مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۱/۲، ص. ۳-۱۲

Original Article

مدیریت پایدار زباله‌های جامد شهری با استفاده از مدل برنامه‌ریزی خطی کسری تصادفی (مطالعه‌ی موردی: شهر یزد)

یحیی زارع مهرجردی* **(استاد)**
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه یزد
فهیمه فارغ (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی صنایع، دانشگاه علم وهنر

شهر یزد دارای سه منطقه‌ی شهرداری است که زباله‌های تولید شده توسط شهروندان هم به‌صورت تفکیک از مبدأ و هم تفکیک از محل دفن زباله برای بازیافت ارسال می‌شود. در این تحقیق به منظور پیاده کردن یک سیستم پایدار مدیریت ضایعات که از نظر اقتصادی و اجتماعی تأثیر به‌سزایی در بهداشت و سلامت محیط زیست مردم دارد، از مدل ژئو و هانگ بدین دلیل که شرایطی را در نظر می‌گیرد که تابع هدف از نسبت دو مقدار مختلف تشکیل شده باشد و مقادیر سمت راست محدودیت‌ها تصادفی باشند؛ استفاده شده است. با توجه به داده‌های مسئله و نتایج به‌دست آمده از حل مدل برنامه‌ریزی کسری با استفاده از نرم‌افزار Lingo چنین نتیجه می‌شود که در مدل برنامه‌ریزی کسری بین کارایی سیستم و سطح احتمال رابطه متقابل وجود دارد و با افزایش آن کارایی سیستم افزایش و هزینه‌ی سیستم کاهش پیدا می‌کند. همچنین مدل نسبت به پارامتر درآمد حاصل از بازیافت حساسیت بالاتری دارد. با افزایش درآمد کارایی به سطح بالاتری منتقل می‌شود. در مدل مذکور میزان جریان زباله از محل دفن به محل بازیافت در نظر گرفته نشده است که در این مقاله محققین به آن پرداخته‌اند.

واژگان کلیدی: مدیریت ضایعات جامد، شهر یزد، برنامه‌ریزی کسری، برنامه‌ریزی احتمالی، برنامه‌ریزی کسری خطی تصادفی.

yazm2000@yahoo.com
f.faregh@yahoo.com

۱. مقدمه

واژه‌ی «زباله» معناهای متفاوتی دارد و در حالت کلی به معنای «نخواستن» است. بدین معنا که ماده یا محصولی برای مصرف‌کننده‌یی ارزش نداشته باشد و آن را دور می‌ریزد؛ اما این زباله می‌تواند برای شخص دیگری در موقعیتی دیگر یا حتی در فرهنگ دیگر ارزش داشته باشد. زباله انواع مختلف دارد: زباله‌ی تر، زباله‌ی خشک (جامد) و زباله‌ی صنعتی. ما در این پژوهش تنها به مبحث زباله‌ی جامد[1] (SW) و مدیریت آن می‌پردازیم.[1] در سیستم مدیریت زباله‌های جامد با توجه به میزان تولید و ترکیب پسماند، گزینه‌های متفاوتی برای مدیریت وجود دارد که علاوه بر هزینه‌ها، مشکلات زیست‌محیطی مختلفی نیز در بر دارد. از جمله روش‌های دفع زباله می‌توان به بازیافت، سوزاندن، دفن بهداشتی و تهیه کمپوست با استفاده از سیستم‌های سنتی، نیمه‌سنتی، مدل‌های پیشرفته هوازی و غیر هوازی اشاره کرد. بنابراین برای انتخاب گزینه مناسب به ابزارهای تصمیم‌گیری نیاز است.

دفن ضایعات به‌دلیل کم هزینه بودن، رایج‌ترین شیوه برای دفع ضایعات جامد است. با این وجود، ایجاد مکان‌های جدید برای دفن ضایعات، با توجه به محدودیت‌های منابع زمینی امکان‌پذیر نیست. به‌علاوه ریسک بالای آلودگی در مکان‌های دفن ضایعات وجود دارد. برای مثال می‌توان به متصاعد شدن گازها از این مکان اشاره کرد که منجر به مسائل محیطی، بهداشتی و حفاظتی جدی می‌شود. بنابراین با توجه به تأثیرات منفی روش دفن ضایعات بر محیط زیست و بهداشت عمومی، روش بازیافت از درجه اهمیت بالاتری در مدیریت جامع ضایعات برخوردار شده است زیرا نه‌تنها می‌توان ضایعات را با این روش کاهش داد، بلکه می‌توان با بازیابی مواد، از ضایعات آلی و قابل بازیافت نیز کسب درآمد کرد.[1-4]

تغییر مسیر جریان ضایعات به سمت تأسیسات بازیافت، باعث افزایش عمر مکان‌های دفن و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی خواهد شد ولی ممکن است با توجه به هزینه‌های حمل‌ونقل و عملیاتی، به هزینه‌های سیستمی بالاتری منجر شود. هدف از پیاده کردن یک سیستم پایدار مدیریت ضایعات، انتخاب مناسب‌ترین گزینه‌ی دفع ضایعات با توجه به شرایط محیطی، اجتماعی و اقتصادی جامعه است[5و6] که این

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۳/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۵/۲/۱۸، پذیرش ۱۳۹۵/۴/۲۶.

امر منجر به بهینه کردن سامانه‌ی مدیریت پسماند می‌شود. مدیریت پایدار یا مدیریت جامع ضایعات ممکن است از نظر اقتصادی در وضعیت بودجه جمع‌آوری و دفن ضایعات و از نظر اجتماعی بر هویت مردم تأثیرگذار باشد. انسان‌ها به اهمیت پاکی محیط زیست پی برده و تأثیر آن را در بهداشت و سلامت خود مشاهده کرده‌اند.

ایده مدل‌سازی مدیریت ضایعات به سال ۱۹۷۰ بازمی‌گردد اما در طی این سال‌ها با تغییرات زیادی همراه بوده است. تانسکانن[۲] (۲۰۰۰)[۷] در مقاله‌یی تحت عنوان «استراتژی‌های برنامه‌ریزی برای مدیریت ضایعات جامد شهری» بیان داشت که مدل‌های اولیه‌ی مدیریت ضایعات جامد (دهه ۱۹۷۰)، مدل‌های بهینه‌سازی بوده‌اند که تنها یک جنبه‌ی خاص مشکل را در نظر می‌گرفتند؛ مانند جریان وسایل نقلیه، ایستگاه‌های حمل و غیره. مک‌دونالد[۳] (۱۹۹۶)[۸] در مقاله‌ی «سیستم‌های پشتیبانی فضایی چندشاخصه برای برنامه‌ریزی ضایعات جامد» چنین گفته شد که در مدل‌سازی‌های دهه‌ی ۱۹۸۰ برای سیستم اولیه مرز قائل شده‌اند و آن را به مدیریت ضایعات شهری مبدل ساختند. این بدان معناست که به‌جای آن‌که به تک‌تک فاکتورها به‌صورت جداگانه نگاه کنند به رابطه‌ی بین آن‌ها پرداخته‌اند به‌علاوه پیشرفت رایانه نیز کمک شایانی به بهبود مدل‌ها کرد. در همین دهه انگلیهارد[۴] (۱۹۹۰) مبحث بازیافت را در مقاله‌یی تحت عنوان «ارزیابی اقتصادی بازیافت در مدیریت ضایعات شهرهای کوچک» به مدل‌های فوق اضافه کرد، اگرچه تا آن زمان جنبه‌ی مدیریت پایدار یا مدیریت جامع ضایعات در مباحث مطرح نشده بود.

بیشتر مدل‌های دهه‌ی ۱۹۹۰ شامل بازیافت و روش‌های دیگر مدیریت ضایعات بودند، مانند مدلی که چانگ و وی[۵] (۱۹۹۹)[۹] ارائه کرد. اما هنوز در مدل‌های ارائه‌شده در این دهه تنها به جنبه‌های اقتصادی و محیطی پرداخته بودند و جنبه‌ی اجتماعی را در نظر نگرفته بودند. بنابراین پتز[۶] (۲۰۰۰)[۱۰] در مقاله‌ی خود با عنوان «مدیریت جامدات شهری» بیان می‌کند که مدیریت پایدار در زمینه ضایعات باید دربرگیرنده شرایط اقتصادی، محیطی و اجتماعی باشد. شکدار و همکارانش[۷] (۲۰۰۱)[۱۱] یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی برای حل یک برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه کردند که این مدل شامل کلیه فعالیت‌ها از جمع‌آوری زباله تا دفع کامل است. سالانو[۸] (۲۰۰۲)[۱۲] از مدل برنامه‌ریزی خطی برای مدیریت جامع ضایعات در تحقیقی با عنوان «مدیریت ضایعات جامد بر پایه‌ی چرخه‌ی حیات» استفاده کردند که به انتخاب راهبردهای موجود با توجه به اهدافی از جمله هزینه، انرژی و آلودگی‌های محیطی کمک می‌کند. کاستی و همکارانش[۹] (۲۰۰۴)[۱۳] استراتژی‌های تصمیم‌گیری را با توجه به پارامترهای محیطی در زمینه‌ی مدیریت ضایعات جامد در تحقیقی با عنوان «مدل‌های تصمیم‌گیری مناسب محیطی در مدیریت ضایعات جامد شهری» بیان کردند. هانگ و همکارانش[۱۰] (۲۰۰۷)[۱۴] در مقاله‌یی باعنوان «مدل‌های تصمیم‌گیری پایدار جدید در مبحث مدیریت ضایعات جامد شهری» برخی مدل‌های تصمیم‌گیری را ارائه کردند که می‌تواند مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه را در شرایطی که اهداف با یکدیگر قابل مقایسه نیستند حل کند. ژئو و همکارانش[۱۱] (۲۰۱۱)[۱۵] مدیریت پایدار ضایعات جامد را تحت شرایط عدم قطعیت با رویکرد برنامه‌ریزی کسری خطی تصادفی در تحقیقی باعنوان «رویکرد برنامه‌ریزی کسری خطی تصادفی برای مدیریت پایدار ضایعات» ارائه کرد تا بتواند هم مشکل عدم قطعیت را حل کند و هم همزمان با آن کارایی سیستم را مورد ارزیابی قرار دهد. از آنجا که در برنامه‌های سازمان شهرداری، بیشینه‌سازی بازیافت زباله‌ها از اولویت‌ها و اهداف سازمان به شمار می‌رود، بیشینه‌سازی کارایی سیستم مدیریت ضایعات هدف گرفته شده است. در این پژوهش از آنجا که داده‌ها قطعی نیستند و احتمالی‌اند از مدل ژئو و همکارانش (۲۰۱۱)[۱۵] به‌دلیل در نظرگرفتن عدم قطعیت در مدل و با هدف بهینه‌سازی کارایی سیستم استفاده شده است.

۲. متدولوژی

۱.۲. برنامه‌ریزی کسری خطی[۱۲] (LFP)

برنامه‌ریزی کسری به‌عنوان یکی از فنون تحقیق در عملیات، یک ابزار مهم برنامه‌ریزی در طول چهار دهه‌ی گذشته است که در زمینه‌های گوناگونی مانند تخصیص منابع، حمل‌ونقل، برنامه‌ریزی تولید و مالی و ... به‌کار گرفته شده است. برنامه‌ریزی کسری به‌طورکلی جهت مدل‌سازی مسائل واقعی با یک یا چند هدف استفاده می‌شود. این روش در برنامه‌ریزی تولید بسیار کاربرد دارد، به‌عنوان مثال نسبت فروش به هزینه نمونه‌یی از اهداف کسری در برنامه‌ریزی تولید است.

گیلمر و گموری، برنامه‌ریزی کسری را در صنعت کاغذ به‌کار گرفتند و نشان دادند که کمینه‌سازی نسبت ضایعات به میزان استفاده از مواد خام مهم‌تر از کمینه‌سازی میزان ضایعات است. برخلاف اغلب مدل‌های ریاضی برنامه‌ریزی تولید که هدف آن‌ها بیشینه‌سازی سود یا کمینه‌سازی هزینه و غیره است. برنامه‌ریزی کسری مدیران را قادر می‌سازد تا با در نظر گرفتن تأثیر همزمان چندین تابع هدف به محاسبه‌ی بهره‌وری و کارایی سازمان بپردازند.

به‌عبارت دیگر، مهم‌ترین دلیل استفاده از این روش آن است که توابع هدف کسری، در هر شرایطی اعم از قطعیت و عدم قطعیت، شاخصه‌ی عملکردی مهمی محسوب می‌شود. اما حالتی که در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد حالتی است که توابع صورت و مخرج، توابع خطی از متغیرهای تصمیم هستند که آن را مسائل برنامه‌ریزی کسری خطی می‌نامند. مدل برنامه‌ریزی خطی کسری در ادامه تشریح شده است.

$$\mathrm{Max(Min)}\frac{C^t x+\alpha}{D^t x+\beta}$$

$$s.t \quad Ax=b \quad x\geq 0 \qquad (1)$$

C^t، D^t بردارهای سطری $n\times 1$ هستند که نماد t بالای C، D نشان‌دهنده‌ی ترانهاده‌ی این بردارهاست، A یک ماتریس $m\times n$ است و b بردار ستونی است؛ β و α ثابت‌های عددی‌اند. حال شرایط زیر را در نظر بگیرید:

۱. برای تمام مقادیر x داریم: $D^t x+\beta\rangle 0$؛

۲. تابع هدف به‌صورت پیوسته مشتق‌پذیر است؛

۳. فضای جواب تهی است و همچنین کران‌دار باشد.

چنانچه مدل برنامه‌ریزی کسری شرایط فوق را داشته باشد در این صورت مدل فوق آن به‌صورت زیر دارای دوگان خواهد بود:

$$\min g(y,z)=z$$
$$A^t y+D^t z\geq c^t$$
$$-B^t y+\beta z=\alpha$$
$$y\geq 0 \qquad (2)$$

که در آن y یک بردار ستونی با m مؤلفه، Z یک متغیر مقیاس و نماد t نشان‌دهنده‌ی ترانهاده‌ی ماتریس است.

۱.۱.۲. روش‌های حل برنامه‌ریزی کسری یک هدف

- روش چارنز و کوپر: در سال ۱۹۶۲ چارلز و کوپر مسئله‌ی فوق را با تغییر متغیر به برنامه‌ی خطی تبدیل کردند[۱۶]:

$$T=\frac{1}{D^t x+\beta} \qquad y=Tx \qquad (3)$$

با این تغییر مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی مطابق فرمول ۴ به‌دست آمد. برای حالتی که مخرج کسر در ناحیه‌ی امکان‌پذیر مثبت باشد، مدل عبارت است از:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Max(min)} C^t y + \alpha T \\ &s.t \quad Ay - bT = ۰, D^t y + \beta T = ۱ \quad y > ۰, T > ۰ \end{aligned} \qquad (۴)$$

و برای حالتی که مخرج کسر در ناحیه‌ی امکان‌پذیر منفی باشد مدل عبارت خواهد بود از:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Max(min)} - C^t y - \alpha T \\ &s.t \quad Ay - bT = ۰, D^t y + \beta T = -۱ \quad y > ۰, T > ۰ \end{aligned} \qquad (۵)$$

برای این که بدانیم این دو برنامه هرکدام در شرایط خود معادل برنامه‌ی اصلی است یا نه،کافی است y را مساوی Tx قرار داده و از معادله‌ی $D^t y + \beta T = ۱$ برای مدل اول و از معادله‌ی $D^t y + \beta T = -۱$ برای مدل دوم T را به‌دست آورده و در تابع هدف جایگزین می‌کنیم، خواهیم دید که در دو حالت به مدل اصلی دست پیدا می‌کنیم. اکنون سه حالت ممکن وجود دارد که عبارت‌اند از:

۱. اگر مخرج در تمام ناحیه‌ی امکان‌پذیر مثبت باشد مدل اول را حل می‌کنیم.

۲. اگر مخرج در تمام ناحیه‌ی امکان‌پذیر منفی باشد مدل دوم را حل می‌کنیم.

۳. اگر بخشی مثبت و بخشی منفی باشد در بخش مثبت مدل ۱ و در بخش منفی مدل ۲ را حل می‌کنیم و از بین این دو جواب به‌دست آمده بهترین را انتخاب می‌کنیم.

- الگوریتم گیلمر و گموری: در این روش فرض بر آن است که S مجموعه امکان‌پذیر محدب و مخرج کسر تابع هدف مخالف صفر است. همچنین f که تابع هدف کسری مسئله است روی ناحیه‌ی امکان‌پذیر S شبه محدب و شبه معقر است. با این فرضیات ثابت می‌شود که تابع هدف دارای جواب بهینه‌ی کلی روی ناحیه‌ی S است و این جواب حتماً در یکی از نقاط گوشه واقع می‌شود. روشی که در اینجا مطرح می‌شود با یک جواب پایه‌یی اولیه شروع می‌کند و سپس با توجه به جهت بهبود تابع هدف و مقداری که در این جهت می‌توان حرکت کرد به جواب پایه‌ی بعدی حرکت می‌کند. جواب بهینه موقعی به‌دست می‌آید که دیگر جهتی برای بهبود پیدا نشود. از آنجا که در این روش فقط جواب‌های پایه به‌دست می‌آیند و هر جوابی از جواب قبلی باید بهتر باشد و این که تعداد جواب‌های حدی یک ناحیه محدب محدود است بنابراین این روش از همگرایی لازم نیز برخوردار است.

۲.۲. برنامه‌ریزی احتمالی

برنامه‌ریزی تصادفی بدین شرح است که برخی یا همه‌ی پارامترهای بهینه‌سازی به‌جای کمیت‌های معین با متغیرهای تصادفی بیان می‌شوند. در مسائل واقعی، ماتریس ضرایب، پارامترهای راست هر قید و ضرایب تابع هدف در عمل معین نیستند. به‌طور کلی، این ضرایب در طبیعت اغلب تصادفی‌اند و بسته به ماهیت و نوع مسئله ممکن است چند منبع برای متغیرهای تصادفی وجود داشته باشند. مثلاً در طراحی هواپیما و موشک‌ها، نیروهای وارد بر آن‌ها به شرایط جوی حاکم در زمان پرواز بستگی دارد. این نیروها را نمی‌توان از پیش به‌طور دقیق تعیین کرد بنابراین باید آن‌ها را به‌عنوان متغیرهای تصادفی در حل این نوع مسائل بررسی کرد.

ایده‌ی اصلی در حل مسائل برنامه‌ریزی تصادفی، تبدیل آن‌ها به مسائل قطعی معادل است. مسائل قطعی حاصل را می‌توان با استفاده از روش‌های شناخته‌شده برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی حل کرد.[۱۷-۲۲] شکل کلی مسئله‌ی اصلی برنامه‌ریزی با قیود احتمالی مجزا را چنین در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned} &\mathrm{Max}\, z \quad \sum_{j=۱}^{n} c_j x_j \\ &S.t \quad P\left\{\sum a_{ij} x_j \le b_i\right\} \ge \alpha_i \\ &a_i \in [۰, ۱] \quad x_j > ۰ \quad i = ۱, ..., m \end{aligned} \qquad (۶)$$

که قید iام باید با احتمال $۱ - \alpha_i$ برقرار باشد.

برای تبدیل مسئله‌ی تصادفی فوق با مسئله‌ی معادل قطعی حالت زیر را در نظر می‌گیریم (میرحسینی، ۲۰۱۰)[۱۷]. اگر b_iها متغیرهای تصادفی با توزیع نرمال و میانگین $E(b_i)$ و واریانس $\mathrm{var}(b_i)$ باشند:[۶،۲۱-۲۴]

$$\begin{aligned} &P\left\{b_i \ge \sum a_{ij} x_j\right\} \ge \alpha_i \quad i = ۱, ..., m \\ &p\left\{\frac{b_i - E(b_i)}{\sqrt{\mathrm{var}(b_i)}} \ge \frac{\sum a_{ij} x_j - E(b_i)}{\sqrt{\mathrm{var}(b_i)}}\right\} \ge a_i \quad i = ۱, ..., m \end{aligned} \qquad (۷)$$

عبارت فوق وقتی برقرار است که داشته باشیم:

$$\frac{\sum a_{ij} x_j - E(b_i)}{\mathrm{var}(b_i)} \le K\alpha_i \quad i = ۱, ..., m \qquad (۸)$$

بنابراین قید احتمالی فوق معادل قید خطی قطعی زیر است:

$$\sum a_{ij} x_j \le E(b_i) + K\alpha_i \sqrt{\mathrm{var}(b_i)} \quad i = ۱, ..., m \qquad (۹)$$

بنابراین در این حالت، قید احتمالی مسئله را می‌توان به یک قید قطعی تبدیل کرد، که مدل برنامه‌ریزی خطی ۱۰ از آن حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} &\mathrm{Man} \sum_{j=۱}^{n} c_j x_j \\ &S.T. \sum_{j=۱}^{n} a_{ij} x_j \le E(b_i) + k\alpha_i \sqrt{\mathrm{var} b_i} \quad i = ۱, ..., m \\ &x_j \ge ۰ \quad a_i \in (۰, ۱) \quad i = ۱, ..., m \quad j = ۱, ..., n \end{aligned} \qquad (۱۰)$$

۳.۲. برنامه‌ریزی کسری خطی تصادفی[۱۳] (SLFP)

مدل LFP در صورت احتمالی بودن پارامترها قابل پیاده‌سازی نیست در حالی که در برنامه‌ریزی فشرده‌ی تصادفی[۱۴] (CCP) می‌توان تصادفی بودن پارامترهای سمت راست قیدها را لحاظ کرد. بنابراین ادغام CCP در چارچوب LFP یک روش بالقوه برای ارتقای LFP است. این امر به مدل برنامه‌ریزی کسری خطی تصادفی (SLFP) منجر می‌شود.

$$\begin{aligned} &\mathrm{Max}\, f(x) \frac{Cx + \alpha}{Dx + \beta} \\ &p_r\left[A_i(t)x \le b_i(t)\right] \ge ۱ - p_{i, i=۱,۲,...,m} \\ &x \ge ۰ \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

در اینجا x بردار تصمیم‌گیری و ستونی $n \times ۱$، C و D بردارهای سطری $۱ \times n$، β و α ثابت‌های عددی، A_i، بردار ضرایب در محدودیت i و $p_i = [۰, ۱]$ و یک سطح قابل‌اطمینان خاص برای محدودیت تصادفی i است. بنابراین مدل جامع SLFP می‌تواند علاوه بر نسبیت دو هدف، عدم قطعیت‌هایی را که به‌صورت توزیع احتمالات شرح داده شده‌اند، در مدل‌سازی لحاظ کند.

۳. مطالعه‌ی موردی

۱.۳. مروری بر شهر مورد مطالعه

شهر یزد شامل سه منطقه‌ی مسکونی است که در آن زباله‌های تولید شده توسط شهروندان برای فرآوری یا دفع (شکل ۱) به دو تأسیسات حمل می‌شود: ۱. تأسیسات مربوط به دفن، ۲. تأسیسات مربوط به بازیافت. مسئولان شهری به‌منظور عملکرد بهتر تأسیسات بازیافت، تفکیک زباله را به دو صورت تفکیک در مبدأ و تفکیک در مقصد انجام می‌دهند. بدین‌صورت که تفکیک در مبدأ مستقیم به تأسیسات بازیافت و تفکیک در مقصد از محل دفن به تأسیسات بازیافت فرستاده می‌شود. همچنین برمبنای تحقیقات انجام‌شده تقریباً ۱۰٪ از کل ضایعات ورودی به تأسیسات بازیافت، به‌عنوان پسماند به محل دفن فرستاده می‌شود.

داده‌های لازم برای مدل پیشنهادی تحقیق از شهرداری یزد در سال ۱۳۹۲ جمع‌آوری شد و براساس نرخ تورم برای سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲ پیش‌بینی شد. این داده‌ها برای سه دوره ۱۳۹۲، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲ در جدول ۱ آمده است. متغیرهای داده شده در جدول ۱ چنین تشریح می‌شود: TR_{ijk}: هزینه‌ی حمل از منطقه‌ی j به تأسیسات i (۱. دفن و ۲. بازیافت) در دوره‌ی زمانی k $(k = 1, 2, 3)$؛ OP_{1k}: هزینه‌ی عملیاتی دفن؛ OP_{2k}: هزینه‌ی عملیاتی بازیافت در تفکیک در مبدأ؛ OP^*_{2k}: هزینه‌ی عملیاتی تفکیک در مقصد؛ RF: میزان جریان پسماند از بازیافت به دفن؛ RF^*: میزان جریان پسماند از دفن به بازیافت؛ RTR_k: هزینه‌ی حمل‌ونقل از تأسیسات بازیافت به محل دفن در دوره k؛ RTR^*_k: هزینه‌ی حمل‌ونقل از تأسیسات دفن به محل بازیافت در دوره k؛ RE_k: درآمد بازیافت در دوره k.

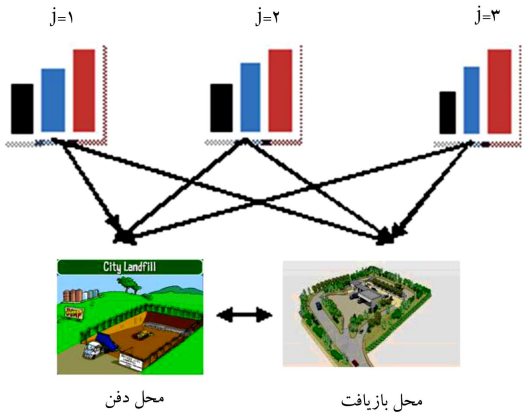
علاوه بر متغیرهای فوق لازم است تا ظرفیت بازیافت، ظرفیت دفن و میزان تولید ضایعات در هر منطقه و در هر دوره تعیین شود. برای تعیین مقادیر متغیرهای مذکور لازم است با استفاده از داده‌های موجود، مقدار هریک از داده‌ها در سطح احتمال معین تعیین شود؛ بنابراین نیازمند به یک تابع توزیع خواهیم بود. بدین‌منظور ابتدا داده‌های مرتبط با پارامترهای فوق به‌صورت موردی برای ۱۶۵ روز برای دوره ۱۳۹۲ گردآوری شد. سپس با استفاده از روش‌های پیش‌بینی جمعیت، مقادیر این داده‌ها برای دوره‌های ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲ تخمین زده شد. رفتار ریاضی این متغیرها به کمک نرم‌افزار Minitab مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از این بود که کلیه متغیرها دارای توزیع نرمال‌اند. برای نمونه منحنی آزمون توزیع نرمال برخی از متغیرها در نمودار ۱ آورده شده است. با توجه به مقدار P-Value بزرگ‌تر از ۵۰٪ نتیجه می‌شود که داده‌ها از توزیع نرمال برخوردارند. سپس با استفاده از میانگین و انحراف معیار داده‌ها و با استفاده از توزیع نرمال، مقادیر هر یک از متغیرها در سطوح احتمال مختلف، تعیین شد. این مقادیر به شرح جدول ۱ است.

۲.۳. مدل SLFP جهت مدیریت زباله‌های جامد شهر یزد

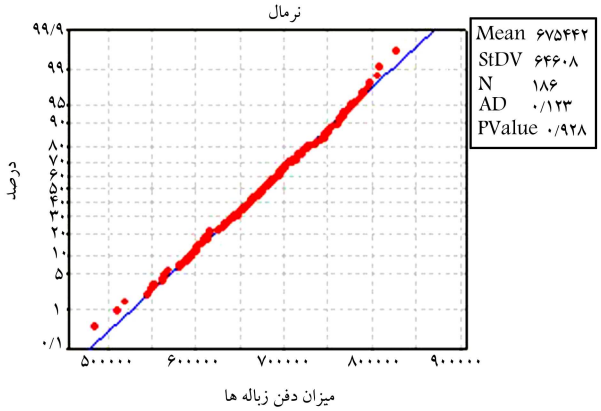
برای تخصیص مقادیر ضایعات ارسالی در پژوهش حاضر از مدل برنامه‌ریزی خطی کسری ژئو و هانگ (۲۰۱۱)[۱۵] که آن را توسعه خواهیم داد، استفاده می‌شود.

۱.۲.۳. تابع هدف مدل

در این مدل که تابع هدف کسری دارد و صورت کسر معرف میزان ضایعات تبدیل شده و مخرج کسر هزینه‌های سیستم است، متغیرها و پارامترهای مدل عبارت‌اند از: L_k: طول دوره k (روز)؛ P_{cl}: احتمال تخطی معادله محدودکننده برای ظرفیت مکان دفن؛ P_{kCF}: احتمال تخطی معادله‌ی محدودکننده برای محدودیت ظرفیت تأسیسات بازیافت؛ $P_{jk,WG}$: احتمال تخطی معادله‌ی محدودکننده برای محدودیت تقاضای مدیریت ضایعات؛ X_{1jk}: میزان ضایعات ارسالی از منطقه‌ی j به محل دفن در دوره k؛ X_{2jk}: میزان ضایعات ارسالی از منطقه‌ی j به محل دفن در دوره k؛ $CL(t)$:ظرفیت مکان دفن؛ CF: محدودیت ظرفیت تأسیسات بازیافت؛ WG: محدودیت تقاضای مدیریت ضایعات.



شکل ۱. سیستم مورد مطالعه.



نمودار ۱. توزیع نرمال میزان کل دفن زباله‌های سال ۱۳۹۲.

$$\text{Max } f = \frac{\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k . x_{2jk}(1-RF)}{\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k . x_{1jk}(TR_{1jk}+OP_{1k})+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k . x_{2jk}\left[(TR_{2jk}+OP_{2k})+RF(RTR_k+OP_{1k})-RE_k\right]} \quad (12)$$

جدول ۱. متغیرهای تحقیق در سه دوره زمانی ۱۳۹۲، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲.

متغیرها	۱۳۹۲	متغیرها	۱۳۹۴	متغیرها	۱۴۰۲
TR۱۱۱	۲۴۵	TR۱۱۲	۷۱۴٫۳۹۵۲	TR۱۱۳	۲۱۲۶٫۹۶۶
TR۱۲۱	۲۳۰	TR۱۲۲	۶۷۰٫۶۵۶۷	TR۱۲۳	۱۹۹۶٫۷۴۳
TR۱۳۱	۲۱۰	TR۱۳۲	۶۱۲٫۳۳۸۷	TR۱۳۳	۱۸۲۳٫۱۱۳
TR۲۱۱	۱۲۰	TR۲۱۲	۳۴۹٫۹۰۷۸	TR۲۱۳	۱۰۴۱٫۷۷۹
TR۲۲۱	۱۲۵	TR۲۲۲	۳۶۴٫۴۸۷۳	TR۲۲۳	۱۰۸۵٫۱۸۷
TR۲۳۱	۱۳۰	TR۲۳۲	۳۷۹٫۰۶۶۸	TR۲۳۳	۱۱۲۸٫۵۹۴
OP۱۱	۵۵	OP۱۲	۱۶۰٫۳۷۴۴	OP۱۳	۴۷۷٫۴۸۲۱
OP۲۱	۲۶۰۰	OP۲۲	۷۵۸۱٫۳۳۷	OP۲۳	۲۲۵۷۱٫۸۸
OP*۲۱	۶۳۶	OP*۲۲	۱۸۵۴٫۵۱۲	OP*۲۳	۵۵۲۱٫۴۲۹
RF	۰٫۱	RF	۰٫۱	RF	۰٫۱
RF*	۰٫۰۱۵	RF*	۰٫۰۱۵	RF*	۰٫۰۱۵
RTR۱	۱۰۰	RTR۲	۲۹۱٫۵۸۹۹	RTR۳	۸۶۸٫۱۴۹۳
RTR*۱	۱۰۰	RTR*۲	۲۹۱٫۵۸۹۹	RTR*۳	۸۶۸٫۱۴۹۳
RE۱	۳۰۰۰	RE۲	۸۷۴۷٫۶۹۶	RE۳	۲۶۰۴۴٫۴۸

۲.۲.۳. محدودیت‌های مدل

۱. محدودیت ظرفیت مکان دفن (CL) در دوره t عبارت است از:

$$\Pr\left[\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k\left(x_{۱jk}+RF.x_{۲jk}\right)\le CL_{(t)}\right]\ge ۱-P_{cl} \quad (۱۳)$$

۲. محدودیت ظرفیت تأسیسات بازیافت (CF) در دوره t مطابق فرمول ۱۴ در نظرگرفته شده است:

$$\Pr\left[\sum_{j=۱}^{۳} x_{۲jk}\le CF_{(t)}\right]\ge ۱-P_{kCF} \qquad K=۱,۲,۳ \quad (۱۴)$$

۳. محدودیت تقاضای مدیریت ضایعات (WG) در منطقه‌ی j در دوره k چنین است:

$$\Pr\left[\sum_{i=۱}^{۲} x_{ijk}\ge WG_{jk}(t)\right]\ge ۱-P_{jk,WG} \quad j=۱,۲,۳ \quad k=۱,۲,۳ \quad (۱۵)$$

با حل مدل برنامه‌ریزی کسری فوق، میزان ضایعات ارسالی از منطقه‌ی j در دوره k به تاسیسات i مشخص می‌شود. برای حل مدل فوق می‌توان از تبدیل چارلز و کوپر استفاده کرد؛ در این تحقیق نیز از این تبدیل استفاده خواهد شد. در مدل ژئو و هانگ (۲۰۱۱)[۱۵] میزان جریان زباله از محل دفن به محل بازیافت در نظرگرفته نشده است. در این تحقیق بر آنیم این موضوع را نیز لحاظ کنیم. به این دلیل متغیرهای $RTR_k^*-RF^*-OP_{۲k}^*$ در بخش قبل معرفی و تعریف شدند.

با در نظرگرفتن متغیرهای زیر و اضافه کردن آنها به مدل ژئو و هانگ، مدل برنامه‌ریزی خطی کسری تحقیق عبارت خواهد بود از:

$$\Pr\left[\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k\left(x_{۱jk}\left(۱-RF^*\right)+RF.x_{۲jk}\right)\le CL_{(t)}\right] \ge ۱-P_{cl} \quad (۱۷)$$

$$\Pr\left[\sum_{j=۱}^{۳}\left(x_{۲jk}+RF^*.x_{۱jk}\right)\le CF_{(t)}\right]\ge ۱-P_{kCF}\ k=۱,۲,۳ \quad (۱۸)$$

$$\Pr\left[\sum_{i=۱}^{۲} x_{ijk}\ge WG_{jk}(t)\right]\ge ۱-P_{jk,WG} \quad j=۱,۲,۳ \quad k=۱,۲,۳ \quad x_{ijk}\ge ۰ \quad i=۱,۲ \quad j=۱,۲,۳ \quad k=۱,۲,۳ \quad (۱۹)$$

برای حل مدل فوق مخرج تابع هدف را برابر $\frac{۱}{T}$ قرار می‌دهیم. بنابراین:

$$\text{Max } f=\frac{\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k.x_{۲jk}(۱-RF)+\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k.RF^*.x_{۱jk}}{\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k.x_{۱jk}\left[\left(TR_{۱jk}+OP_{۱k}\right)+RF^*\left(RTR_k^*+OP_{۲k}^*+OP_{۲k}\right)-RE_k\right]+\sum_{j=۱}^{۳}\sum_{k=۱}^{۳} L_k.x_{۲jk}\left[\left(TR_{۲jk}+OP_{۲k}+OP_{۲k}^*\right)+RF\left(RTR_k+OP_{۱k}\right)-RE_k\right]} \quad (۱۶)$$

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.x_{1jk}\left[\left(TR_{1jk}+OP_{1k}\right)+RF^{*}\left(RTR_k^{*}+OP_{22}^{*}+OP_{2k}-RE_k\right)\right]+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.x_{2jk}\left[\left(TR_{2jk}+OP_{2k}+OP_{2k}^{*}\right)+RF\left(TRR_k+OP_{1k}\right)-RE_k\right]=\frac{1}{T} \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.T.x_{1jk}\left[\left(TR_{1jk}+OP_{1k}\right)+RF^{*}\left(RTR_k^{*}+OP_{22}^{*}+OP_{2k}-RE_k\right)\right]+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.T.x_{2jk}\left[\left(TR_{2jk}+OP_{2k}+OP_{2k}^{*}\right)+RF\left(TRR_k+OP_{1k}\right)-RE_k\right]=1 \quad (21)$$

در نتیجه شکل تابع هدف عبارت خواهد بود از:

$$\text{Max } f=\frac{\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.x_{2jk}\left(1-RF\right)+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.RF^{*}.x_{1jk}}{\frac{1}{T}}=\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.T..x_{2jk}\left(1-RF\right)+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.RF^{*}.T.x_{1jk} \quad (22)$$

حال از تغییر متغیر استفاده می‌کنیم، به‌طوری که:

$$y_{ijk}=T.x_{ijk}\Rightarrow\ x_{ijk}=\frac{y_{ijk}}{T} \quad (23)$$

با اعمال تغییر متغیر فوق، مدل برنامه‌ریزی خطی کسری تحقیق به مدل برنامه‌ریزی خطی زیر تبدیل خواهد شد.

$$\text{Max } f:\ \sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.Y_{2jk}\left(1-RF\right)+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.Y_{1jk}.RF^{*} \quad (24)$$

$$s.t:$$

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.Y_{1jk}\left[\left(TR_{1jk}+OP_{1k}\right)+RF^{*}\left(RTR_k^{*}+OP_{22}^{*}+OP_{2k}-RE_k\right)\right]+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_kY_{2jk}\left[\left(TR_{2jk}+OP_{2k}+OP_{2k}^{*}\right)+RF\left(TRR_k+OP_{1k}\right)-RE_k\right]=1 \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.\left[y_{1jk}\left(1-RF^{*}\right)+y_{2jk}.RF\right]\le T.CL_{(t)} \quad (26)$$

$$\sum_{j}\left(y_{2jk}+y_{1jk}.RF^{*}\right)\le T.CF_{(t)}\qquad k=1,2,3 \quad (27)$$

$$\sum_{i} y_{ijk}\ge T.WG_{jk}\ \ j=1,2,3\qquad k=1,2,3 \quad (28)$$

$$y_{ijk}\ge 0\quad i=1,2\ \ j=1,2,3\ \ k=1,2,3 \quad (29)$$

پس از حل مدل فوق در سطوح احتمال مختلف، مقادیر متغیر تصمیم را با استفاده از فرمول $x_{ijk}=\frac{y_{ijk}}{T}$ تعیین خواهیم کرد.

۳.۳. مدل CCP با هدف کمینه‌سازی هزینه

زمانی که مدیران ضایعات تأکید و دغدغه‌ی بیشتری بر مسائل اقتصادی دارند و هدف آن‌ها کمینه کردن هزینه‌ی سیستم است، مسئله‌ی نسبت بهینه که در مدل ۴.۲ ارائه شده را می‌توان به یک مسئله با کم‌ترین هزینه تبدیل کرد. این کار با جایگزینی تابع هدف مدل فوق با تابع هدف کمینه کردن هزینه صورت می‌گیرد. با همین مجموعه پارامترهای تصادفی می‌توان نتایجی تحت سطوح مختلف P_i به‌وسیله‌ی روش CCP از مدل LP ارائه شده در ادامه به دست آورد.

$$\text{Min}=\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.x_{1jk}\left[\left(TR_{1jk}+OP_{1k}\right)+RF^{*}\left(RTR_k^{*}+OP_{2k}^{*}+OP_{2k}\right)-RE_k\right]+\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k.x_{2jk}\left[\left(TR_{2jk}+Op_{2k}+OP_{2k}^{*}\right)+RF\left(RTR_k+OP_{1k}\right)-RE_k\right] \quad (30)$$

$$\Pr\left[\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} L_k\left(x_{1jk}\left(1-RF^{*}\right)+RF.x_{2jk}\right)\le CL_{(t)}\right]\ge 1-P_{cl} \quad (31)$$

$$\Pr\left[\sum_{j=1}^{3}\left(x_{2jk}+RF^{*}.x_{1jk}\right)\le CF_{(t)}\right]\ge 1-P_{kCF}\quad k=1,2,3 \quad (32)$$

$$\Pr\left[\sum_{i=1}^{2} x_{ijk}\ge WG_{jk}(t)\right]\ge 1-P_{jk,WG}\quad j=1,2,3$$
$$k=1,2,3\ \ x_{ijk}\ge 0\qquad i=1,2\ \ j=1,2,3\ \ k=1,2,3 \quad (33)$$

هدف تحقیق حاضر تعیین میزان ضایعات ارسالی از منطقه‌ی i به تأسیسات j در دوره زمانی k است. این تخصیص باید به گونه‌یی صورت گیرد که نسبت میزان خالص ضایعات تبدیل شده به هزینه‌های سیستم در طول ۳ دوره مورد مطالعه بیشینه شود. با توجه به برخی از متغیرهای تحقیق، برای هر سطح احتمال مدل جداگانه‌یی حل شد که نتایج آن در جدول ۲ آمده است.

۴. جمع‌بندی

در این پژوهش، هدف تعیین میزان ضایعات ارسالی از ۳ منطقه‌ی شهر یزد به دو محل دفن یا بازیافت طی سه دوره ۱۳۹۲، ۱۳۹۷ و ۱۴۰۲ است به‌طوری که نسبت میزان خالص ضایعات تبدیل شده به هزینه‌های سیستم بیشینه شود. با تکیه بر مرور ادبیات مدیریت ضایعات جامد شهری و مطالعه میدانی در شهر یزد، مدل ریاضی تعیین میزان ضایعات ارسالی به دو محل دفن یا بازیافت با هدف بیشینه کردن کارایی سیستم در افق زمانی محدود برنامه‌ریزی توسعه یافت. هدف اصلی مطالعه، گسترش مدل پیشنهادی و به‌کارگیری آن در شهر یزد با توجه به محدودیت‌ها و سیستم

جدول ۲. مقدار ضایعات ارسالی از منطقه‌ی i به تأسیسات j در دوره زمانی k.

p	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۱	۰٫۲۵	۰٫۵	۰٫۷۵	۰٫۹	۰٫۹۵
X۲۱۱	۴۱۲۷٫۷۸۶	۴۸۰۱٫۷۵۲	۵۵۴۲٫۰۱۱	۶۲۸۲٫۲۶۸	۱۳۷٫۷۹۸۲	۷۳۵۳٫۹۸۷	۶۲۸۲٫۲۶۸	۱۳۷٫۷۹۸۲	۷۳۵۳٫۹۸۷
X۲۱۲	۹۳۵۶٫۶۳۸	۱۰۶۷۲٫۱۷	۱۲۱۱۷٫۰۹	۱۳۵۶۲٫۰۲	۱۴۸۷۷٫۵۵	۱۵۶۵۳٫۹۲	۱۳۵۶۲٫۰۲	۱۴۸۷۷٫۵۵	۱۵۶۵۳٫۹۲
X۲۱۳	۱۰۸۸۰٫۵۳	۱۲۴۱۰٫۲۴	۱۴۰۹۰٫۴۲	۱۵۷۷۰٫۶	۱۷۳۰۰٫۳۱	۱۸۲۰۳٫۰۹	۱۵۷۷۰٫۶	۱۷۳۰۰٫۳۱	۱۸۲۰۳٫۰۹
X۲۲۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۲۲۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۲۲۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۲۳۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۲۳۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۲۳۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
X۱۱۱	۶۸۴۲۷٫۸۲	۷۲۳۶۲٫۴	۷۶۶۸۳٫۹۹	۸۱۰۰۵٫۵۷	۹۱۷۵۸٫۵۸	۸۷۲۶۲٫۲۲	۸۱۰۰۵٫۵۷	۹۱۷۵۸٫۵۸	۸۷۲۶۲٫۲۲
X۱۱۲	۶۸۸۸۵٫۴۸	۷۲۵۳۹٫۰۲	۷۶۵۵۱٫۹۲	۸۰۵۶۴٫۸۳	۸۴۲۱۸٫۳۴	۸۶۳۷۴٫۵۲	۸۰۵۶۴٫۸۳	۸۴۲۱۸٫۳۴	۸۶۳۷۴٫۵۲
X۱۱۳	۸۰۱۰۱٫۰۴	۸۴۳۴۹٫۸۵	۸۹۰۱۶٫۵۸	۹۳۶۸۳٫۳۴	۹۷۹۳۲٫۱۴	۱۰۰۴۳۹٫۶	۹۳۶۸۳٫۳۴	۹۷۹۳۲٫۱۴	۱۰۰۴۳۹٫۶
X۱۲۱	۷۲۸۳۴٫۹۶	۷۷۴۶۶٫۶۹	۸۲۵۵۴٫۰۱	۸۷۶۴۱٫۳۱	۹۲۲۷۳٫۰۷	۹۵۰۰۶٫۵۳	۸۷۶۴۱٫۳۱	۹۲۲۷۳٫۰۷	۹۵۰۰۶٫۵۳
X۱۲۲	۷۸۵۴۱٫۳۷	۸۳۵۳۶٫۰۴	۸۹۰۲۲	۹۴۵۰۷٫۹۴	۹۹۵۰۲٫۶۴	۱۰۲۴۵۰٫۳	۱۰۲۴۵۰٫۳	۹۹۵۰۲٫۶۴	۱۰۲۴۵۰٫۳
X۱۲۳	۹۱۳۳۰٫۱۲	۹۷۱۳۷٫۹۳	۱۰۳۵۱۷	۱۰۹۸۹۶٫۱	۱۱۵۷۰۳٫۹	۱۱۹۱۳۱٫۴	۱۰۹۸۹۶٫۱	۱۱۵۷۰۳٫۹	۱۱۹۱۳۱٫۴
X۱۳۱	۶۰۹۳۵٫۵۲	۶۴۶۹۶٫۷۹	۶۸۸۲۸٫۰۱	۷۲۹۵۹ ٫۲۲	۷۶۷۲۰٫۴۷	۷۸۹۴۰٫۲۴	۷۲۹۵۹٫۲۲	۷۶۷۲۰٫۴۷	۷۸۹۴۰٫۲۴
X۱۳۲	۶۵۷۰۹٫۲۹	۶۹۷۶۵٫۱۷	۷۴۲۲۰٫۰۱	۷۸۶۷۴٫۸۲	۸۲۷۳۰٫۷۳	۸۵۱۲۴٫۳۸	۷۸۶۷۴٫۸۲	۸۲۷۳۰٫۷۳	۸۵۱۲۴٫۳۸
X۱۳۳	۷۶۴۰۸٫۰۵	۸۱۱۲۴٫۵۷	۸۶۳۰۵٫۰۱	۹۱۴۸۵٫۴۵	۹۶۲۰۱٫۹۹	۹۸۹۸۵٫۴۹	۹۱۴۸۵٫۴۵	۹۶۲۰۱٫۹۹	۹۸۹۸۵٫۴۹
هزینه	۱٫۷۳E+۰۸	۱٫۴۳E + ۰۸	۱٫۰۹E+۰۸	۷٫۶۲E+۰۷	۷٫۴۵E+۰۷	۲٫۸۲E+۰۷	۷٫۶۲E+۰۷	۷٫۴۵E+۰۷	۲٫۸۲E+۰۷
کارایی	۱٫۸۵E-۰۴	۲٫۵۰E − ۰۴	۳٫۶۴E-۰۴	۵٫۷۶E-۰۴	۵٫۵۹E-۰۴	۱٫۷۷E-۰۳	۵٫۷۶E-۰۴	۵٫۵۹E-۰۴	۱٫۷۷E-۰۳

دفع زباله‌های جامد شهری آن است تا به‌عنوان راهنمایی برای تصمیم‌گیرندگان در توسعه سیاست‌هایشان برای نحوه‌ی دفع زباله‌های هر منطقه‌ی شهری به کار رود. تفاوت این پژوهش با بیشتر مطالعات پیشین، لحاظ کردن کارایی سیستم با توجه به محدودیت‌های احتمالی در یک مدل است.

برای تخصیص مقادیر ضایعات ارسالی در پژوهش حاضر از توسعه مدل برنامه‌ریزی خطی کسری ژئو و هانگ (۲۰۱۱)[۱۵] استفاده شد. این مدل برنامه‌ریزی خطی کسری برای تعیین میزان ضایعات ارسالی از مناطق شهری به محل دفن و بازیافت طی k دوره است ولی در آن میزان جریان زباله از محل دفن به محل بازیافت در نظر گرفته نشده بود.

پس از گسترش مدل و حل آن در نرم‌افزار لینگو، نتایج حاکی از این بود که از مناطق ۲ و ۳، ضایعاتی مستقیماً برای بازیافت ارسال که این جواب می‌تواند ناشی از هزینه‌ی کم‌تر حمل از منطقه‌ی ۱ به محل بازیافت باشد. واضح است که هزینه‌های حمل‌ونقل به شدت بر نتایج تخصیص ضایعات تأثیر خواهند گذاشت. در مقایسه، هزینه‌های عملیاتی تأسیسات در این مسئله از حساسیت کم‌تری برخوردار است.

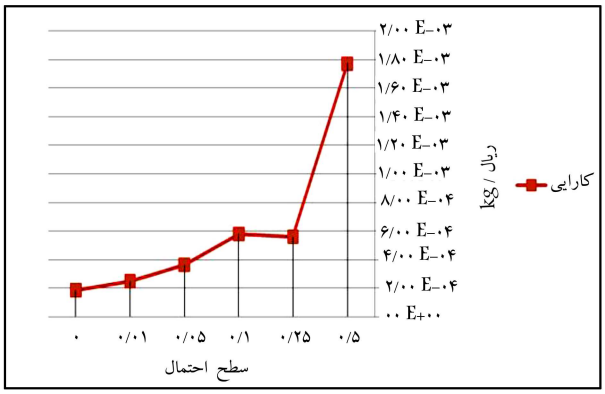
نتیجه محاسبات نشان می‌دهد که سطح P_i بالاتر (در تابع شانس زیر) با سطح بالاتر «نسبت تابع هدف» تطبیق پیدا می‌کند. P_i معرف احتمالی است که در آن سطح معادله‌ی محدود کننده مربوطه می‌تواند تخطی شود. به عبارت دیگر P_i ریسک برقرار نبودن معادله‌ی محدود کننده شانس را نشان می‌دهد. مقدار «نسبت تابع هدف» یعنی {ضایعات تبدیل شده/هزینه} $= f$ کارایی سیستم به حساب می‌آید. بنابراین، می‌توان گفت که رابطه‌ی بین (نسبت تابع هدف) و مقدار P_i یک نوع سازش بین کارایی سیستم و ریسک تخطی معادله‌ی محدودکننده را نشان می‌دهد. افزایش در سطح P_i معادل با افزایش در سطح ریسک تخطی معادلات محدودکننده‌ی مسئله است. این بدان معناست که هرچه سطح P_i بیشتر باشد، احتمال برقراری نامعادله کوچک‌تر می‌شود و این یعنی x_{ij}ها مقادیری را به خود می‌گیرند که حاصل $\sum\sum aij\ xij$ از مقدار B بیشتر می‌شود.

$$p(\sum\sum aij\ xij \le B) \ge ۱ - P_i$$

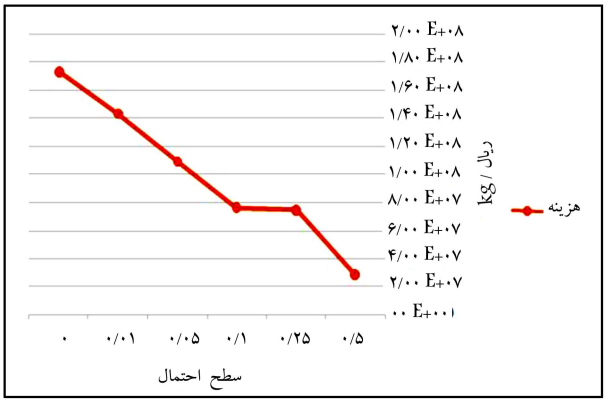
هرچه مقدار P_i افزایش می‌یابد سطح کارایی (یعنی هزینه‌ی کم‌تر و مقدار تغییر در ضایعات بیشتری) حاصل می‌شود ولی قابلیت اطمینان در حفظ معادلات محدودکننده‌ی شانس منظور شده در مدل مسئله، همزمان با آن کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان گفت تصمیم‌هایی که با سطح پایین P_i اخذ می‌شود منجر به سطح قابلیت اطمینان بالاتر و سطح کارایی پایین‌تر سیستم می‌شود. برنامه‌ریزی‌هایی که با توجه به سطح بالای P_i انجام می‌شود منجر به سطح کارایی بالای سیستم و ریسک تخطی معادلات محدودکننده بالاتر می‌شود. به عکس، برنامه‌ریزی‌هایی که با توجه به سطح پایین P_i انجام می‌شود منجر به سطح کارآیی پایین سیستم و ریسک تخطی معادلات محدود کننده پایین‌تر است.

برای مثال زمانی که P_i از ۰٫۰۱ به ۰٫۰۵ افزایش می‌یابد، تابع هدف از $۳٫۶۴ \times ۱۰^{-۴}$ به $۵٫۷۶ \times ۱۰^{-۴}$ کیلوگرم بر ریال افزایش خواهد یافت. در نمودار ۳ نشان داده شده است که یک سطح بیشتر P_i به هزینه‌ی پایین‌تر منجر می‌شود.

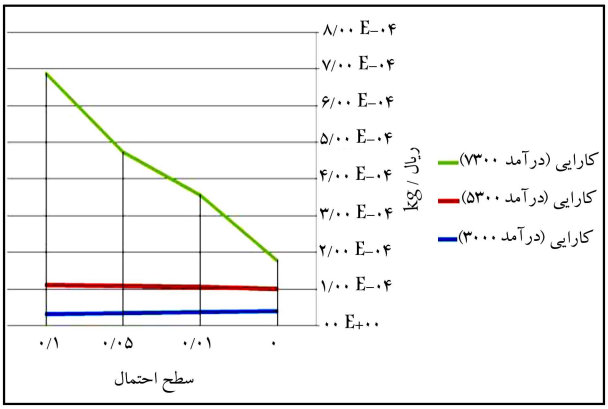
در ادامه مدل ارائه‌شده با مدل CCP باهدف کمینه کردن هزینه به شرح ذیل مقایسه شد. چنان که در نمودارهای ۴ و ۵ نشان داده شده، مدل برنامه‌ریزی کسری به جوابی با کارایی بالاتر و هزینه‌ی بالاتر نسبت به مدل CCP با هدف کمینه‌کردن



نمودار ۲. رابطه بین احتمال و کارایی سیستم.

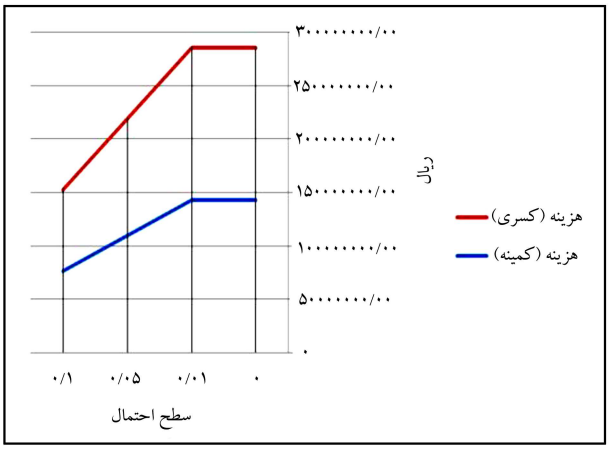


نمودار ۳. رابطه بین احتمال و هزینه‌ی سیستم.

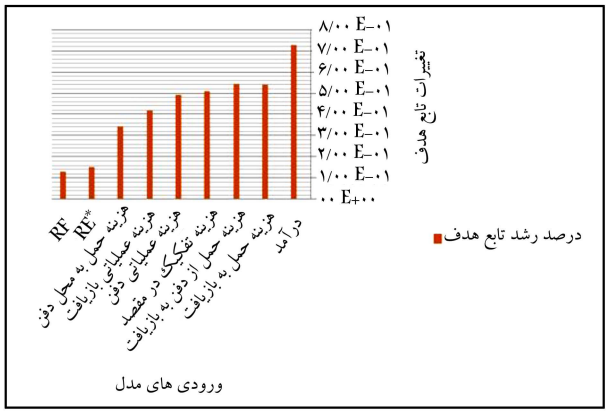


نمودار ۴. مقایسه‌ی کارایی مدل برنامه‌ریزی کسری با مدل CCP کم‌ترین هزینه.

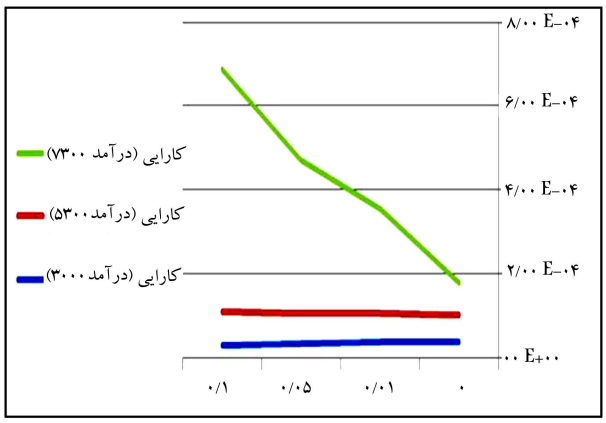
هزینه منجر می‌شود. بنابراین چنانچه هدف از پیاده کردن مدل رسیدن به کارایی بالاتر باشد، بهترین انتخاب، برنامه‌ریزی کسری تصادفی است. اگر هم کمینه کردن هزینه در اولویت اهداف یک سیستم باشد، برنامه‌ریزی CCP با هدف کمینه کردن هزینه انتخاب مناسب‌تری است. برای پیاده کردن سناریوهای مختلف، تحلیل حساسیت مدل ضرورت می‌یابد، بدین‌صورت که نتایج مدل در سطح احتمال (۰,۰) با توجه به افزایش ۲۰ درصدی متغیرهای ورودی به‌صورت جداگانه بررسی شد که نتایج آن مطابق نمودار ۶، حاکی از حساسیت مدل به ترتیب نسبت به درآمد، هزینه‌ی حمل به بازیافت و ... است.



نمودار ۵. مقایسه‌ی هزینه‌ی مدل برنامه‌ریزی کسری با مدل CCP کم‌ترین هزینه.

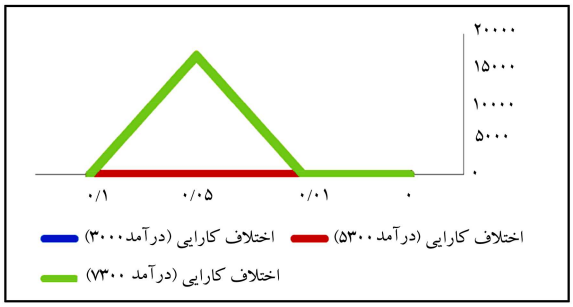


نمودار ۶. تحلیل حساسیت مدل.

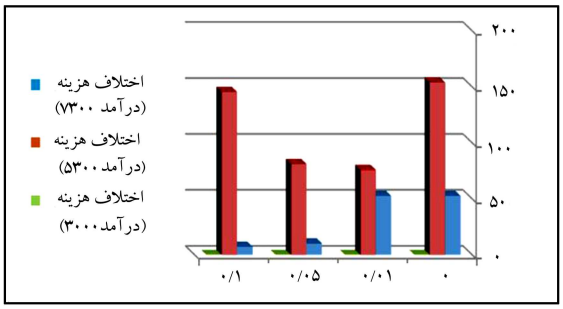


نمودار ۷. مقایسه‌ی کارایی مدل برنامه‌ریزی کسری با تغییر درآمد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحلیل حساسیت بر آن شدیم تا میزان درآمد حاصل از بازیافت را از ۷۳۰۰ ریال به ۵۳۰۰ ریال و ۳۰۰۰ ریال تغییر داده و نتایج آن را برای مدل برنامه‌ریزی کسری تصادفی و مدل CCP با هدف کمینه کردن هزینه به‌دست آورده و مقایسه کنیم. نتایج مدل برنامه‌ریزی کسری در اثر تغییر در آمد در نمودار ۷ ارائه شده است. این نتایج حاکی از آن است که با افزایش درآمد کارایی به سطح بالاتری منتقل می‌شود. از مقایسه‌ی برنامه‌ریزی



نمودار ۸. مقایسه‌ی اختلاف کارایی مدل برنامه‌ریزی کسری با مدل CCP کم‌ترین هزینه در درآمدهای مختلف.



نمودار ۹. مقایسه‌ی اختلاف هزینه مدل برنامه‌ریزی کسری با مدل CCP کم‌ترین هزینه در درآمدهای مختلف.

کسری با درآمدهای ۷۳۰۰، ۵۳۰۰ و ۳۰۰۰ ریال در سطوح مختلف با برنامه‌ریزی CCP با هدف کمینه کردن هزینه، مطابق نمودارهای ۸ و ۹ چنین نتیجه گرفته می‌شود که هرقدر درآمد بالاتر باشد اختلاف کارایی و اختلاف درآمد مدل SLFP با CCP بیشتر می‌شود تا جایی که در درآمد ۳۰۰۰ ریال هر دو مدل بر هم منطبق می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق سعی بر آن است تا کارایی سیستم مدیریت ضایعات بیشینه شود. براساس ادبیات تحقیق برای شهر یزد با دارا بودن سه منطقه‌ی مسکونی و دو روش تفکیک زباله‌های بازیافتی در مبدأ و تفکیک زباله‌های بازیافتی در مقصد، استفاده از برنامه‌ریزی خطی کسری تصادفی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به داده‌های مسئله و نتایج به‌دست آمده از حل مدل برنامه‌ریزی کسری با استفاده از لینگو چنین نتیجه‌گیری می‌شود که مدل برنامه‌ریزی کسری، کارایی و هزینه‌ی بالاتری نسبت به مدل CCP دارد پس اگر هدف اصلی کارایی باشد مدل برنامه‌ریزی کسری و چنانچه کمینه کردن هزینه در اولویت باشد مدل CCP با هدف کمینه کردن هزینه کارایی بیشتری دارد. پیشنهاد می‌شود برای تحقیقات آتی، مدل ارائه شده در حوزه‌های مدیریتی دیگر مثل مدیریت منابع و مسائل زیست محیط به کار بسته شود. همچنین از رویکردهای برنامه‌ریزی اعداد صحیح، مدل‌سازی خطی کسری و بهینه‌سازی استوار استفاده شود.

پانوشت‌ها

1. solid waste
2. Tanskanen
3. Macdonald
4. Englehardt
5. Chang and Wie
6. Petts
7. Shekdar & et.al
8. Solano
9. Costi & et.al
10. Hung & et.al
11. Zhu & et.al
12. Linear fractional programming
13. stochastic linear fractional programming
14. chance-constrained programming

منابع (References)

1. Omranei, Gh., and Nakhjavanei,A., *Solid Waste (recycling)*, Volume III, Publishing Rafi thoughts. Tehran (2009).
2. Rafiei, R., Salman Mahinei, A. and khorasanei, N. "Life cycle environmental assessment of municipal waste management systems", *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, **16**, pp.1-10 (2009)
3. Morrissy, A.J. and Brown, J. "Waste management models and their application to sustainable waste management", *Waste Management*, **24** , pp. 297-308 (2003).
4. Klundert, A. and Anschutz, J. "Integrated sustainable waste management - the concept tools for decision - makers experiences from the urban waste expertise programme" Netkerlands (1995-2001).
5. Englehardt, J.D. and Lund, J.R. "Economic analysis of recycling for small municipal waste collectors", *Journal of Resource Management and Technology*, **18**(2), pp. 84-96 (1990).
6. Birge, J.R. "Solution methods for stochastic dynamic linear programming", Computers Operations Research (1980).
7. Tanskanen, J.H. "Strategic planning of municipal solid waste management", *Resources, Conservation and Recycling*, **30**, pp. 111-133 (2000).
8. MacDonald, M.L. "A Multi-attribute spatial decision support system for solid waste planning", *Comput. Environ. and Urban. Systems*, **20**(1), pp. 1-17 (1996b).
9. Chang, N.B. and Wei, Y.L. "Strategic planning of recycling drop- off? stations and collection network by multiobjective programming", *Environmental Management*, **24**(2), pp. 247-263 (1999).
10. Petts, J. "Municipal waste management: inequities and the role of deliberation", *Risk Analysis*, **20**(6), pp. 821-832 (2000).

11. Shekdar, A.V. and Mistry, P.B. "Evaluation of multifarious solid waste management systems-A goal programming approach", *Waste Management and Research*, **19**, pp. 391-402 (2001).

12. Solano, E. Ranji Ranjithan, S. and Barlaz, Morton A. and Downey Brill, E. "Life- cycle-based solid waste management. I: Model development", *Journal of Environmental Engineering*, pp. 981-993 (2002).

13. Costi, P. Minciardi, R. Robba, M. Rovatti, M. and Sacile, R. "An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management", *Waste Management*, **24**, pp. 277-295 (2004).

14. Hung, M.L. Ma, H.W. and Yang, W.F. "A novel sustainable decision making model for municipal solid waste management", *Waste Man agement*, **27**, pp. 209-219 (2007).

15. Zhu, H. and Hung, G.H. "SLFP: A stochastic linear fractional programming approach for sustainable waste management", *Waste Management*, **31**, pp.2612-2619 (2011).

16. Charles, V, and Dutta, D. "Extremization of multiobjective stochastic fractional programming problem", *Annals of Operations Research*, **143**, pp. 297-304 (2006a).

17. Zare Mehrjerdi, Y. and Daneshmand, A. "A linear approximation method for solving a special class of the chance constrained programming problem", *European Journal of Operational Research*, **80**(1), pp. (1995).

18. Zare Mehrjerdi, T. "Solving fractional programming problem through fuzzy goal setting and approximation", *Applied Soft Computing*, **11**(2), pp. (2011).

19. Zare Mehrjerdi, Y. "Fractional chance constrained programming: A fuzzy goal programming approach", *International Journal of Industrial Engineering and Production Research*, **25**(3), pp. (2013).

20. Zare Mehrjerdi, Y. "A chance constrained goal programming model of stochastic vehicle routing problem", Phd Dissertation, Oklahoma State University, Oklahoma,U.S.A (1986).

21. Zare Mehrjerdi, Y. "Chance constrained Programming of manpower grading problem in production area", Master Thesis, St.Marys University. San Antionio Texas, U.S.A (1982).

22. Zare Mehrjerdi, Y., *Stochastic Programming*, Mehrjerd Press, Tehran, Iran (In Persian) (2014).

23. Chadha, S.S. and chadha, V. "linear fractional programming and duality", *Cent.Eur. J.Opar. Res*, **15**, pp. 119-125 (2007).

24. Akhavan Niyakii, S.T., *Probability Theory and Its Applications. Tehran, Sharif University of Technology*, Scientific Publications (2005).

25. Guo, P. Huang, G.H. and Li, Y.P. Interval stochastic quadratic approach programming for municipal solid waste management", *J. Environ. Eng. Sci.*, **7**, pp. 568-579 (2008).

26. Guo, P. Huang, G.H. and He, L. "ISMISIP: An inexact stochastic mixed integer linear semi-infinite programming approach for solid waste management and planning under uncertainty", *Stoch. Environ. Res. Risk. Assess.*, **22**, pp. 759-775 (2008b).

27. Wallace, S.W. and William, T.Z., *Applications of Stochastic Programming*, SIAM (2005).

28. Mirhossaini, A. and Adib, M. "Linear fractional programming duality", Zanjan University, Faculty of Science, Department of Mathematics (2010).