌کارهایی جهت کاهش اثرات آلودگی پساب بر اراضی را دارند. ایشان با تمرکز بر مطالعه خود به صورت موردی اطلاعات را

جمع‌آوری و نتایج را مورد تحلیل قرار دادند. اهمیت و بحرانی بودن مسئله تامین آب، آگودلو ورا و همکاران [۲۳] را بر آن داشته تا پژوهش خود را با تمرکز بر ماهیت قطعی نبودن تقاضا انجام دهند. پیشنهاد تست استرس بر روی استواری سیستم توزیع آب آشامیدنی موجود با تغییر تقاضاها به منظور یافتن اثرات میزان تقاضای نهایی در سناریوهای مختلف از ویژگی های بارز این تحقیق به شمار می آید. همچنین عملکرد شبکه با در نظر گرفتن معیارهای فشار شبکه، کیفیت آب و تامین همیشگی و پیوسته ارزیابی شده است. ویرا و کانها [۲۴] از رویکرد بهینه سازی آشیانه به منظور حل مسئله افزایش ظرفیت سیستم تامین آب چند کیفیتی استفاده کردند. این مسئله شامل مکانیابی احداث و بازسازی زیرساخت ها در زمان معین و در محدوده تصمیمات استراتژیک است. ایشان با در نظر داشتن عدم قطعیت ذاتی مسئله، از رویکرد برنامه ریزی سناریویی برای رفع این چالش استفاده کرده اند.

با توجه به محدود بودن فضا ادبیاتی کوتاه که روند مطالعات انجام شده را به خوبی روشن می‌سازد ارائه شده است حال با دقت در آن می‌توان به این نتیجه رسید که موضوع طراحی شبکه به کمک مدلسازی ریاضی اگرچه از مدت‌ها پیش شروع شده است اما در نظر نگرفتن همه ابعاد مسأله سبب شده است که مدل‌های ارائه شده ساده و ابتدایی باشند و از عمومیت کافی جهت تعمیم به مسائل دیگر برخوردار نباشند. از طرفی با توجه به واقعی بودن تحقیقات این حوزه و کاربردی بودن نتایج آن، در نظر نگرفتن شرایط عدم قطعیت با رویکردی مناسب از خلاءهای دیگر این تحقیقات می‌باشد. از دیگر کاستی‌های تحقیقات این حوزه می‌توان به مدل نکردن پارامترهای مهم معرفی شده در مطالعات کیفی همچون کیفیت پساب تولیدی اشاره کرد.

با توجه به تحقیقات انجام شده و بیان کاستی‌های موجود در این مقاله سعی شده است شکاف‌های تحقیقاتی در حد توان پوشش داده شود. نوآوری های تحقیق شامل موارد زیر می باشد:

- درنظر گرفتن تصفیه و انتقال پساب در کیفیت‌های مختلف با توجه به نیاز مناطق کشاورزی.
- تصمیم‌گیری پیرامون احداث حوضچه‌ذخیره در نزدیکی محل تقاضا برای ذخیره پساب در فصول پر آب و تحویل آن در فصول کم آب.
- ارائه مدل یکپارچه با در نظر گرفتن اجزای شبکه و مکانیابی و تخصیص به صورت همزمان.
- به کار بردن بهنه سازی استوار(ستونی) برای مدلسازی.
- استفاده از داده های شهر تهران و شهرستان های جنوبی استان تهران به عنوان مطالعه موردی.

به عبارت دیگر مدلی جامع جهت طراحی شبکه جمع آوری و انتقال پساب ارائه شده است به گونه‌ای که مکان‌یابی تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره را به صورت همزمان با تخصیص پساب انجام می‌دهد و نیز می‌تواند با توجه به تقاضای مناطق کشاورزی پساب با کیفیت‌های مختلف تصفیه و تحویل دهد. از طرفی با توجه عدم قطعیت موجود در دنیای واقعی و تاثیری که در دو پارامتر تولید فاضلاب در مناطق شهری و تقاضای پساب می‌تواند داشته باشد اقدام به غیر قطعی در نظر گرفتن این دو پارامتر کردیم. یکی از مهمترین تصمیماتی که در شبکه زنجیره گرفته می شود مساله ی کارایی و اثربخشی این زنجیره و متغیرهای دارای عدم قطعیت است. عدم قطعیت در زنجیره تامین منجر به غیر بهینه شدن تصمیماتی است که با فرض قطعیت گرفته می شوند[۲۵]. با توجه به نوع عدم قطعیت و دلایلی که دو محقق به نام‌های داگلاس خوزه و رینالدوموربیت برای استفاده از بهینه‌سازی استوار ذکر کردند و انطباق آن با مسأله این تحقیق، ما نیز از این روش برای مدلسازی مسأله استفاده می کنیم. از سوی دیگر در دنیای واقعی در بسیاری از موارد توزیع احتمالی پارامترهای غیر قطعی مشخص نیستند و استفاده از رویکردهای بهینه سازی استوار ضروری به نظر می رسد. به علاوه در صورت وجود داده های کافی برای تخمین توزیع پارامتر غیر قطعی درجه پیچیدگی مدلسازی افزایش می یابد و اغلب برای حل مدلبندی های احتمالی باید به روش های فراابتکاری یا ابتکاری روی آورد.[۲۶]

همچنین آلم و مرابیتو[۲۷] برای استفاده از بهینه‌سازی استوار دلایل زیر را مطرح کرده اند:

۱- بهینه‌سازی استوار نسبت به رویکرد احتمالی از لحاظ حل مدل راحت‌تر است.
۲- دانش واضحی از توزیع احتمالی از داده‌های دارای عدم قطعیت نیاز نیست و از داده‌های تاریخی و تجربه‌های تصمیم‌گیرنده می‌توان برای استنتاج بازه‌ی دارای عدم قطعیت استفاده کرد.

در ادامه، مقاله به صورت زیر سازماندهی شده‌است: در بخش دوم، ابتدا مدل بهینه‌سازی قطعی جهت طراحی شبکه برای انتقال پساب تشریح و سپس با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل استوار تشریح شده است. در بخش سوم، اطلاعات استان تهران به عنوان مطالعه موردی ارائه شده است. در نهایت، در بخشهای چهارم و پنجم نتایج محاسباتی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی آمده است.

۲. مدل ریاضی

دراین بخش، ابتدا به تشریح مسأله تحقیق می‌پردازیم، سپس مفروضات، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله معرفی می‌گردد. در پایان پس از معرفی مختصر بهینه‌سازی استوار، مدل استوار این مقاله ارائه می‌گردد.

۲-۱. بیان مسأله

در این مقاله سعی شده است با توجه به تولید حجم زیاد فاضلاب در شهرها، مدل ریاضی جهت طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری، تصفیه و انتقال آن به مناطق کشاورزی بپردازیم. اهمیت این موضوع به ویژه در کشورهای با آب‌هوای خشک و نیمه خشک همچون کشور ما از آن جهت است که با رشد کلان‌شهرها و الزام پاسخگویی به نیار آب شرب آنها دیگر مجالی برای کشاورزی با منابع آب موجود نخواهد بود. محققان به این نتیجه رسیده‌اند که تنها با استفاده از آب‌های غیر متعارف همچون فاضلاب و پساب می‌توان کمبود آب کشاورزی را جبران کرد. شبکه مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. بدین‌گونه که در آن فاضلاب مناطق مسکونی با انتقال به تصفیه‌خانه از آلودگی های شهری و بهداشتی پاک شده و با توجه تقاضای مناطق کشاورزی به کیفیت‌های مختلفی تصفیه می‌شود، پس از آن این پساب‌ها به حوضچه‌هایی که در نزدیکی نقاط تقاضا هستند منتقل می‌شوند و با توجه به کیفیت، به صورت مجزا ذخیره می شوند، سپس بر اساس نیاز به مناطق کشاورزی منتقل می‌شوند. شبکه مورد بررسی در این مقاله به صورت شکل(۱) می‌باشد.

۲-۲. مفروضات

۱- در این مسأله تعدادی قطب جمعیتی معرفی می‌شود که هرکدام می‌توانند شامل تعدادی منطقه شهری و یا شهرهای کوچک باشند. ۲- چندین مکان بالقوه برای احداث تصفیه‌خانه‌ها وجود دارد. ۳- تعدادی منطقه کاندید برای احداث حوضچه ذخیره در نظر گرفته شده است. ۴- با محتمل شمردن امکان استفاده از لوله و کانال در شبکه‌های واقعی انتقال پساب به صورت همزمان ، بر امکان استفاده از هر دو تاکید شده است. ۵- با توجه به لزوم انتقال پساب از سطح شهر به مناطق کشاورزی، اجزای شبکه انتقال از تصفیه‌خانه به بعد در نظر گرفته و برای ورود فاضلاب به تصفیه‌خانه هزینه‌ای پیش‌بینی نشده‌است و تنها میزان فاضلاب ورودی به هر تصفیه‌خانه توسط مدل مشخص می‌شود. ۶- تقاضای پساب با در نظر گرفتن میزان کشت محصولات مختلف به کیفیت‌های مختلف تفکیک شده است.۷ - هر تصفیه‌خانه می‌تواند باتوجه به نیاز چند نوع کیفیت پساب تولید و در پایان دوره ذخیره کند. ۸- در این مسأله فصول سال به عنوان دوره‌های زمانی جهت برنامه ریزی تخصیص پساب در نظر گرفته شده‌اند. ۹- با توجه به افزایش تقاضا در بعضی از فصول سال ایجاد حوضچه های ذخیره جهت نگهداری پساب برای فصول کم باران و تقسیم آن ضروری می باشد. ۱۰- هر حوضچه در صورت تاسیس می‌تواند در صورت نیاز کیفیت های مختلف پساب را به صورت مجزا نگهداری کند.

۲-۳. مجموعه‌ها

I : مجموعه نقاط بالقوه جهت تاسیس تصفیه خانه.

J : مجموعه نقاط بالقوه جهت تاسیس حوضچه ذخیره آب.

R : مجموعه قطب‌های تولید فاضلاب

T : مجموعه دوره های زمانی(فصلهای سال)

Q : مجموعه کیفیت‌های پساب مورد تقاضا.

K : مجموعه نقاط تقاضای پساب جهت کشاورزی.

R_i : مجموعه تصفیه خانه های(i های) متعلق به قطب R.

۲-۴. پارامترها

F_i : هزینه ثابت احداث تصفیه خانهi.

G_j : هزینه ثابت احداث حوضچه ذخیره jام.

A_{ijq} : هزینه ثابت احداث یک متر کانال(یا لوله) بین تصفیه خانه i و حوضچه ذخیره jبرای انتقال پساب با کیفیت q.

B_{jkq} : هزینه ثابت احداث یک متر کانال(یا لوله) بین حوضچه ذخیره jو منطقه تقاضای k از نوع پساب با کیفیت q.

φ_{iq} : هزینه نگهداری هر متر مکعب پساب در پایان دوره در تصفیه خانه i با کیفیت q.

ψ_{jq} : هزینه نگهداری هر متر مکعب پساب در پایان دوره در حوضچه ذخیره jبا کیفیت q.

h_{iq} : هزینه تصفیه هر متر مکعب فاضلاب در تصفیه خانه i با کیفیت q.

z_{jq} : هزینه عملیاتی هر متر مکعب پساب در حوضچه ذخیره jبا کیفیت q.

c_{ij}^1 : هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از تصفیه خانه i به حوضچه ذخیره j.

l_{ij}^1 : فاصله بین تصفیه خانه i و حوضچه ذخیرهj.

l_{jk}^2 : فاصله حوضچه ذخیره jو منطقه تقاضایk.

c_{jk}^2 : هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از حوضچه ذخیره j به منطقه تقاضایk.

$il0_{iq}^1$: موجودی پساب نوع q در تصفیه خانه i در ابتدای دوره برنامه ریزی.

cli_{iq} : ظرفیت نگهداری پساب نوع q در پایان دوره در تصفیه خانهi .

ci_i : ظرفیت عملکردی تصفیه خانهi.

$il0_{jq}^2$: موجودی پساب نوع q درحوضچه ذخیرهj در ابتدای دوره برنامه ریزی.

d_{jkq} : تقاضای منطقه کشاورزی k از پساب نوع q در دورهt .

cj_{jq}: ظرفیت نگهداری پساب نوع q در حوضچه ذخیره j.

λ: ضریب هدر رفت آب در شبکه.

γ: عدد تبدیل یک دوره زمانی بر حسب ثانیه.

۲-۵. متغیرهای تصمیم

s_{it}: مقدار فاضلاب ورودی به تصفیه خانه i در دوره t.

x_{ijqt}: حجم پساب انتقالی نوع q از تصفیه‌خانه i به حوضچه ذخیره j در دوره t.

y_{jkqt}: حجم پساب انتقالی نوع q از حوضچه ذخیره j به منطقه تقاضای کشاورزی k در دوره t.

il^1_{iqt}: حجم پساب نوع q ذخیره شده در تصفیه‌خانه i در پایان دوره t.

p_{iqt}: مقدار پساب نوع q تولیدی در تصفیه‌خانه i در دوره t.

il^2_{jqt}: حجم پساب نوع q ذخیره شده در حوضچه ذخیره j در پایان دوره t.

deb^1_{ijqt}: دبی پساب انتقالی نوع q از تصفیه خانه i به حوضچه ذخیره j در دوره t.

deb^2_{jkqt}: دبی پساب انتقالی نوع q از حوضچه ذخیره j به منطقه تقاضای k در دوره t.

w_i: اگر تصفیه‌خانه در محل i تاسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

o_j: اگر حوضچه ذخیره در محل j تاسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

v_{ijq}: اگرکانال و یا لوله جهت انتقال پساب نوع q بین تصفیه‌خانه i و حوضچه ذخیره j تاسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

n_{jkq}: اگرکانال و یا لوله جهت انتقال پساب نوع q بین حوضچه ذخیره j و منطقه تقاضای کشاورزی k تاسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

۲-۶. تابع هدف و محدودیت‌ها

$$Min \sum_i F_i w_i + \sum_j G_j o_j + \sum_i \sum_j \sum_q A_{ijq} v_{ijq} l^1_{ij} + \sum_j \sum_k \sum_q B_{jkq} n_{jkq} l^2_{jk} + \sum_i \sum_q \sum_t \varphi_{iq} il^1_{iqt} + \sum_j \sum_q \sum_t \psi_{jq} il^2_{iqt} + \sum_i \sum_j \sum_q \sum_t w_i h_{iq} x_{ijqt} + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t o_j z_{jq} y_{jkqt} + \sum_i \sum_j \sum_q \sum_t c^1_{ij} x_{ijqt} + \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t c^2_{jk} y_{jkqt} \quad (۱)$$

$$il^1_{iqt} = il^2_{iqt-1} + p_{iqt} - \sum_j x_{ijqt} \quad (۲)$$
$$\forall i \in I, q \in Q, \forall t \in T, t \geq 2$$

$$il^1_{iqt} = il^2_{iqt-1} + p_{iqt} - \sum_j x_{ijqt} \quad (۳)$$
$$\forall i \in I, q \in Q, t = 1$$

$$il^2_{jqt} = il^2_{jqt-1} + \sum_i x_{ijqt}(1-\lambda) - \sum_k y_{jkqt} \quad (۴)$$
$$\forall j \in J, q \in Q, \forall t \in T, t \geq 2$$

$$il^2_{jqt} = il^2_{jqt-1} + \sum_i x_{ijqt}(1-\lambda) - \sum_k y_{jkqt} \quad (۵)$$
$$\forall j \in J, q \in Q, \ t = 1$$

$$\sum_q p_{iqt} = s_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (۶)$$

$$\sum_{i \in R_t} s_{it} \leq ph^r_t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (۷)$$

$$s_{it} \leq ci_i w_i \quad \forall i \in I, t \in T \quad (۸)$$

$$\sum_i x_{ijqt} \leq cj_{jq} o_j \quad \forall j \in J, q \in Q, t \in T \quad (۹)$$

$$\sum_j y_{jkqt}(1-\lambda) \geq d_{kqt} \quad \forall k \in K, q \in Q, t \in T \quad (۱۰)$$

$$x_{ijqt} \leq M v_{ijq} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \quad (۱۱)$$

$$y_{jkqt} \leq M n_{jkq} \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \quad (۱۲)$$

$$il^1_{iqt} \leq cli_{iq} w_i \quad \forall i \in I, q \in Q, t \in T \quad (۱۳)$$

$$il^2_{jqt} \leq cj_{jq} o_j \quad \forall j \in J, q \in Q, t \in T \quad (۱۴)$$

$$v_{ijq} \leq w_i \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (۱۵)$$

$$v_{ijq} \leq o_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (۱۶)$$

$$n_{ijq} \leq o_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \quad (۱۷)$$

$$p_{iqt}, x_{ijqt}, y_{jkqt}, il^1_{iqt}, il^2_{jqt}, s_{it} \geq 0 \quad (۱۸)$$

$$w_i, o_j, v_{ijq}, n_{ijq} \in \{0,1\} \quad (۱۹)$$

تابع هدف (۱)، مربوط است به مینیمم کردن هزینه‌ها که به ترتیب هزینه تأسیس تصفیه‌خانه، حوضچه ذخیره، احداث کانال یا

لوله بین تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره، احداث کانال یا لوله بین حوضچه ذخیره و منطقه تقاضا و همچنین هزینه عملیاتی تصفیه هر متر مکعب فاضلاب در تصفیه خانه و حوضچه ذخیره و نیز هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از تصفیه خانه به حوضچه ذخیره و از حوضچه ذخیره به مرکز تقاضا در نهایت هزینه نگهداری هر متر مکعب پساب در پایان دوره در تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره را شامل می‌شود. محدودیت (۲) پساب نوع q ذخیره شده در تصفیه خانه در پایان دوره دوم و بعد ازآن را نشان می‌دهد. محدودیت (۳) پساب نوع q ذخیره شده در تصفیه خانه در پایان دوره اول را نشان می‌دهد. محدودیت (۴) و (۵) نیز مشابه محدودیت‌های (۲) و (۳) برای حوضچه‌ها می‌باشند. محدودیت (۶) یک محدودیت تعادلی برای تبدیل فاضلاب ورودی به کیفیت های مختلف می‌باشد. محدودیت (۷) نشان می‌دهد حجم فاضلابی که به مجموعه تصفیه خانه‌های یک قطب وارد می‌شود باید از مقدار فاضلاب تولیدی قطب درآن دوره کمتر باشد. محدودیت (۸) نشان می‌دهد حجم فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه برای تبدیل شدن به کیفیت‌های مختلف باید از ظرفیت کلی تصفیه‌خانه کمتر باشد. محدودیت(۹) بیان می‌کندکه مجموع پساب نوع q ای که از تصفیه‌خانه‌ها به یک حوضچه ذخیره فرستاده می‌شود باید از ظرفیت آن نوع پساب در حوضچه کمتر باشد. محدودیت(۱۰) لزوم پاسخگویی به تقاضا را نشان می‌دهد. محدودیت(۱۱) نشان می‌دهد که اگر کانال(لوله) بین تصفیه خانه و حوضچه ذخیره احداث نشد پسابی منتقل نشود. محدودیت(۱۲) نشان می‌دهد که اگر کانال(لوله) بین حوضچه‌ذخیره و منطقه تقاضا احداث نشد پسابی منتقل نشود. محدودیت(۱۳) نشان می‌دهد در صورت تأسیس تصفیه‌خانه مقدار پساب ذخیره شده در پایان دوره از ظرفیت آن کمتر باشد. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد در صورت تأسیس حوضچه‌ذخیره مقدار پساب ذخیره شده در پایان دوره از ظرفیت آن کمتر باشد. محدودیت (۱۵) بیان می‌کند که اگر تصفیه خانه تاسیس نشد کانال(لوله‌ای) از آن خارج نشود. محدودیت (۱۶) و (۱۷) بیان می‌کنند که حوضچه ذخیره تاسیس نشد کانال(لوله‌ای) به آن وارد و خارج نشود. محدودیت (۱۸) و(۱۹) نیز متغیرهای مثبت و صفر و یک مدل را نشان می‌دهد.

۲-۷. خطی‌سازی

همانگونه که مشاهده می‌شود عبارت‌های $w_i x_{ijqt}$ و $o_j y_{jkqt}$ در تابع هدف مسأله به صورت غیر خطی می‌باشد. حال با توجه به مطالعه شرالی و آلامدین [۲۸] معادل خطی آن را می‌توان به صورت زیر نوشت: با جایگزینی عبارت $w_i x_{ijqt}$ با متغیر u^1_{ijqt} و عبارت $o_j y_{jkqt}$ با متغیر u^2_{jkqt} می‌توان عبارات غیر خطی را با اضافه‌کردن محدودیت‌های زیر به مدل خطی کرد:

$$u^1_{ijqt} \le x_{ijqt} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۰)$$

$$u^1_{ijqt} \le M w_i \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۱)$$

$$u^1_{ijqt} \ge M(w_i - 1) + x_{ijqt} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۲)$$

$$u^1_{ijqt} \ge 0 \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۳)$$

$$u^2_{jkqt} \le y_{jkqt} \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۲۴)$$

$$u^2_{jkqt} \le M o_j \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۲۵)$$

$$u^2_{jkqt} \ge M(o_j - 1) + y_{jkqt} \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۲۶)$$

$$u^2_{jkqt} \ge 0 \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۲۷)$$

۲-۸ بهینه‌سازی استوار

بهینه‌سازی استوار از روش‌های مقابله با عدم قطعیت می‌باشد که به دلیل سهولت استفاده و کاربردی بودن در دنیای واقعی در چند سال اخیر با اقبال محققین روبه رو شده است. در این مقاله پس از بررسی‌های انجام شده و مشورت با کارشناسان مشخص شده است که دو پارامتر تقاضای پساب و مقدار تولید فاضلاب دارای عدم قطعیت می‌باشند. و با توجه به استفاده از نظرات کارشناسان در بدست آوردن اطلاعات مطالعه موردی، توانستیم بازه تغییرات این دو پارامتر را مشخص کنیم در نتیجه بنابر بر مقاله آلم و مرابیتو[۲۷] استفاده از بهینه‌سازی استوار برای بیان عدم قطعیت موجود در این مقاله مفید خواهد بود. دو روش بهینه‌سازی استوار سطری و ستونی وجود دارد که با توجه به واقع شدن عدم قطعیت در هر یک از پارامترها و موقعیت آن پارامتر در مدل می‌توان از روش مناسب استفاده کرد. در این مقاله با توجه به غیرقطعی در نظر گرفتن پارامترهای تقاضای پساب و مقدار تولید فاضلاب و اینکه این دو پارامتر در سمت راست محدودیت‌های (۷) و (۱۰) قرار دارند از روش ستونی که در ادامه شرح داده شده است، استفاده خواهیم نمود.

در اینجا ابتدا چهارچوبی از فرمولسازی استوار ستونی را شرح می‌دهیم. مسأله برنامه ریزی‌خطی (۲۸) را در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} &Min\ c^T x \\ &st: \alpha_i^T x \le b_i \quad i = 1,\dots,m \\ &\qquad x \ge 0 \end{aligned} \qquad (۲۸)$$

بر اساس مقاله واراس و همکاران [۲۹] فرض کنیم ماتریس A نشان دهنده ماتریس ضرایب محدودیت ها باشد. و فرض کنیم پارامترهای b_i دارای عدم قطعیت باشد، حال بدون از دست دادن کلیت مسأله فرض کنیم که عدم قطعیت تنها ماتریس A ظاهر شود. چون فرض بر این است که عدم قطعیت در b_i وجود داشته

باشد پس متغیر جدید x_{n+1} را در معرفی و محدودیت‌های دارای عدم قطعیت را به صورت زیر بـه کمـک برتسـیماس و سـیم [۳۰] خواهیم داشت:

$$\alpha_i^T x - x_{n+1} b_i \le 0$$
$$x_{n+1} = 1 \qquad (۲۹)$$

در نتیجه b_i در ماتریس A قرار می‌گیرد.

حال مجموعه J_i را مجموعه ضرایبی از سطر i ماتریس A تعریف می کنیم که دارای عدم قطعیت باشند. هر ضریب $a_{ij}, j \in J_i$ برا اساس فرض تقارن و استقلال مدل شده است و متغیر $\tilde{a}_{ij}$ مقادیرش را از بازه $\tilde{a}_{ij} \in \left[\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij}, \bar{a}_{ij} + \hat{a}_{ij}\right]$ می‌گیرد. z_{ij} را بر اساس انحراف a_{ij} از ارزش اسمی خود به صورت $z_{ij} = \frac{\left[\tilde{a}_{ij} - \bar{a}_{ij}\right]}{\hat{a}_{ij}}$ تعریف می‌کنیم به‌طوری که $|z_{ij}| \le 1$. حال اگر در ادامه Γ_i را بودجه عدم قطعیت بنامیم خواهیم داشت:

$$\sum_{j \in J_i} |z_{ij}| \le \Gamma_i \quad \forall i .$$

همچنین در چهارچوب معرفی شده توسط برسیماس و تیله[۲۸] مجموعه عدم قطعیت به صورت (۳۰) بیان می شود:

$$U = \left\{ \begin{array}{l} A \in \Re^{m \times n} : a_{ij} = \bar{a}_{ij} + z_{ij} \hat{a}_{ij} \ \forall i, j; \\ \sum_{j \in J_i} |z_{ij}| \le \Gamma_i \quad \forall i ; |z_{ij}| \le 1 \ \forall i, j \end{array} \right\} \qquad (۳۰)$$

حال با توجه به (۳۰) و معادله مدل(۲۸) می‌توان نوشت:

$$Min\ c^T x \qquad (۳۱)$$
$$st: Ax \le b_i \quad \forall A \in U$$
$$x \ge 0$$

در نتیجه بنابرتعریف z_{ij} و مدل (۳۱) خواهیم داشت:

$$Min\ c^T x$$
$$st: \sum_{j \in J_i} (\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij} z_{ij}) x_j \le b_i \quad \forall i , \qquad (۳۲)$$
$$x_j \ge 0 \quad \forall j$$
$$0 \le z_{ij} \le 1$$

از این پس به دنبال کمینه سازی عبارت (۳۳) بر می آییم تا جواب های بهینه‌تری برای مقابله با حالت عدم قطعیت بیابیم. بنابراین خواهیم داشت:

$$Max \sum_{j \in J_i} (\bar{a}_{ij} - \hat{a}_{ij} z_{ij}) x_j \qquad (۳۳)$$
$$st: \sum_{j \in Ji} z_{ij} \le \Gamma_i$$
$$0 \le z_{ij} \le 1$$

از آنجا که جواب بهینه معادله خطی ذکر شده با جواب بهینه دوگان آن برابر خواهد بود. پس به دنبال یافتن جواب بهینه، دوگان معادله (۳۳) را به صورت زیر می نویسیم:

$$Min\ q_i \Gamma_i + \sum_{j \in J_j} r_{ij} \qquad (۳۴)$$
$$st: q_i + r_{ij} \ge \hat{a}_{ij} \quad \forall j \in J$$
$$q_i \ge 0, \quad r_{ij} \ge 0$$

در نهایت با جایگذاری معادله بالا در معادله (۳۲)، خواهیم داشت:

$$Max\ c^T x \qquad (۳۵)$$
$$st:$$
$$\sum_{j \in J_j} (\bar{a}_{ij} - q_i \Gamma_i - \sum_{j \in J_j} r_{ij}) x_j \le b_i \quad \forall i ,$$
$$q_i + r_{ij} \ge \hat{a}_{ij} x_j \quad \forall j \in J$$
$$q_i \ge 0, \quad r_{ij} \ge 0$$
$$x \ge 0 \quad 0 \le z_{ij} \le 1$$

حال با توجه به توضیحات ارائه شده برای استوار کردن مدل ارائه شده، دو محدودیت (۷) و (۱۰) را به صورت زیر می نویسیم:

$$\sum_j y_{jkqt} (1 - \lambda) \ge \tilde{d}_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۳۶)$$

$$\sum_{i \in R_i} s_{it} \le p\tilde{h}_t^r \qquad \forall r \in R, \ t \in T \qquad (۳۷)$$

محدودیت پاسخگویی به تقاضا، (۳۹) را در نظر مـی‌گیـریم. فـرض می‌کنیم پارامتر غیر قطعی $\tilde{d}_{kqt}$ مقـادیر خـود را بـه صـورت زیـر بگیرد.

$$\tilde{d}_{kqt} \in \left[d_{kqt} - \hat{d}_{kqt}, d_{kqt} + \hat{d}_{kqt}\right] \qquad (۳۸)$$
$$\forall k \in K, q \in Q, t \in T$$

از طرفی z_{kqt} را به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

$$z_{kqt} = \frac{\left[d_{kqt} - \bar{d}_{kqt}\right]}{\hat{d}_{kqt}} \qquad (۳۹)$$
$$\forall k \in K, q \in Q, t \in T$$

حال اگر همانند حالت قبل Γ_{kqt} گاما را بودجه عدم قطعیت برای تقاضا و μ_{kqt}, λ_{kqt} را متغیرهای دوگان برای محدودیت هـای مدل اولیه تعریف کنیم، با توجه به مقاله برتسـیماس و تیلـه [۳۱] می‌توان نوشت:

$$Max\ z_{kqt} \hat{d}_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T$$
$$st: \sum_k \sum_q \sum_t z_{kqt} \le \Gamma_{kqt} \qquad (۴۰)$$
$$0 \le z_{kqt} \le 1 \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T$$

که دوگان معادله (۴۳) را با توجه بـه متغیرهـای معرفـی شـده بـه صورت زیر می‌نویسیم.

$$Min\ \hat{\lambda}_{kqt}\Gamma_{kqt} + \mu_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T$$
$$st:\ \hat{\lambda}_{kqt} + \mu_{kqt} \geq \hat{d}_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۴۱)$$
$$\hat{\lambda}_{kqt}, \mu_{kqt} \geq 0 \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T$$

در نهایت با جایگذاری در محدودیت اصلی به به دو محدودیت زیر خواهیم رسید که فرم نهایی محدودیت های استوار برای محدودیت (۱۰) می‌باشند.

$$\sum_j y_{jkqt}(1-\lambda) \geq \bar{d}_{kqt} + \hat{\lambda}_{kqt}\Gamma_{kqt} + \mu_{kqt} \quad \forall k \in K, q \in Q, t \in T \qquad (۴۲)$$
$$\hat{\lambda}_{kqt} + \mu_{kqt} \geq \hat{d}_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T$$

به همین ترتیب برای محدودیت تولید فاضلاب خواهیم داشت، که معادله (۴۵) معادل استوار برای محدودیت (۷) می‌باشد.

$$\sum_{i \in R_i} s_{it} \leq p\bar{h}_t^r - \hat{\lambda}_t^r \Gamma_t^r - \mu_t^r \quad \forall r \in R,\ t \in T$$
$$\hat{\lambda}_t^r + \mu_t^r \geq p\hat{h}_t^r \qquad \forall r \in R,\ t \in T \qquad (۴۳)$$
$$\hat{\lambda}_t^r \geq 0,\ \mu_t^r \geq 0 \qquad \forall r \in R,\ t \in T$$

در پایان این قسمت لازم به ذکر است یکی از ویژگی‌های رویکرد استوار این است که اگر تعداد ضرایب عدم قطعیت تا Γ_i تغییر کند جواب استوار همچنان شدنی خواهد ماند. اگر بیشتر از Γ_i در i امین محدودیت تغییر کند، جواب استوار با احتمال زیر شدنی باقی می ماند.

$$p\left(\sum \tilde{a}_{ij} x_j^* > b_i\right) \leq 1 - \phi\left(\frac{1-\Gamma_i}{\sqrt{n}}\right) \qquad (۴۴)$$

در نامعادله بالا x_j^* مقدار بهینه مدل استوار بوده و $\phi(\theta)$ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد می‌باشد.

۳. مطالعه موردی

استان تهران به مرکزیت شهر تهران، با وسعتی حدود ۱۳۶۹۲ کیلومتر مربع، از شمال به استان مازندران، از جنوب به استان قم، از جنوب‌غربی به استان مرکزی، از غرب به استان البرز و از شرق به استان سمنان محدود است. جمعیت آن در سال ۱۳۹۲، طبق اعلام مرکز آمار کشور ۱۲،۴۲۵،۰۰۰ نفر برآورد شده است. از مهمترین شهرستان‌های استان تهران می‌توان به شهرستان اسلامشهر، شهرستان ری، شهرستان رباط‌کریم، شهرستان ورامین، شهرستان پاکدشت، شهرستان شهریار و شهرستان قرچک اشاره کرد که با توجه آب و هوای مناسب و زمین های حاصلخیز به قطب‌های کشاورزی این منطقه تبدیل شده‌اند. شهر تهران به عنوان پایتخت ایران از اهمیت زیادی برخوردار است. این شهر جمعیتی در حدود ۹۰۴۲۸۰۲ نفر از جمعیت استان را در خود جای داده است [۳۲].

با توجه افزایش بی رویه جمعیت شهر تهران درسال‌های اخیر و کاهش شدید بارندگی تامین آب شرب این شهر با مشکل مواجه شده به گونه‌ای که مسئولین ناگزیر به تخصیص هرچه بیشتر آب رودخانه ها و سدهای این استان به شهرتهران و کاهش حق‌آبه‌های کشاورزی شده‌اند. با توجه به شرایط شرح داده شده، ایده تصفیه و استفاده از این فاضلاب‌ها در بخش کشاورزی، به تنها راه حل مشکل کم آبی این استان تبدیل شده است. درسال‌های اخیر نیز محققان زیادی در این زمینه به مطالعه و تحقیق پرداخته‌اند. شکل(۲) موقعیت استان تهران و شهرستانهای آن را نشان می‌دهد.

در این مقاله برای راستی آزمایی مدل با توجه به اهمیت این موضوع برای استان تهران جمع‌آوری اطلاعات از سازمان‌های مربوطه از جمله شرکت آب منطقه‌ای استان تهران، آب و فاضلاب شهر تهران و مرکز آمار ایران پرداخته‌ایم. به دلیل نبود فضا تنها اطلاعات مربوط به سرانه مصرف آب شرب و تولید فاضلاب و مقدار تولید فاضلاب در جداول (۱)، (۲) آورده شده است. شکل(۳) منطقه مورد مطالعه رانشان می‌دهد.

جدول۱. سرانه مصرف آب و تولید فاضلاب (لیتر در روز)

	فصل بهار	فصل تابستان	فصل پاییز	فصل زمستان
سرانه مصرف آب	۲۲۰	۲۴۰	۲۰۰	۱۹۰
سرانه تولید فاضلاب	۱۷۶	۱۹۲	۱۶۰	۱۵۲

جدول۲. مقدار تولید فاضلاب (متر مکعب)

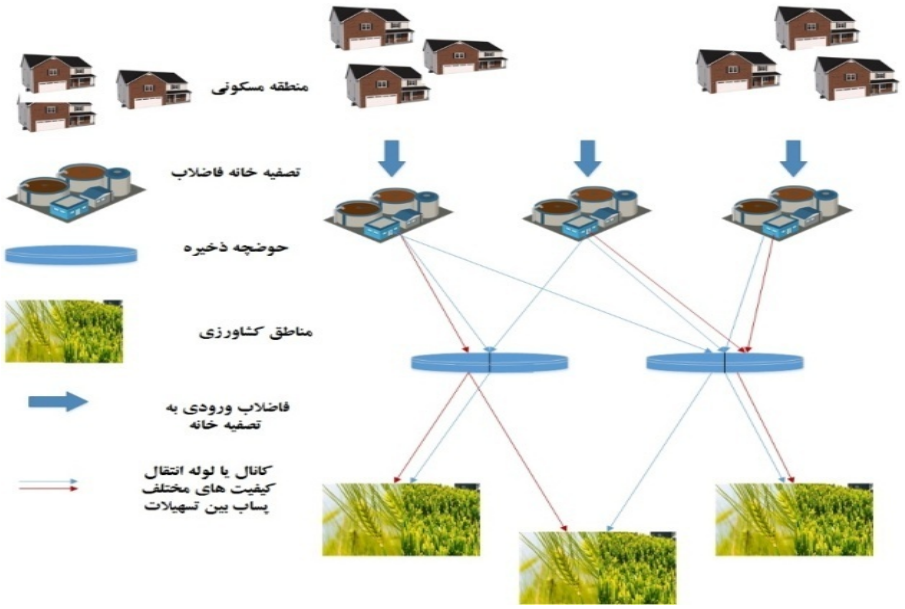
اطلاعات / قطب ها	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
قطب۱	۸۰۴۹۴۴۹۲	۸۴۸۸۵۳۱۸	۷۲۲۰۱۳۷۳	۸۱۷۱۲۰۴۴
قطب۲	۴۲۱۴۲۶۸۷	۴۳۶۲۳۳۵۶	۴۱۰۲۴۶۸۶	۴۹۱۶۱۳۵۰
قطب۳	۴۱۴۱۱۵۵۳	۴۲۸۳۸۶۴۵	۴۰۳۴۱۲۳۵	۴۸۵۵۷۳۷۰
قطب۴	۱۰۶۰۸۲۳۵	۱۱۵۳۰۶۹۱	۱۲۹۱۶۳۹۴	۱۳۷۶۳۳۲۴
قطب۵	۱۲۲۱۲۲۴۲	۱۳۲۷۴۱۷۶	۱۱۴۱۵۷۹۱	۱۵۰۸۸۳۷۳
قطب۶	۹۳۲۳۳۷۳	۱۰۱۳۴۱۰۱	۱۰۷۱۵۳۲۷	۱۱۷۰۱۹۱۶
قطب۷	۸۸۹۶۸۴۱	۹۶۷۰۴۷۹	۱۰۳۱۶۶۱۳	۱۱۳۴۹۵۶۴

۴. نتایج

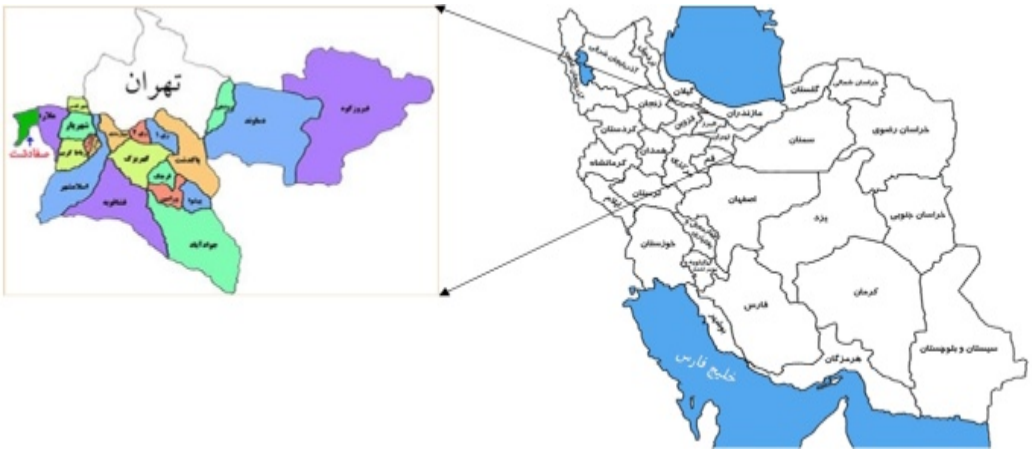
نمودارهای (۱) و (۲) نشانگر این موضوع هستند که چگونه میزان تابع هدف تحت تاثیر مقادیر مختلف درجه محافظت و تغییرات پارامتر عدم قطعیت قرار می‌گیرد. در این نمودارها درصد نرمال شده انحراف تابع هدف نمایش داده شده است. بدین صورت که فرض کنید Z^N و Z^R به ترتیب نشان دهنده‌ی مقدار بهینه مدل قطعی و غیر قطعی باشند. افزایش مقدار تابع هدف هزینه با استفاده از $(Z^R - Z^N) / Z^N$ بدست آمده است. به علاوه نمودارها نشان دهنده‌ی احتمال تخطی محدودیت‌ها بر حسب مقادیر

مختلف درجه محافظت می‌باشند. با مشاهده روند نمودارها می‌توان اذعان کرد که بدترین مقدار تابع هدف زمانی رخ می‌دهد که درجه محافظت (Γ) بیشترین مقدار خود را اختیار کند. به عبارت دیگر تمامی پارامترهای عدم‌قطعیت تاثیر مستقیم بر مدل و میزان تابع هدف دارند. نکته دیگری که می‌توان با مقایسه تغییرات داده‌ها استنباط کرد این است که افزایش ۲۰ درصدی در بازه‌ی داده‌های تقاضا و تولید، بیشترین تاثیر را بر تغییرپذیری مقدار تابع هدف دارد. از دیگر سو مشاهده می‌شود که در مقادیر کمتر درجه محافظت تغییرات پارامتر تولید تاثیرگذاری بیشتری در افزایش تابع هدف دارد در حالی که در مقادیر بیشتر درجه محافظت پارامتر تقاضا تاثیر به مراتب بیشتری نسبت به تولید فاضلاب در افزایش هزینه‌ها دارد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن نمودار تغییرات ۲۰ درصدی داده‌ها، در درجه محافظت ۰/۱، میزان تابع هدف برای تغییرات تولید فاضلاب و تقاضا به ترتیب منجر به افزایش ۲/۶۵٪ و ۱/۷۹٪ تابع هدف می‌شود. ولی در مقادیر بیشتر درجه محافظت رفته رفته شیب نمودار تقاضا بیشتر می‌شود در حالی که شیب نمودار تولید کاهش می‌یابد به‌طوریکه تغییرات چشم‌گیری بعد از مقدار ۰/۶ درجه محافظت دیده نمی‌شود و در مقدار ۱، به بیش از میزان ۶/۵٪ نمی‌رسد و در مقایسه با میزان ۱۷٪ افزایش تابع هدف برای پارامتر تقاضا رقم کمتری است. اگر از زاویه‌ای دیگر به نتایج بنگریم متوجه میزان احتمال نقض محدودیت‌ها می‌شویم که با افزایش درجه محافظت کاهش می‌یابد. شیب نمودار احتمال نقض محدودیت‌ها در ابتدا زیاد می باشد و مشاهده می‌گردد با گذر از درجه محافظت ۰/۷ به کمتر از ۵٪ می‌رسد درنتیجه اگر به دنبال اطمینان ۹۵٪ برای حفظ شدنی بودن مدل باشیم می‌توان با درنظر گرفتن Γ برابر ۰/۶ به این سطح اطمینان رسید. در جدول (۳) این مقادیر نشان داده شده‌اند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت با افزایش درجه محافظت احتمال نشدنی بودن و نقض محدودیت کاهش می‌یابد در حالی که میزان تابع هدف هزینه افزایش می یابد.

پس از بررسی اثر تغییرات مقادیر تقاضا و تولید بر مدل معرفی شده در این مرحله برای بررسی اثرات تغییرات همزمان این دو پارامتر بر مدل به عنوان نمونه تحت حالات مختلف اقدام به حل مدل کردیم که خروجی‌های آن در جدول(۴) ارائه گردید. در این قسمت نیز می‌توان مشاهده نمود که با افزایش عدم قطعیت هردو پارامتر، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد و این روند افزایشی در کل نتایج بدست آمده صادق است. نمونه عملکرد مدل برای تاسیس تصفیه خانه نیز در جدول(۵) ارائه گردید. همانگونه که مشهود است تصفیه‌خانه های ۱،۲،۳،۱۰به دلیل موقعیت مناسب نسبت به حوضچه‌های در همه درجات عدم قطعیت تأسیس شده‌اند و نیز مشاهده می‌شود با افزایش عدم قطعیت، مدل برای پاسخگویی کامل به تقاضا اقدام به تاسیس تصفیه‌خانه‌هایی می‌کند که در شهرستان‌ها و در نزدیکی مناطق تقاضا واقع‌اند، در این میان تاسیس تصفیه‌خانه‌های، اسلام‌شهر(۱۱) و ورامین (۱۳) در این مدل با توجه به در دست مطالعه بودن طرح احداث آن‌ها می‌توانند برای تصمیم‌گیران این حوزه این نتیجه را در برداشته باشد که در طراحی شبکه معکوس آب تمرکز بر فاضلاب تولیدی شهر تهران در آینده چندان راه گشا نخواهد بود، در نتیجه برای پاسخگویی در بدترین شرایط عدم قطعیت نیاز به پیش‌بینی تاسیس تصفیه‌خانه در شهرستان‌های نزدیک محل تقاضا می‌باشد.

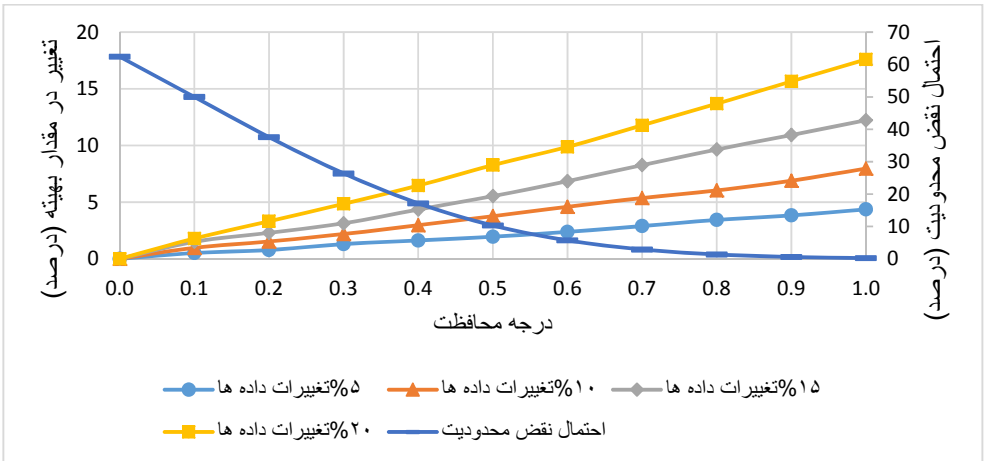


شکل ۱. شبکه تصفیه و انتقال پساب به مناطق کشاورزی

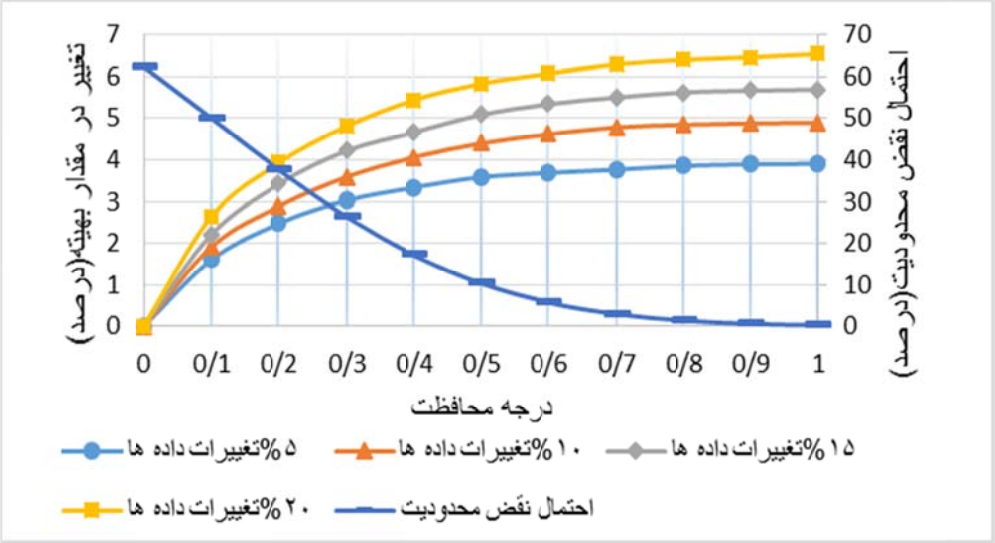


شکل ۲. موقعیت جغرافیایی استان تهران و شهرستان‌های آن

شکل ۳. منطقه مورد مطالعه و مکان‌های بالقوه برای تاسیس تصفیه‌خانه و حوضچه‌های ذخیره



نمودار۱. تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات در مقادیر تقاضا



نمودار۲. تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی نسبت به تغییرات در مقادیر عرضه فاضلاب

جدول۳. احتمال نقض محدودیت در درجات محافظت مختلف

احتمال نقض محدودیت	درجه محافظت
α =٪۱	۰/۹
α =٪۵	۰/۶
α =٪۱۰	۰/۵
α =٪۳۰	۰/۳
α =٪۴۰	۰/۲
α =٪۵۰	۰/۱

جدول۴. خروجی مدل پیشنهادی نسب به تغییرات در مقادیر تولید فاضلاب و تقاضای پساب به صورت همزمان

	d	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Γ_{kqt}	p / Γ_t^r	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵	۰/۲
۰/۱	۰/۱	۵۹۶۸۸۳	۱۰۴ ۵۹۷	۵۹۷۸۴۶	۵۹۸۰۱۲	۶۰۱۵۸۴	۶۰۵۹۱۱	۶۰۶۸۳۰	۶۰۷۹۴۲
۰/۱	۰/۴	۵۹۷۱۲۶	۵۹۷۴۰۳	۵۹۸۲۳۸	۶۰۴۸۶۵	۶۰۱۶۱۸	۶۰۷۹۴۶	۶۰۸۳۷۶	۶۰۹۳۴۸
۰/۱	۰/۷	۵۹۷۹۶۳	۵۹۸۰۶۱	۵۹۹۷۲۱	۶۱۲۱۸۴	۶۰۳۸۱۰	۶۰۸۲۵۳	۶۰۹۲۱۹	۶۱۱۲۷۳
۰/۱	۰/۹	۵۹۸۴۸۹	۵۹۹۱۱۹	۶۰۲۸۰۶	۶۱۴۷۳۱	۶۰۸۷۰۵	۶۰۹۱۱۲	۶۱۱۷۴۱	۶۱۳۴۸۹
۰/۵	۰/۵	۶۰۵۷۴۳	۶۰۶۲۱۳	۶۰۸۵۷۴	۶۱۰۷۵۲	۶۴۰۴۸۲	۶۴۱۱۱۰	۶۴۳۵۱۷	۶۴۵۴۱۳
۰/۹	۰/۱	۶۱۳۴۹۶	۶۱۳۸۳۳	۶۱۴۳۶۴	۶۱۵۴۵۵	۶۷۹۸۹۹	۶۸۰۰۱۶	۶۸۰۸۹۳	۶۸۲۵۰۵
۰/۹	۰/۴	۶۱۳۵۳۶	۶۱۴۹۸۸	۶۱۵۲۲۳	۶۱۶۷۳۵	۶۸۰۴۷۱	۶۸۱۴۳۵	۶۸۲۲۶۷	۶۸۴۰۶۹
۰/۹	۰/۷	۶۱۷۳۹۸	۶۱۶۵۱۷	۶۱۶۹۰۷	۶۱۷۱۳۴	۶۸۱۰۸۵	۶۸۳۳۵۹	۶۸۴۵۰۱	۶۸۷۴۷۵
۰/۹	۰/۹	۶۱۸۶۰۲	۶۱۹۵۹۸	۶۱۹۸۴۹	۶۲۶۳۸۷	۶۸۲۸۱۳	۶۸۴۲۱۹	۶۸۶۶۸۱	۶۹۱۵۴۵

جدول۵. نمونه عملکرد مدل در تاسیس تصفیه‌خانه ها

	d	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۲	۰/۲	۰/۲
Γ_{kqt}	p / Γ_t^r	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۲
۰/۱	۰/۱	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۳
۰/۱	۰/۷	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۸،۱۰، ۱۳
۰/۱	۰/۹	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،	۱،۲،۳،۸،۱۰،۱ ۳	۱،۲،۳،۸،۱۰، ۱۳
۰/۹	۰/۱	۱۳،۱،۲،۳،۱۰	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱ ۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،	،۱،۲،۳ ۱۰،۱۱،۱۲،۱ ۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۱، ۱۲،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،۱۳،
۰/۹	۰/۷	۱،۲،۳،۱۰،۱۱، ۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱ ۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،۱۳،	۱،۲،۳،۱۰،۱۱، ۱۲،۱۳	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،۱۳،
۰/۹	۰/۹	۱،۲،۳،۱۰،۱۱، ۱۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱ ۲	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،	۱،۲،۳،۱۰،۱۱ ۱۲،۱۳،	۱،۲،۳،۱۰،۱۱، ۱۲،۱۳	،۱،۲،۳،۸،۱۰ ۱۱،۱۲،۱۳

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله به ارائه مدل بهینه سازی‌استوار جهت طراحی شبکه تصفیه و انتقال پساب به مناطق کشاورزی پرداختیم؛ به‌صورتی که مدل به طور همزمان برای مکان‌یابی تصفیه‌خانه، حوضچه‌ذخیره، احداث لوله(کانال) بین تسهیلات و وتخصیص پساب تصمیم می‌گیرد. با تقسیم‌بندی مناطق تولید فاضلاب به قطب‌های ۷ گانه مقدار تولید هر قطب بر اساس سرانه تولید فاضلاب را بدست آورده‌ایم. عدم‌قطعیت موجود در دو پارامتر تولید فاضلاب و تقاضای پساب را به صورت بهینه‌سازی استوار مدل کردیم. برای بررسی عملکرد مدل در شرایط عدم قطعیت اقدام به حل مدل به ازای مقادیر مختلف تقاضای پساب و تولید فاضلاب کردیم. همچنین برای بررسی اثرات همزمان تغییرات این دو پارامتر بر نتایج مدل، به عنوان نمونه مقدار مدل در چند حالت مختلف تغییرات این دو پارامتر محاسبه و در بخش قبل ارائه گردید. همان‌گونه که مشاهده شد تغییرات پارامتر تولید فاضلاب تاثیر بیشتری در افزایش تابع‌هدف دارد در نتیجه پارامتر مهتری برای مدل می‌باشد و جواب مدل پیشنهادی در بیشترین حالت عدم قطعیت دو پارامتر به صورت هم‌زمان ۶۹۱۵۴۵ (میلیون تومان) می‌باشد. در مجموع با توجه به واقعی بودن داده‌های ورودی مدل در مورد مطالعه موردی استان تهران دستیابی به این نتایج می‌تواند کمک شایانی به تصمیم‌گیران این حوزه در مورد اتخاذ تصمیمات استراتژیک احداث

تصفیه‌خانه و حوضچه با توجه به شرایط عدم قطعیت آینده کند. از جمله نتایج مدیریتی که می توان بدان ها اشاره کرد:

- موقعیت تصفیه خانه ها نقش بسیار مهمی در بهره وری زنجیره دارند و فاصله از نقاط تقاضا تاثیر دوچندان بر آن دارد.
- از طرفی با کاهش ظرفیت تسهیلات، و نیز با افزایش عدم قطعیت در پارامترهای تقاضای پساب و تولید فاضلاب مدل تمایل به تأسیس تصفیه‌خانه‌هایی دارد که در شهرستان‌ها واقع‌اند.
- از آنجا که میزان تقاضا تاثیر گذارترین عامل بر هزینه های شبکه موجود است می بایست نسبت به برنامه‌ریزی صحیح تقاضاها توجه ویژه نمود و از ابزارهای فرهنگی جهت راهنمایی مصرف صحیح و کاهش ضایعات بهره برد.
- تأسیس شدن تصفیه خانه ورامین و پاکدشت در مدل، با توجه به فاصله زیاد این مناطق از تهران می‌توان به این نتیجه رسید که انتقال پساب از جنوب تهران به این مناطق عملی منطقی و مقرون به صرفه نخواهد بود.

به عنوان تحقیقات آتی می‌توان منابع دیگر همچون سدها و روخانه‌ها را به عنوان تأمین کننده بخشی از آب کشاورزی، در مدل در نظر گرفت. برای مدل کردن عدم قطعیت پارامترها از روش‌های دیگر همچون روش احتمالی استفاده کرد. و نیز در نظر گرفتن یک نوع لوله(کانال) انتقال پساب و استفاده از مفاهیم زمان‌بندی برای انتقال چند نوع کیفیت پساب و همچنین می‌توان تقاضای مصارف دیگر پساب همچون مصارف شهری و پارک‌ها را در مدل در نظر گرفت.

مراجع

[1] Larijani, K. M., “Iran’s water crisis: inducers, challenges and counter-measures”,

In ERSA 45th Congress of the European Regional Science Association, Nos. 14-16 August, 2005.

[۲] بوستانی، ف.، محمدی، ف.، معین الدینی،" پیامد سیاست‌های افزایش قیمت آب و کاهش آب آبیاری در استان فارس"، مهندسی منابع آب، جلد۷، شماره ۲۰،صفحه ۶۵-۷۸، ۱۳۹۳.

[۳] حاجی رحیمی، م.، ترکمانی، ج.، "بررسی نقش رشد بخش کشاورزی در رشد اقتصادی ایران کاربرد الگوی تحلیل مسیر"، اقتصاد کشاورزی و توسعه، جلد ۴۱و۴۲، شماره۱، صفحه ۷۱-۸۹، ۱۳۸۲.

[۴] سرخیل، ح.، خراسانی، ن.،حبیبی راد، م.، "تحلیل کارایی و بهره وری طرح های کلان انرژی و محیط زیست با استفاده از روش های تحلیل پوششی داده ها (DEA)"، نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، جلد ۲۷، شماره ۴، صفحه ۵۲۹-۶۰۲، ۱۳۹۵.

[۵] عبدالغفوریان، ع.، تجریشی، ا.، "مدیریت آب شهری با لحاظ پساب و رواناب به‌عنوان منابع جدید آب (مطالعه موردی شهر تهران)"، آب و فاضلاب، ۲۳(۴)، (۱۳۹۱)، ۲۹-۴۲.

[6] Asano, T., Joseph, A., "Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations. Water Research", Vol. 38, No. 8, pp. 1941-1951, 2004.

[7] Deininger, R. A., "Water quality management: The planning of economically optimal pollution control systems." Ph.D. thesis, Northwestern Univ., Evanston, 1965.

[8] Smeers, Y., and Tyteca, D., "Optimal location and design of wastewater treatment plants under river quality constraints", Environmental systems analysis and management, Amsterdam, The Netherlands, pp. 289–310, 1982.

[9] Converse, A. O., "Optimum number and location of treatment plants", J. Water Pollut. Control Fed, Vol. 44, No. 8, pp. 1629-1636, 1972.

[10] Klemetson, S. L., and Grenney, W. J., "Dynamic optimization of regional wastewater treatment systems", J. Water Pollut. Control Fed, Vol. 57, No. 2, pp. 128-134, 1985.

[11] Brill, E. D., and Nakamura, M., "A branch and bound method for use in planning regional wastewater treatment systems" ,Water Resour. Res, Vol. 14, No. 1, pp. 109-118, 1978.

[12] Lauria, D. T., "Desk calculator model for wastewater planning" J. Envir. Engrg. Div., Vol. 105, No. 1, pp. 113-120, 1979.

[13] Weeter, D. W., and Belardi, J. G., "Analysis of regional water treatment system." J. Envir. Engrg. Div., Vol. 102, No. 1, pp. 233-237, 1976.

[14] Agrafioti, E., Diamadopoulos, E., "A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete", Agricultural Water Management, Vol. 105, No. 1, pp. 57-64, 2012.

[15] Sousa, J., Ribeiro, A., da Conceicao Cunha, M., Antunes, A. "An optimization approach to wastewater systems planning at regional level". Journal of Hydroinformatics, Vol. 4, No. 1, pp. 115-123, 2002.

[16] Cunha, M., Pinheiro, L., Zeferino, J., Antunes, A., Afonso, P., "Optimization model for integrated regional wastewater systems planning", Journal of water resources planning and management, Vol. 135, No. 1, pp. 23-33, 2009.

[17] Zhang, C. A Study on urban water reuse management modeling, MSc Thesis, Systems Design Engineering University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada. 2004.

[18] Chen, W., Peng, C., Jiao, W., Wang, M., "Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation", Environmental Pollution, Vol. 178, No. 1, pp. 294-299, 2013.

[19] Wang, C., Jamieson, D., An objective approach to regional wastewater treatment planning. Water resources research, Vol. 38, No. 3, pp. 1-4, 2002.

[20] Dandy, G., Duncker, A., Wilson, J., Pedeux, X., An Approach for Integrated Optimization of Wastewater. Recycled and Potable Water Networks, Vol. 11, No. 1, pp. 32, 2009.

[21] Becerra, C., Lopes, A. R., Vaz-Moreira, I., Silva, E. F., Manaia, C. M., Nun O. C., Waste water reuse in irrigation: A microbiological perspective on implications in soil fertility and human and environmental health. Environment international, Vol. 75, No. 1, pp. 117-135, 2015.

[22] Seshadri B, Bolan NS, Kunhikrishnan A, Chowdhury S, Thangarajan R, Chuasavathi T," Recycled water irrigation in Australia", InEnvironmental Sustainability, pp. 39-48, 2015, Springer India.

[23] Agudelo-Vera C, Blokker M, Vreeburg J, Vogelaar H, Hillegers S, van der Hoek JP. "Testing the robustness of two water distribution system layouts under changing drinking water demand". Journal of Water Resources Planning and Management. Vol. 142, No. 8, pp. 05016003, 2016.

[24] Vieira J, Cunha MC, "Nested Optimization Approach for the Capacity Expansion of Multiquality Water Supply Systems under Uncertainty", Water Resources Management. Vol. 31, No. 4, pp. 1381-95, 2017.

[۲۵] آذر،ع.، موسوی، س. "طراحی مدل استوار برای تخصیص قطعات به تامین کنندگان". نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید. جلد ۲۵، شماره ۳، صفحه ۲۶۴-۲۷۲، ۱۳۹۳.

[۲۶] جبارزاده، آ.، ذکائی، ش.، " طراحی شبکه زنجیره تامین امداد رسانی با استفاده از رویکرد بهینه سازی استوار داده های بازه ای". نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید. جلد ۲۶، شماره ۴، صفحه ۵۴۴-۵۵۶، ۱۳۹۴.

[27] Alem, D. J., Morabito, R., Production planning in furniture settings via robust optimization. Computers & Operations Research, Vol. 39, No. 2, pp. 139-150, 2012.

[28] Sherali, H., Alameddine, A., A new reformulation-linearization technique for bilinear programming problems. Journal of Global Optimization, Vol. 2, No. 4, pp. 379-410, 1992.

[29] Varas, M., Maturana, S., Pascual, R., Vargas, I., Vera, J., Scheduling production for a sawmill: A robust optimization approach. International Journal of Production Economics, Vol. 150, pp. 37-51, 2014.

[30] Bertsimas, D., Sim, M., The price of robustness. Operations research, Vol. 52, No. 1, pp. 35-53, 2004.

[31] Bertsimas, D., Thiele, A., A robust optimization approach to inventory theory. Operations Research, Vol. 54, No. 1, pp. 150-168, 2006.

[32] www.amar.org.ir