پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۱، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵

ارائه مدل بهینه‌سازی فازی جهت طراحی پایدار شبکه جمع‌آوری و انتقال پسآب شهری برای مصارف کشاورزی در شرایط عدم‌قطعیت (مطالعه موردی: استان تهران)

حجت احمدی کرد[۱]، سعید یعقوبی[۲*]، احمد محمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران
۲- استادیار، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
۳- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم وصنعت ایران، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۴ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۸/۲۹

چکیده

در این مقاله یک مدل بهینه‌سازی فازی برای طراحی شبکه، شامل مکانیابی تصفیه‌خانه فاضلاب و حوضچه ذخیره و نیز تخصیص بهینه پساب تصفیه شده به مناطق کشاورزی ارائه شده است. در آغاز مدلی پایه برای مشخص کردن تصمیم‌های استراتژیک مکانیابی و تصمیم‌های تاکتیکال تخصیص برای حالت قطعی ارائه شده و سپس این مدل با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مسأله با استفاده از رویکرد فازی توسعه داده شده است. بعلاوه این مقاله با در نظر گرفتن کیفیت‌های متفاوت پساب، به ارائه رویکرد جدید در استفاده از پساب در کشاورزی برای افزایش سلامت محصول و کاهش آلودگی‌های میکروبی پرداخته است. درنهایت برای اعتبارسنجی مدل، مطالعه موردی استان تهران که داده‌های آن برگرفته از سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای تهران می‌باشد، مورد بررسی و تحلیل حساسیت قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد تسهیلات تعداد لوله ارتباطی نیز افزایش پیدا می‌کند ولی چون طول آنها کاهش می یابد، در نتیجه توازنی نسبی میان مجموع هزینه تأسیس آنها برای حالت‌های مختلف برقرار است.

---

* نویسنده مسئول مقاله: E-mail: Yaghoubi@iust.ac.ir

واژه‌های کلیدی: پساب، طراحی شبکه، آبیاری کشاورزی، بهینه‌سازی، عدم‌قطعیت، فازی.

۱- مقدمه

امروزه گسترش شهرنشینی و افزایش چشمگیر جمعیت کره زمین و نیز بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب برای تأمین نیازهای مختلف بشر، تأثیرات منفی جبران‌ناپذیر را بر محیط زیست و از جمله منابع آب بر جای گذاشته است، به‌طوری که مدیریت منابع آب را با چالش بزرگی رو به رو کرده است [۱]. بنا بر اعلام وزارت نیرو و براساس اسناد سازمان ملل در کره زمین ۲,۵ درصد آب شیرین قابل دسترسی بوده که از آن فقط بخش ناچیزی از آب‌های سطحی در دسترس قرار می‌گیرد. کشور ایران و اساساً خاورمیانه، به عنوان یکی از بحرانی‌ترین مناطق، همواره درگیر کمبود آب بوده است به‌گونه‌ای که در سال‌های گذشته دوره‌های متعدد خشکسالی را پشت سر گذاشته و هم‌اکنون نیز هفتمین دوره خشکسالی پیاپی را تجربه می‌کند [۲؛ ۳]. با این اوصاف دور از انتظار نیست که آب به عنوان مایه حیات در سال‌های آینده به عاملی برای مناقشات و درگیری‌ها تبدیل شود چرا که هر روز با توجه به افزایش جمعیت جهان با افزایش تقاضا برای تأمین آب رو به رو خواهیم شد [۴].

از طرفی رشد بخش کشاورزی به عنوان بستری برای توسعه پایدار در کشور ما، امری ضروری قلمداد شده و بیشترین مصرف آب کشور، حدود ۹۲ درصد، همواره در این بخش می‌باشد [۵؛ ۶]. از این رو با توجه استراتژیک بودن مدیریت منابع آب شیرین برای کشورهایی همچون کشور ما که با مشکل کمبود منابع آب روبه رو هستند، استفاده از فاضلاب شهری در صورتی که از سموم و آلودگی‌های شهری تصفیه و به کیفیت قابل قبولی رسیده باشد، از نکات کلیدی مدیریتی است که می‌توان با شناخت مصرف‌کننده‌های عمده آب از جمله کشاورزی و در صورت امکان جایگزینی آب مصرفی آنها با پساب، زمینه استفاده بهینه از منابع آب را به وجود آورد [۱؛ ۷]. در زمینه مدیریت منابع آب، شبکه‌های آبیاری و استفاده از پساب، به‌خصوص در بخش کشاورزی، مطالعات متعددی به‌وسیله محققان رشته‌های مختلف انجام شده است. از نخستین فعالیت‌ها در زمینه برنامه‌ریزی و مدیریت پساب شهری می‌توان به مطالعات شوارتز و میز [۸] ولیجکلما و ویرا [۹] اشاره کرد که به تعیین ظرفیت یک تصفیه‌خانه فاضلاب با توجه به مصرف‌کننده‌های نهایی به کمک

مدل دینامیک پرداخته‌اند. ژنگ و چنگیو [۱] در مطالعه‌ای تلاشی در جهت توسعه مدل‌های ریاضی در برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده مجدد از فاضلاب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی با تأکید بر مسائل عدم قطعیت نمودند، آنها تقاضا و کیفیت آب را به صورت عدم قطعیت در نظر گرفتند و به حداقل رساندن هزینه‌های کلی سیستم با توجه به محدودیت‌های تکنولوژیکی، اجتماعی و زیست‌محیطی پرداختند. عدم قطعیت‌های معرفی شده به‌وسیله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و برنامه‌ریزی محدویت‌های احتمالی مدل شده‌اند. درنتیجه با کمک مدل پیشنهادی آنها می‌توان به ارزیابی استفاده مجدد از فاضلاب در سیستم‌های آب شهری برای دستیابی به منابع آب پایدار پرداخت. چوانگ و همکاران [۱۰] یک سیستم قابل اعتماد ترکیبی برای مدیریت آب شهری و کشاورزی در شرایط عدم قطعیت برای یک دوره برنامه‌ریزی ۱۵ ساله طراحی کرده و به شرح نتایج در مقایسه سیستم‌های پیشین پرداختند. مهرآبادی و نصرآبادی [۱۱] اثر رویکرد مدیریت مستمر در استفاده بهینه از سیل و فاضلاب شهری در کشورهای در حال توسعه را مورد توجه قرار دادند و به منظور بهبود محیط‌زیست، این رویکرد در منطقه اصفهان و دیگر شهرستان‌ها با استفاده از داده‌های آماری برای سال‌های ۱۹۷۱-۲۰۰۱ مورد بررسی قرار گرفت. یی و همکاران [۱۲] با تأکید بر بحرانی شدن وضعیت آب‌شیرین در چین، به بررسی اجمالی مواردی از جمله پتانسیل استفاده از پساب، قوانین حاکم، خطرات و ریسک‌های احتمالی و سایر مسائل اجتماعی مرتبط در تحقیق خود پرداخته‌اند. از منظر برنامه‌ریزی استراتژیکی نیز اگرافیوتی و دیاماتوپولوس [۱۳] به ارائه یک طرح استراتژیکی جهت امکان‌سنجی استفاده از پساب‌های شهری برای آبیاری محصولات کشاورزی پرداخته‌اند. سشادری و همکاران [۱۴] به بررسی آثار آبیاری کشاورزی به‌وسیله پساب‌های شهری پرداخته و در تحقیق خود با تأکید بر اینکه بزرگ‌ترین مصرف‌کننده پساب‌های شهری استرالیا بخش کشاورزی می‌باشد، سعی در بررسی راهکارهایی برای کاهش آثار آلودگی پساب بر اراضی را داشتند.

مواردی که مقاله حاضر را از دیگر مقالات متمایز می‌کند به صورت زیر می‌باشند:

۱. ارائه مدل ریاضی برای یکپارچه‌سازی شبکه انتقال پساب با در نظر گرفتن بیشتر اجزای شبکه و همچنین مکانیابی و تخصیص به صورت همزمان؛

۲. بیشتر محققان این حوزه در مدل‌های ارائه شده خود به ذکر محدودیت‌های کلی

مـدیریت آب و شـبکه بسـنده کـرده وحـداقل و حـداکثر ظرفیـت هـر تسـهیل و محدودیت‌های تعادلی را در نظر نگرفته‌اند؛

۳. در نظر گرفتن حوضچه ذخیره پسـاب از دیگـر تفـاوت‌هـایی اسـت کـه پـس از مشورت‌های بسیار با کارشناسان این حوزه و تأکید شرکت آب منطقه‌ای تهران بـرای در نظر گرفتن آن به مدل افزوده شد و باعث نزدیک‌تر شدن مـدل بـه شـرایط واقعـی شده است؛

۴. توجه به مباحث محیط‌زیست و سلامت به‌ویژه در مـورد چـالش ایـن روزهـای شهر تهران مبنی بر تولید سبزیجات و محصولات کشـاورزی بـا فاضـلاب آلـوده، در این مقاله سعی در تفکیک پساب مورد تقاضا با توجه اهمیت محصول بـه کیفیـت‌هـای مختلف شده است؛

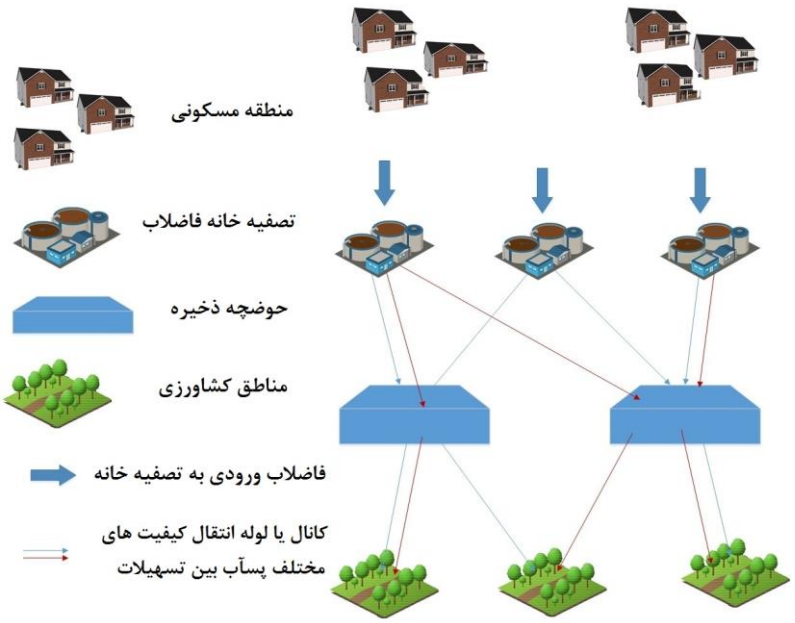
۵. با توجه به اینکه دنیای پیرامون ما تغییرپذیر اسـت و شـرایط بـه صـورت پویـا می‌باشد، از این رو در نظر گرفتن عدم قطعیت با رویکرد فـازی مـی‌توانـد مـدل را بـه دنیای واقعی نزدیک‌تر کند؛

۶. با توجه به اهمیـت موضـوع مـدیریت بهینـه آب مـدل پیشـنهادی بـر مطالعـه موردی در خصوص استان تهران مورد پیاده‌سازی قرار گرفت تا کارایی مدل مورد سنجش قرار گیرد. در ادامه، مقاله به صورت زیر سازماندهی شده‌اسـت: در بخـش دوم، بیان مسئله، در بخش سوم روش‌شناسـی و مـدل بهینـه‌سـازی بـرای طراحـی شبکه برای انتقال پساب با رویکرد فازی و خطی‌سازی آن تشریح شده و در بخـش چهارم، مطالعه موردی درخصوص طراحی شبکه در استان تهران ارائه شـده‌اسـت. در نهایت، در بخش‌های پنجم و ششم نتایج محاسباتی، نتیجه‌گیری و پیشـنهادهـای آتی آمده است.

۲- بیان مسئله

در این مقاله سعی شده است تا با توجه به استراتژیک بودن مدیریت منابع آب کشور و همچنین بحران آب پیش رو به ارائه مدل ریاضی برای طراحی بهینه شبکه جمع‌آوری فاضلاب، تصفیه و انتقال آن به مناطق کشاورزی پرداخته شود. اهمیت این موضوع در دنیای امروز به‌ویژه در کشورهای با آب و هوای خشک و نیمه‌خشک همچون کشور ما از آن جهت است که با رشد کلان‌شهرها و الزام

پاسخ‌گویی به نیاز 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 و از بحران عبور کرد. شبکه مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. بدین گونه که در آن فاضلاب مناطق مسکونی با انتقال به تصفیه‌خانه از آلودگی‌های شهری و بهداشتی پاک شده و با توجه تقاضای مناطق کشاورزی به کیفیت‌های مختلفی تصفیه می‌شود، این پساب‌ها به حوضچه‌هایی که در نزدیکی نقاط تقاضا هستند، منتقل شده و با توجه به کیفیت، به صورت مجزا ذخیره می‌شوند، سپس براساس نیاز به مناطق کشاورزی منتقل می‌شوند.



شکل ۱ شبکه تصفیه و انتقال پساب به مناطق کشاورزی

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر موضوع، جزء پژوهش‌های لجستیک با تمرکز بر موضوع هزینه و کشاورزی محسوب می‌شود. ابزار گردآوری داده‌ها در این پژوهش مطالعات کتابخانه‌ای

است. با مطالعهٔ مقاله‌های مختلف که به تفصیل در بخش مرور ادبیات به آنها اشاره شد، شکاف تحقیق شناسایی شد که بر این اساس در این مقاله یک مدل ریاضی چند هدفه پیشنهاد شده است که تلاش می‌کند تصفیه‌خانه فاضلاب و حوضچه ذخیره و نیز تخصیص بهینه پساب تصفیه شده به مناطق کشاورزی را درنظر بگیرد به این صورت هدف پروژه حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه توزیع می‌باشد به دلیل غیرخطی بودن، مدل پیشنهادی با روش‌های ابتکاری خطی‌سازی شده و برای حل فازی مدل از روش خمینز استفاده شده است. برای نمایش کارایی مدل مطالعه موردی و درنهایت مدل در نرم‌افزار گمس، حل و به تحلیل حساسیت پرداخته شده است.

۱-۳- مفروضات

در این مسأله تعدادی قطب جمعیتی معرفی می‌شود که هر کدام می‌توانند شامل تعدادی منطقه شهری و یا شهرهای کوچک باشند: ۱- چندین مکان بالقوه برای احداث تصفیه‌خانه‌ها وجود دارد؛ ۲- تعدادی منطقه کاندید برای احداث حوضچه ذخیره در نظر گرفته شده است؛ ۳- با محتمل شمردن امکان استفاده از لوله و کانال در شبکه‌های واقعی انتقال پساب به صورت همزمان، بر امکان استفاده از هر دو تأکید شده است؛ ۴- 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 نشده است و تنها میزان فاضلاب ورودی به هر تصفیه‌خانه به‌وسیله مدل مشخص می‌شود؛ ۵- تقاضای پساب با در نظر گرفتن میزان کشت محصولات مختلف به کیفیت‌های مختلف تفکیک شده است؛ ۶- هر تصفیه‌خانه می‌تواند با توجه به نیاز چند نوع کیفیت پساب تولید و در پایان دوره ذخیره کند.

۲-۳- مجموعه‌ها

I : مجموعه نقاط بالقوه برای تأسیس تصفیه‌خانه

J : مجموعه نقاط بالقوه برای تأسیس حوضچه ذخیره آب

R: مجموعه قطب‌های تولید فاضلاب

K : مجموعه نقاط تقاضای پساب برای کشاورزی

T : مجموعه دوره‌های زمانی (فصل‌های سال)

Q : مجموعه کیفیت‌های پساب مورد تقاضا

R_i : مجموعه تصفیه‌خانه‌های بالقوه(iهای) متعلق به قطب R

۳-۳- پارامترها

$\tilde{F}_i$: هزینه ثابت احداث تصفیه‌خانه i

$\tilde{A}^1_{ijq}$: هزینه ثابت احداث یک متر کانال (یا لوله) بین تصفیه‌خانه i و حوضچه ذخیره j برای انتقال پساب با کیفیت q

$\tilde{\varphi}_{iq}$: هزینه نگهداری هر متر مکعب پساب در پایان دوره در تصفیه‌خانه i با کیفیت q

$\tilde{h}_{iq}$: هزینه تصفیه هر متر مکعب فاضلاب در تصفیه‌خانه i با کیفیت q

$\tilde{c}^1_{ij}$: هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از تصفیه‌خانه i به حوضچه ذخیره j

$\tilde{l}^2_{jk}$: فاصله حوضچه ذخیره j و منطقه تقاضایk

$\tilde{ph}^r_t$: فاضلاب تولیدی در منطقه r و دوره t

$\tilde{il}0^1_{iq}$: موجودی پساب نوع q در تصفیه خانه i در ابتدای دوره برنامه‌ریزی

$\tilde{cli}_{iq}$: ظرفیت نگهداری پساب نوع q در پایان دوره در تصفیه‌خانه i

$\tilde{G}_j$: هزینه ثابت احداث حوضچه ذخیره j ام

$\tilde{z}_{jq}$: هزینه عملیاتی هر متر مکعب پساب در حوضچه ذخیره j با کیفیت q

$\tilde{G}_j$: هزینه ثابت احداث حوضچه ذخیره j ام

$\tilde{A}^2_{jkq}$: هزینه ثابت احداث یک متر کانال (یا لوله) بین حوضچه ذخیره j و منطقه تقاضای k از نوع پساب با کیفیت q

$\tilde{\psi}_{jq}$: هزینه نگهداری هر متر مکعب پساب در پایان دوره در حوضچه ذخیره j با کیفیت q

$\tilde{c}^2_{jk}$: هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از حوضچه ذخیره j به منطقه تقاضایk

$\tilde{l}^1_{ij}$: فاصله بین تصفیه‌خانه i و حوضچه ذخیرهj

γ: عدد تبدیل یک دوره زمانی برحسب ثانیه

$\tilde{il}0^2_{jq}$: موجودی پساب نوع q درحوضچه ذخیره j در ابتدای دوره برنامه‌ریزی

$\tilde{d}_{kqt}$: تقاضای منطقه کشاورزی k از پساب نوع q در دوره t

$\tilde{ci}_i$: ظرفیت عملکردی تصفیه‌خانه i در هر دوره

λ: ضریب هدر رفت آب در شبکه

$\tilde{cj}_{jq}$: ظرفیت نگهداری پساب نوع q در حوضچه ذخیره j.

۴-۳- متغیرهای تصمیم

s_{it}: مقدار فاضلاب ورودی به تصفیه‌خانه 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 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 تصفیه‌خانه 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 تأسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر

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

v_{ijq}: اگر کانال و یا لوله برای انتقال پساب نوع q بین تصفیه‌خانه i و حوضچه ذخیره j تأسیس شود یک؛ در غیر این صورت صفر.

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

۵-۳- توابع و محدودیت‌ها

$$\begin{aligned}\text{Min } & \sum_i \tilde{F}_i w_i + \sum_j \tilde{G}_j o_j + \sum_i\sum_j\sum_q \tilde{A}^1_{ijq} v_{ijq} \tilde{l}^1_{ij} + \sum_j\sum_k\sum_q \tilde{A}^2_{jkq} n_{jkq} \tilde{l}^2_{jk} \\ & + \sum_i\sum_j\sum_q\sum_t w_i \tilde{h}_{iq} x_{ijqt} + \sum_j\sum_k\sum_q\sum_t o_j \tilde{z}_{jq} y_{jkqt} + \sum_i\sum_j\sum_q\sum_t \tilde{c}^1_{ij} x_{ijqt} \\ & + \sum_j\sum_k\sum_q\sum_t \tilde{c}^2_{jk} y_{jkqt} + \sum_i\sum_q\sum_t \tilde{\varphi}_{iq} il^1_{iqt} + \sum_j\sum_q\sum_t \tilde{\psi}_{jq} il^2_{iqt}\end{aligned} \quad (۱)$$

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

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

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

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

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

$$\sum_{i \in R_i} s_{it} \le \tilde{ph}^r_t \quad \forall r \in R, \ t \in T \tag{۷}$$

$$s_{it} \le \tilde{ci}_i \ w_i \qquad \forall i \in I, t \in T \tag{۸}$$

$$\sum_i x_{ijqt} \le \tilde{cj}_{jq} \ o_j \quad \forall j \in J, q \in Q, t \in T \tag{۹}$$

$$\sum_j y_{jkqt}(1-\lambda) \ge \tilde{d}_{kqt} \qquad \forall k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۱۰}$$

$$x_{ijqt} = \gamma \ deb^1_{ijqt} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \tag{۱۱}$$

$$y_{jkqt} = \gamma \ deb^2_{jkqt} \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۱۲}$$

$$x_{ijqt} \le M \ v_{ijq} \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \tag{۱۳}$$

$$y_{jkqt} \le M \ n_{jkq} \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۱۴}$$

$$il^1_{iqt} \le c\tilde{li}_{iq} \ w_i \quad \forall i \in I, q \in Q, t \in T \tag{۱۵}$$

$$il^2_{jqt} \le \tilde{cj}_{jq} \ o_j \quad \forall j \in J, q \in Q, t \in T \tag{۱۶}$$

$$v_{ijq} \leq w_i \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \tag{۱۷}$$

$$v_{ijq} \leq o_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \tag{۱۸}$$

$$n_{ijq} \leq o_j \quad \forall i \in I, j \in J, q \in Q \tag{۱۹}$$

$$p_{iqt}, x_{ijqt}, y_{jkqt}, il^1_{iqt}, il^2_{jqt}, s_{it}, deb^1_{ijqt}, deb^2_{jkqt} \geq 0 \quad w_i, o_j, v_{ijq}, n_{ijq} \in \{0,1\} \tag{۲۰}$$

تابع هدف (۱)، مربوط است به مینیمم کردن هزینه‌ها که به‌ترتیب 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 تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره و نیز هزینه انتقال هر متر مکعب پساب از تصفیه خانه به حوضچه ذخیره و از حوضچه ذخیره به مرکز تقاضا درنهایت 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 تصفیه‌خانه در پایان دوره دوم و بعد ازآن را نشان می‌دهد. محدودیت (۳) پساب نوع q ذخیره شده در تصفیه‌خانه 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 کیفیت‌های مختلف می‌باشد. محدودیت (۷) نشان می‌دهد حجم فاضلابی که به مجموعه تصفیه‌خانه‌های 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 می‌کند که 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) و (۱۲) نشان‌دهنده

دبی پساب انتقالی از تصفیه‌خانه به حوضچه‌ذخیره و از حوضچه ذخیره به منطقه تقاضا می‌باشد. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد که اگر کانال(لوله) بین تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره احداث نشد، پسابی منتقل نشود. محدودیت(۱۴) نشان می‌دهد که اگر کانال (لوله) بین حوضچه‌ذخیره و منطقه تقاضا احداث نشد، پسابی منتقل نشود. محدودیت (۱۵) نشان می‌دهد در صورت تأسیس تصفیه‌خانه مقدار پساب ذخیره شده در پایان دوره از ظرفیت آن کمتر باشد. محدودیت (۱۶) نشان می‌دهد در صورت تأسیس حوضچه ذخیره مقدار پساب ذخیره شده در پایان دوره از ظرفیت آن کمتر باشد. محدودیت (۱۷) بیان می‌کند که اگر تصفیه‌خانه تأسیس نشد کانال(لوله‌ای) از آن خارج نشود. محدودیت (۱۸) و (۱۹) بیان می‌کنند که حوضچه ذخیره تأسیس نشد کانال (لوله‌ای) به آن وارد و خارج نشود. محدودیت (۲۰) نیز متغیرهای مثبت و صفر و یک مدل را نشان می‌دهد.

۶-۳- خطی‌سازی

عبارت‌های $w_i x_{ijqt}$ و $o_j y_{jkqt}$ در تابع هدف مسأله به صورت غیر خطی می‌باشد. حال با توجه به مطالعه شرادین و آلامدین [۱۵] 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} و اضافه کردن محدودیت‌های زیر می‌توان معادل خطی آن را نوشت:

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

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

$$u^1_{ijqt} \ge M(w_i - 1) + x_{ijqt} \qquad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۳)$$

$$u^1_{ijqt} \ge 0 \qquad \forall i \in I, j \in J, q \in Q, t \in T \qquad (۲۴)$$

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

$$u_{jkqt}^2 \le Mo_j \quad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۲۶}$$

$$u_{jkqt}^2 \ge M\left(o_j - 1\right) + y_{jkqt} \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۲۷}$$

$$u_{jkqt}^2 \ge 0 \qquad \forall j \in J, k \in K, q \in Q, t \in T \tag{۲۸}$$

۷-۳- روش خیمنز برای تبدیل مدل غیرقطعی به مدل قطعی

برای حل مدل فازی پیشنهادی، از روش خیمنز برای تبدیل مدل غیرقطعی به مدل قطعی، استفاده شده است [۱۶]. اگر فرض شود که $\tilde{c}$ یک عدد فازی مثلثی است که c^m ، c^u و c^l سه نقطه به‌ترتیب محتمل، بدبینانه وخوشبینانه هستند. دو رابطه زیر فاصله مورد انتظار و امید ریاضی عدد مثلثی $\tilde{c}$ می‌باشد.

$$EI(c) = \left[E_1^c, E_2^c\right] = \left[\frac{1}{2}(c^u + c^m), \frac{1}{2}(c^m + c^l)\right] \tag{۲۹}$$

$$EV(\tilde{c}) = \frac{E_1^c + E_2^c}{2} = \frac{c^u + 2c^m + c^l}{4} \tag{۳۰}$$

اگر مدل برنامه‌ریزی فازی با پارامترهای فازی مثلثی به صورت زیر نمایش داده شود:

$$\text{Min } \tilde{c}x \tag{۳۱}$$

$$st: \ \tilde{a}_i x \ge \tilde{b}_i \ , \forall i \tag{۳۲}$$

$$\tilde{a}_i x = \tilde{b}_i \ , \forall i \tag{۳۳}$$

براساس روش خیمنز [۱۶] و مطالعه پیشوایی و ترابی [۱۷] مدل بالا را می توان به صورت مدل پایین نوشت. α مینیمم درجه قابل قبول پذیرش می‌باشد که به‌وسیله

فرد تصمیم‌گیرنده تعیین می‌شود. در نتیجه به کمک تعاریف، فاصله مورد نیاز و امید ریاضی اعداد فازی مثلثی، مدل قطعی با پارامتر α به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\text{Min } EV(\tilde{c})x \tag{۳۴}$$

$$\text{st}: \left[(1-\alpha)E_2^{a_i} + \alpha E_1^{a_i}\right] x \geq \alpha E_2^{b_i} + (1-\alpha)E_1^{b_i} \tag{۳۵}$$

$$\left[(\frac{\alpha}{2})E_2^{a_i} + (1-\frac{\alpha}{2})E_1^{a_i}\right] x \leq (1-\frac{\alpha}{2})E_2^{b_i} + (\frac{\alpha}{2})E_1^{b_i} \tag{۳۶}$$

$$\left[(1-\frac{\alpha}{2})E_2^{a_i} + \frac{\alpha}{2}E_1^{a_i}\right] x \geq \frac{\alpha}{2}E_2^{b_i} + (1-\frac{\alpha}{2})E_1^{b_i} \tag{۳۷}$$

قسمت‌های غیرقطعی تابع هدف (۱) و محدودیت‌های (۷) و(۸) و(۹) و(۱۰) و (۱۵) و (۱۶) را می‌توان به صورت زیر قطعی کرد، در اینجا فقط تبدیل قسمت‌های غیرقطعی به قطعی آورده شده است.

$$\begin{aligned}
&\text{Min} \sum_i \left(\frac{F_i^u + 2F_i^m + F_i^l}{4}\right) w_i + \sum_j \left(\frac{G_i^u + 2G_i^m + G_i^l}{4}\right) o_j \\
&+ \sum_i \sum_j \sum_q \left(\frac{A_{ijq}^{1u} + 2A_{ijq}^{1m} + A_{ijq}^{1l}}{4}\right) v_{ijq} \left(\frac{l_{ij}^{1u} + 2l_{ij}^{1m} + l_{ij}^{1l}}{4}\right) \\
&+ \sum_j \sum_k \sum_q \left(\frac{A_{jkq}^{2u} + 2A_{jkq}^{2m} + A_{jkq}^{2l}}{4}\right) n_{jkq} \left(\frac{l_{jk}^{2u} + 2l_{jk}^{2m} + l_{jk}^{2l}}{4}\right) \\
&+ \sum_i \sum_j \sum_q \sum_t w_i \left(\frac{h_{iq}^u + 2h_{iq}^m + h_{iq}^l}{4}\right) x_{ijqt} \\
&+ \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t o_j \left(\frac{z_{jq}^u + 2z_{jq}^m + z_{jq}^l}{4}\right) y_{jkqt} + \sum_i \sum_j \sum_q \sum_t \left(\frac{c_{ij}^{1u} + 2c_{ij}^{1m} + h_{ij}^{1l}}{4}\right) x_{ijqt} \\
&+ \sum_j \sum_k \sum_q \sum_t \left(\frac{c_{jk}^{2u} + 2c_{jk}^{2m} + c_{jk}^{2l}}{4}\right) y_{jkqt} + \sum_i \sum_q \sum_t \left(\frac{\varphi_{iq}^{1u} + 2\varphi_{iq}^{1m} + \varphi_{iq}^{1l}}{4}\right) il_{iqt}^1 \\
&+ \sum_j \sum_q \sum_t \left(\frac{\psi_{jq}^u + 2\psi_{jq}^m + \psi_{jq}^l}{4}\right) il_{iqt}^2
\end{aligned} \tag{۳۸}$$

$$\sum_{i\in R_i} s_{it} \le \alpha\left(\frac{ph_t^{rl}+ph_t^{rm}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{ph_t^{rm}+ph_t^{ru}}{2}\right)\forall r\in R,\ t\in T \qquad (۳۹)$$

$$s_{it} \le (\alpha\left(\frac{ci_i^{l}+ci_i^{m}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{ci_i^{m}+ci_i^{u}}{2}\right))w_i \ \ \forall i\in I, t\in T \qquad (۴۰)$$

$$\sum_i x_{ijqt} \le (\alpha\left(\frac{cj_{jq}^{l}+cj_{jq}^{m}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{cj_{jq}^{m}+cj_{jq}^{u}}{2}\right))o_j \quad \forall j\in J, q\in Q, t\in T \qquad (۴۱)$$

$$\sum_j y_{jkqt}(1-\lambda) \ge \alpha\left(\frac{d_{kqt}^{u}+d_{kqt}^{m}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{d_{kqt}^{m}+d_{kqt}^{l}}{2}\right) \ \forall k\in K, q\in Q, t\in T \qquad (۴۲)$$

$$il_{iqt}^{1} \le (\alpha\left(\frac{cli_{iq}^{l}+cli_{iq}^{m}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{cli_{iq}^{m}+cli_{iq}^{u}}{2}\right))w_i \ \forall\, i\in I, q\in Q, t\in T \qquad (۴۳)$$

$$il_{jqt}^{2} \le (\alpha\left(\frac{cj_{jq}^{l}+cj_{jq}^{m}}{2}\right)+(1-\alpha)\left(\frac{cj_{jq}^{m}+cj_{jq}^{u}}{2}\right))o_j \forall j\in J, q\in Q, t\in T \qquad (۴۴)$$

۴- 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 به‌استان سمنان محدود است. جمعیت آن در سال ۱۳۹۲، براساس اعلام مرکز آمار کشور ۱۲،۴۲۵،۰۰۰ نفر برآورد شده است. از مهم‌ترین شهرستان‌های استان تهران می‌توان به شهرستان اسلامشهر، شهرستان ری، شهرستان رباط کریم، شهرستان ورامین، شهرستان پاکدشت، شهرستان شهریار و شهرستان قرچک اشاره کرد که با توجه آب و هوای مناسب و زمین‌های حاصلخیز به قطب‌های کشاورزی این منطقه تبدیل شده‌اند[۱۸]. 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 [۱۹] که از شمال به نواحی کوهستانی و از جنوب به نواحی کویری منتهی شده، در نتیجه در جنوب و شمال دارای آب و هوایی متفاوت است. ارتفاع آن در بلندترین نقاط شمال به حدود ۲۰۰۰

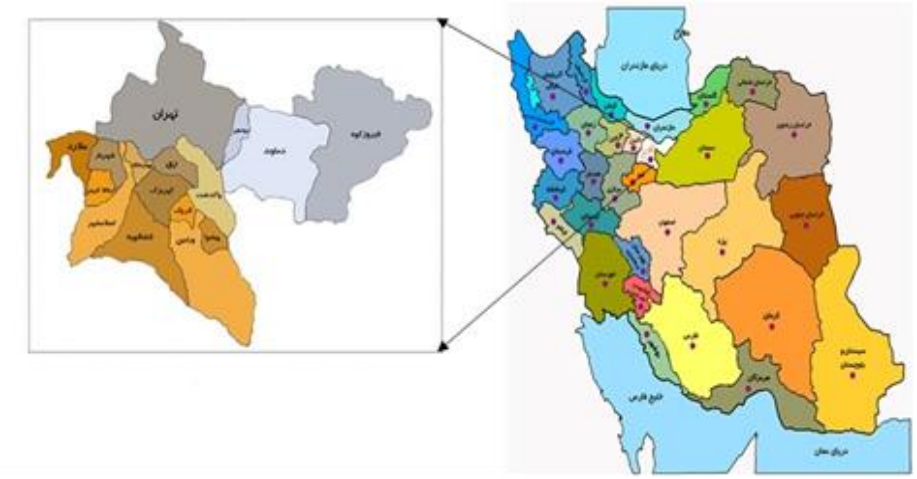
متر و در جنوبی‌ترین نقاط به ۱۰۵۰ متر از سطح دریا می‌رسد که از بزرگ‌ترین مزیت‌های این شهر برای روان شدن فاضلاب و بیرون راندن پساب به حساب می‌آید. تهران به ۲۲ منطقه، ۱۳۴ ناحیه و ۳۷۰ محلّه تقسیم شده است که نزدیک به یک پنجم جمعیت کشور را در خود جای داده است در صورتی که تنها نزدیک به ۳ درصد آب کشور را در اختیار دارد. موقیت جغرافیایی استان تهران و شهر تهران در شکل ۲ نشان داده شده است.

با توجه به افزایش مصرف آب در سال‌های آینده و در اولویت بودن تأمین آب شرب نسبت به مصارف دیگر همچون کشاورزی و اینکه دیگر جایی در تهران برای سد زدن وجود ندارد، باید استفاده از آب‌های غیرمتعارف همچون فاضلاب و پساب در تهران آغاز شود. در زمان کنونی سالیانه یک میلیارد و ۴۰۰ میلیون مترمکعب پساب در استان تهران تولید می‌شود که ۸۰۰ میلیون متر مکعب از این میزان در شهر تهران و۶۰۰ میلیون متر مکعب در مابقی شهرهای استان تهران تولید می‌شود. 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. در سال‌های اخیر نیز محققان زیادی در این زمینه به مطالعه و تحقیق پرداخته‌اند که بیشتر آنها به جنبه‌های کیفی این مهم توجه کرده‌اند.

در این مقاله برای راستی‌آزمایی مدل با توجه به اهمیت این موضوع برای استان تهران به‌ویژه در مورد فاضلاب‌هایی که در نیمه جنوبی شهر تهران و همچنین در شهرستان‌های جنوبی استان تولید می‌شوند به جمع‌آوری اطلاعات از سازمان‌های زیربط از جمله شرکت آب منطقه‌ای تهران، آب و فاضلاب تهران و مرکز آمار ایران پرداخته‌ایم. استراتژیک و بلندمدت بودن تصمیم‌گیری پیرامون احداث یک تصفیه‌خانه و یا محل ذخیره برای بهترین پاسخگویی به تقاضای مناطق کشاورزی بر اهمیت این کار افزود.

مفروضات زیر در مورد این مطالعه موردی در نظر گرفته شده است: ۱- در این مقاله به برنامه‌ریزی فاضلاب‌های تولیدی نیمه جنوبی شهر تهران و همچنین شهرستان‌های نزدیک یه محل تقاضا پرداخته‌ایم؛ ۲- برای نزدیکی مدل به واقعیت و افزایش دقت جمع‌آوری اطلاعات، در این تحقیق ۷ قطب تولید فاضلاب در نظر گرفته شده است که هر کدام می‌توانند شامل یک یا چند منطقه شهری باشند (جدول ۱)؛ ۳-

در مورد قطب‌های جنوبی شهر تهران این نکته قابل ذکر است که فاضلاب‌های که در مناطق بالاتر تولید و به این مناطق سرازیر می‌شوند نیز در نظر گرفته شده‌اند؛ ۴- تصفیه‌خانه جنوب را که هم اکنون در حال بهره‌برداری است، با هزینه احداث صفر در نظر گرفته‌ایم که احداث شود؛ ۵- فرض بر این است که پس از احداث تصفیه‌خانه به‌راحتی می‌توان فاضلاب را به آن انتقال داد و با توجه به در نظر گرفتن ۷ قطب تولید فاضلاب به طور مجزا و پیش‌بینی تأسیس تصفیه‌خانه در هر کدام از این قطب‌ها هیچ محدودیتی در این کار وجود ندارد؛ ۶- هر تصفیه‌خانه امکان تصفیه و ذخیره فاضلاب با کیفیت‌های مورد تقاضا را داشته باشد؛ ۷- حوضچه‌های ذخیره می‌تواند انواع کیفیت‌های آب را در خود ذخیره و انتقال دهد؛ ۸- تقاضاهای مناطق مختلف براساس نیازی است که پیش‌بینی می‌شود به‌وسیله سایر منابع آب همچون رودخانه‌ها برآورده نشود که با نظر کارشناسان جهاد کشاورزی استان تهران محاسبه شده است. به دلیل نبود فضا تنها اطلاعات مربوط به جمعیت قطب‌ها و و مقدار تولید فاضلاب در جدول‌های ۱و۲ آورده شده است. شکل۳ منطقه مورد مطالعه را به صورت جزئی نشان می‌دهد که در آن قطب‌های تولید فاضلاب (دایره‌های سیاه)، نقاط بالقوه احداث تصفیه‌خانه فاضلاب، محل ذخیره و همچنین مناطق تقاضا نشان داده شده است [۱۹].



شکل ۲ موقعیت جغرافیایی استان تهران و شهرستان‌های آن

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

جدول ۱ مقدار تولید فاضلاب (متر مکعب)

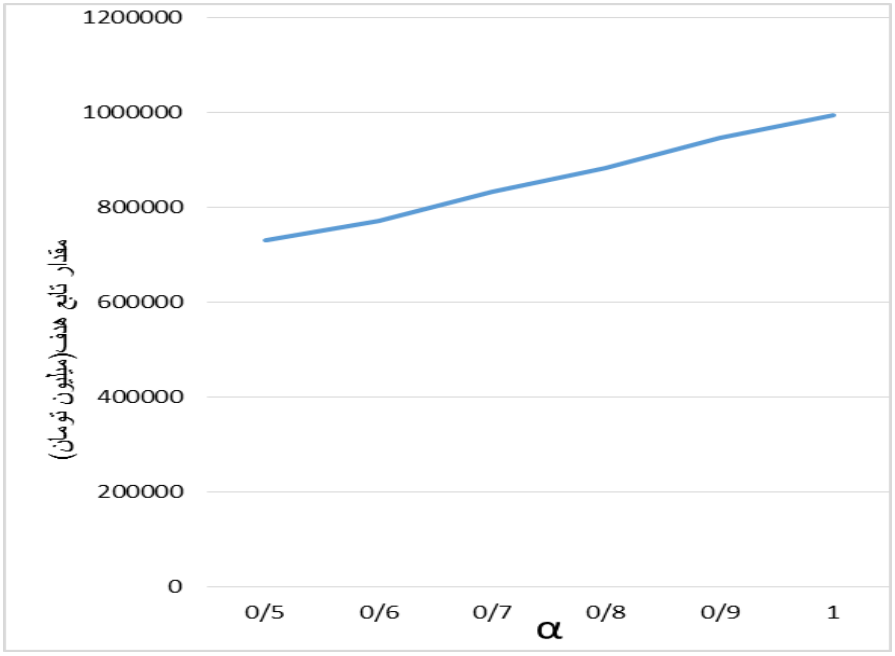
	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
قطب۱	۸۰۴۹۴۴۹۲	۸۴۸۸۵۳۱۸	۷۲۲۰۱۳۷۳	۸۱۷۱۲۰۴۴
قطب۲	۴۲۱۴۲۶۸۷	۴۳۶۲۳۳۵۶	۴۱۰۲۴۶۸۶	۴۹۱۶۱۳۵۰
قطب۳	۴۱۴۱۱۵۵۳	۴۲۸۳۸۶۴۵	۴۰۳۴۱۲۳۵	۴۸۵۵۷۳۷۰
قطب۴	۱۰۶۰۸۲۳۵	۱۱۵۳۰۶۹۱	۱۲۹۱۶۳۹۴	۱۳۷۶۳۳۲۴
قطب۵	۱۲۲۱۲۲۴۲	۱۳۲۷۴۱۷۶	۱۱۴۱۵۷۹۱	۱۵۰۸۸۳۷۳
قطب۶	۹۳۲۳۳۷۳	۱۰۱۳۴۱۰۱	۱۰۷۱۵۳۲۷	۱۱۷۰۱۹۱۶

جدول ۲ جمعیت قطب‌ها

قطب	مناطق	جمعیت
۱	۲۰-۱۷-۱۶-۱۵-۱۲-۱۱-۱۰	۲۴۳۹۳۴۷
۲	۱۹-۱۸-۹	۸۲۸۱۴۹
۳	۱۴-۱۳	۷۹۲۸۲۸
۴	پاکدشت - قرچک	۵۱۲۴۷۵
۵	شهریار	۵۸۹۹۶۳
۶	اسلامشهر	۴۵۰۴۰۴
۷	ورامین	۴۲۹۷۹۹

۵- نتایج محاسباتی

پس از تکمیل اطلاعات مطالعه موردی، مدل به‌وسیله نرم‌افزار گمز برای دستیابی به جواب بهینه حل گردید و نتایج حاصل در همین بخش ارائه شده است. در این مقاله با توجه به در نظر گرفتن عدم قطعیت و تأثیری که می‌تواند در مقدار تابع هدف داشته باشد، نخست مدل را به ازای مقادبر مختلف α حل کرده و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج به دست آمده به‌خوبی تأثیر عدم قطعیت بر مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد، همان گونه که در شکل ۴ مشهود است با افزایش α، مدل برای مقابله با شرایط عدم قطعیت و پاسخگویی به تقاضا تصمیم به تأسیس تسهیلات بیشتری می‌گیرد، درنتیجه تابع هدف (هزینه) افزایش پیدا می‌کند. تصفیه‌خانه‌های ۱،۲،۳،۱۰،۱۲ با توجه به موقعیت مناسبی که نسبت به حوضچه‌های ذخیره دارند به ازای همه مقادیر α تأسیس می‌شوند. در انتخاب مقادیر مختلف α و نیز با افزایش آن، مدل تمایل به تأسیس تصفیه‌خانه‌هایی دارد که در شهرستان‌ها واقع‌اند همچون تصفیه‌خانه۱۰، ۱۲، ۱۱ و ۱۳. این تصفیه‌خانه‌ها به دلیل واقع شدن در قطب‌های با جمعیت کمتر (قطب‌های۴،۵،۶و۷) از ظرفیت بالقوه کمتری برخوردارند که سبب هزینه تأسیس پایین می‌شود. از طرفی چون به حوضچه‌های ذخیره نزدیک‌ترند، مدل آنها را تأسیس می‌کند. در ادامه با توجه به اهمیت ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها و تأثیر در مقدار تابع هدف و با توجه هزینه احداث هر تصفیه‌خانه نسبت به ظرفیت عملکردی آن اقدام به محاسبه مقدار تابع هدف در ظرفیت‌های مختلف در حالت α برابر ۰/۷ نموده‌ایم که نتایج عددی در جدول ۴ ارائه شد. همان طور که مشاهده می‌شود در پایین‌ترین ظرفیت عملکردی، بیشترین تعداد تأسیس تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره را خواهیم داشت اما با افزایش تدریجی ظرفیت‌ها و با توجه به افزایش توان پاسخگویی هر تصفیه‌خانه مدل تعداد کمتری را تأسیس می‌کند و با لوله‌کشی‌های طولانی‌تر به مناطق کشاورزی، تقاضا را پاسخ می‌دهد.



شکل ۴ نمودار تغییرات تابع هدف برای αهای مختلف

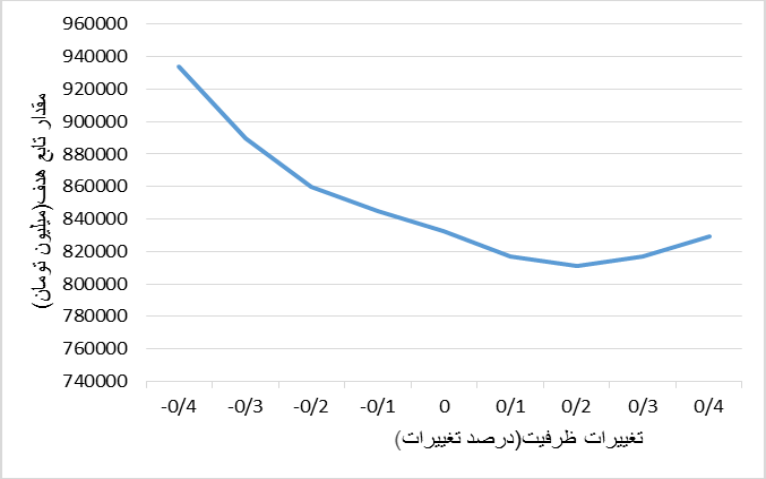
جدول ۳ نتایج مدل برای مقادیر مختلف α

خروجی مدل / α	مقادر تابع هدف	نقاط انتخابی برای احداث تصفیه‌خانه	نقاط انتخابی برایاحداث حوضچه ذخیره
۰/۵	۷۴۹۵۶۵	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۳،۵،۷
۰/۶	۷۷۱۵۸۷	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲	۱،۳،۵،۸،۹
۰/۷	۸۳۲۲۶۴	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۵،۸،۹
۰/۸	۸۸۳۲۷۵	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۴،۵،۸،۹
۰/۹	۹۴۶۰۹۴	۱،۲،۳،۸،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۴،۵،۸،۹
۱	۹۷۳۹۸۶	۱،۲،۳،۸،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۴،۵،۸،۹

جدول ۴ نتایج مدل برای ظرفیت‌های مختلف در حالت α برابر ۰/۷

خروجی مدل / تغییرات ظرفیت	مقادیر تابع هدف	نقاط انتخابی برای احداث تصفیه‌خانه	نقاط انتخابی برای احداث حوضچه ذخیره
+۰/۴	۸۲۹۰۵۶	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۴،۵،۸
+۰/۳	۸۱۶۷۴۷	۱،۲،۳،۱۰،۱۱	۱،۳،۵،۸
+۰/۲	۸۱۰۹۳۶	۱،۲،۳،۱۰،۱۲	۱،۳،۵،۸
+۰/۱	۸۱۷۲۲۱	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲	۱،۳،۵،۸
۰	۸۳۲۲۶۴	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۵،۸،۹
−۰/۱	۸۴۴۷۴۸	۱،۲،۳،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۵،۸،۹
−۰/۲	۸۵۹۹۲۸	۱،۲،۳،۷،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۴،۵،۸،۹
−۰/۳	۸۸۹۵۲۲	۱،۲،۳،۷،۸،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۵،۸،۹
−۰/۴	۹۳۳۷۷۶	۱،۲،۳،۴،۷،۸،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۱،۳،۵،۸،۹

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با بیش از ۲۰ درصد کاهش ظرفیت هر تصفیه‌خانه، برای پاسخ‌گویی کامل به تقاضا نیاز به تأسیس تصفیه‌خانه‌های بیشتری خواهد بود که با در نظر گرفتن مجموع هزینه تأسیس آنها، تابع هدف به شدت افزایش پیدا می‌کند. مقدار بهینه تابع هدف نیز به ازای ۲۰ درصد افزایش ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها به دست خواهد آمد. اما در پایان با افزایش ظرفیت به بیش از ۲۰ درصد دوباره شاهد افزایش هزینه‌ها خواهیم بود که علت آن بر می‌گردد به محدودیت میزان تولید فاضلاب قطب‌های جمعیتی معرفی شده که نشان می‌دهد هر اندازه هم به ظرفیت تصفیه‌خانه‌ها افزوده شود چون فاضلابی برای تصفیه در آن قطب‌ها وجود ندارد مدل تصمیم به تأسیس تصفیه‌خانه‌هایی در مناطق دیگر می‌گیرد تا بتواند پاسخگوی تقاضا باشد.



شکل۵. نمودار تابع هدف بر حسب تغییرات ظرفیت برای α برابر ۰/۷

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

در این مقاله مدلی ریاضی برای طراحی شبکه تصفیه و انتقال پساب به مناطق کشاورزی ارائه شده است؛ به‌گونه‌ای که مدل به صورت همزمان برای مکانیابی تصفیه‌خانه، حوضچه ذخیره، 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. عدم قطعیت پارامترهای مسأله را به صورت فازی در نظرگرفتیم و سپس به کمک روش‌های موجود در ادبیات آن را به صورت قطعی مدل کردیم. برای بررسی عملکرد مدل در شرایط عدم قطعیت اقدام به حل مدل به ازای مقادیر مختلف α (مینیمم درجه پذیرش) نمودیم. با افزایش تعداد تسهیلات تعداد لوله (کانال) ارتباطی نیز افزایش پیدا می‌کند ولی چون طول آنها کاهش می یابد، در نتیجه توازنی نسبی میان مجموع هزینه تأسیس آنها برای حالات مختلف برقرار است. همچنین در پایین‌ترین ظرفیت عملکردی، بیشترین تعداد تأسیس تصفیه‌خانه و حوضچه ذخیره را خواهیم داشت به عنوان تحقیقات آتی می‌توان منابع دیگر همچون سدها و رودخانه‌ها را به عنوان تأمین‌کننده بخشی از آب کشاورزی، در مدل در نظر گرفت. برای مدل کردن عدم قطعیت پارامترها از روش‌های دیگر همچون روش استوارسازی استفاده کرد.

۷- منابع

[1] Zhang C. (2005) A study on urban water reuse management modeling.

[2] Santamaria J. W. (1977) Designing to save energy, American School and University, Chicago.

[3] mehrnews.com/news/2335498/

[4] Rayat P. S., Ahmadi K. R., Abbasnejad T. (2016) "Applying the qualitative approach Meta synthesis for provide a comprehensive model of assemenet ofTHE sustainablity in suuply chain", *Modern Researches in Decision Making*, 1(1): 139-166, (In Persian).

[5] Hajirahimi M., Torkamani J. (2001) "The role of the agricultural section in the economic growth path using analysis model application", *Journal of Agricultural Economics and Development*, 41(2): 12-34, (In Persian).

[6] Howell T. A. (2001) "Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture", *Agronomy Journal*, 93(2): 281-289. Chicago.

[7] Razmkhah H., Abrishamchi A., Torkian A. (2010) "Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques: A case study on Jajrood River (Tehran, Iran)", *Journal of Environmental Management*, 91(4): 852-860, Chicago.

[8] Schwartz M., Mays L, W. (1983) "Models for water reuse and wastewater planning", *Journal of Environmental Engineering*, 109(5): 1128-1147.

[9] Vieira J., Lijklema L. (1989) "Development and application of a model for regional water quality management", *Water Research*, 23(6): 767-777.

[10] Chung G., Lansey K., Bayraksan G. (2009) "Environmental and water resources congress", *Environmental Modelling & Software*, 24(4): 449-462.

[11] Mehrabadi M., Nasrabadi A. (2011) "Effect of continuous management in the optimal use of urban flood and municipal wastewater to improve the environment in developing countries", *Environmental and Water Resources Congress*.

[12] Yi, L., Jiao, W., Chen, X., Chen, W. (2011) "An overview of reclaimed water reuse in China", *Journal of Environmental Sciences*, 23(10): 1585-1593.

[13] Agrafioti E., Diamadopoulos E. (2012) "A strategic plan for reuse of treated municipal wastewater for crop irrigation on the Island of Crete", *Agricultural Water Management*, 105: 57-64.

[14] Seshadri B., Bolan N. S., Kunhikrishnan A., Chowdhury S., Thangarajan R., Chuasavathi T. (2015) "Recycled water irrigation in Australia", *In Environmental Sustainability*, 12: 39-48.

[15] Sherali H., Alameddine A. (1992) "A new reformulation-linearization technique for bilinear programming problems", *Journal of Global Optimization*, 2(4): 379–410.

[16] Jiménez M., Arenas M., Bilbao A. (2007) "Linear programming with fuzzy parameters: an interactive method resolution", *European Journal of Operational Research*, 177(3): 1599-1609.

[17] Pishvayi M.S., Talebi S.A. (2010) "A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, 20: 2668–2683.

[18] Mollazehd Y. B., Pooya A. (2016) A longtitudinal study of changes pattern in manufacturing strategy in productiion firms of Iran during horizon 2010-2016, *Modern Researches in Decision Making*, 1(2): 171-193, (In Persian).

[19] https://www.google.com/maps./