

# ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم

## های فرا ابتکاری

محمدحسین کبگانی، دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

**E-mail: Mh.kabgani@pgu.ac.ir**

حمید شاهبندرزاده، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

ابراهیم حیدری، دانشیار، گروه اقتصاد، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

سید نورالدین امیری، استادیار، گروه معماری و شهرسازی، دانشکده معماری، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۲

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲

## چکیده

این پژوهش صورت جدیدی از مسأله مکان‌یابی، تخصیص، مسیریابی و موجودی را در سیستم مدیریت پسماند شهری با در نظر گرفتن سه مسئله اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ارائه می‌دهد. در بخش اقتصادی انواع هزینه‌های مربوط به جمع‌آوری پسماندهای شهری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به نحوی که همزمان مجموع هزینه‌های سیستم و تعداد ماشین‌های مورد نیاز برای جمع‌آوری پسماند در کل شبکه کمینه شود. همچنین در بخش اجتماعی و زیست محیطی به دنبال ارائه مدلی جهت یافتن کوتاهترین مسیر بین مخزن‌های جمع‌آوری پسماند در سطح شهر تا محل جمع‌آوری و بازیافت نهایی نشان می‌دهد. مسأله پژوهش در قالب یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. همچنین برای کنترل میزان عدم قطعیت برخی از پارامترهای موجود در مدل پژوهش از روش استوار فازی بهره گرفته شده است. از آنجا که مسأله این پژوهش از نوع  $np$ -hard به شمار می‌آید و همچنین تعیین مقدار بهینه متغیرها در این مسائل در تعامل با هم هستند از الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه و الگوریتم ژنتیک چندهدفه جهت حل نهایی استفاده شده است. نتایج حاصل از حل سناریوهای مختلف و همچنین اعتبارسنجی نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی نشان می‌دهد که میانگین خطای حاصل از الگوریتم رقابت استعماری چند هدفه در مقایسه با الگوریتم ژنتیک چندهدفه در حل سناریوهای مختلف کمتر است که نشانگر کارایی بالای الگوریتم برای دسته وسیعی از مسائل با اندازه‌های متفاوت می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مکانیابی، مسیریابی، موجودی، برنامه‌ریزی استوار فازی، الگوریتم فرا ابتکاری

## ۱. مقدمه

در این پژوهش برای حل مسأله مکانیابی، مسیریابی خودروهای جمع‌آوری پسماند، تخصیص امکانات و مدیریت موجودی پسماندهای جمع‌آوری شده، مدلی جدید در چهار مرحله ارائه گردید. در مرحله نخست بعد از خوانی ادبیات نظری پژوهش، تعریف مسأله ارائه می‌شود. در بخش دوم بر اساس مفروضات در نظر گرفته شده، یک مدل ریاضی دو هدفه ارائه گردید. در بخش سوم، به منظور پناسایی پارامترهایی که از عدم قطعیت برخوردار هستند، با بکارگیری روش استوار و همچنین روش وزن‌دهی فازی - شهودی اقدام به مدل‌سازی نهایی گردید. همچنین در بخش چهارم، از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه و الگوریتم ژنتیک دو هدفه برای حل مسأله در ابعاد بزرگ، استفاده گردید. نتایج حل به دست آمده الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای یک ناحیه از سطح شهر بوشهر ارائه شده است.

## ۲. پیشینه پژوهش

امروزه توسعه جوامع انسانی در سراسر جهان موجب استفاده زیاد از دارایی‌ها و منابع را گسترش داده است. علاوه بر این، با افزایش فعالیت‌های صنعتی، مسائل مربوط به میزان دسترسی به منابع کمیاب و همچنین مدیریت پسماند به گونه فراگیری مطرح شده است. اگرچه کشورهای توسعه یافته اقدامات موثری را انجام دادند و گام‌های موثری برای کنترل و مدیریت مسائل مربوط به انواع پسماندها برداشته‌اند، اما تاکنون کشورهای در حال توسعه از نظر مدیریت انواع پسماندها دید کامل و روشنی ندارند. علاوه بر این، جوامع بشری قادر به ایجاد استراتژی‌های مناسب به منظور کاهش و کنترل انواع پسماندها نمی‌باشند. پسماندهای تولیدی دست بشر حاوی مواد خطرناکی هستند که می‌تواند به سلامت انسان و حتی محیط زیست آسیب جدی وارد کند. بنابراین وجود یک سیستم مدیریت پسماند کارا به منظور کاهش اثرگذاری انواع پسماندها بر محیط زیست لازم به نظر می‌رسد [Lu, , Huang, He, & Zeng, 2018]

آرنا و همکاران در تحقیق خود به دنبال برنامه‌ریزی و بهینه‌کردن سیستم مدیریت مواد زائد می‌باشند. نتایج حاصل از برنامه‌ریزی

اجتماعات انسانی از دیرباز پس از استفاده از منابع مختلف طبیعی موجود بر روی کره زمین، قسمت‌های غیرقابل مصرف و زائد آن را دفع می‌کردند. این موضوع مشکل حادی را برای آنها و محیطشان ایجاد نمی‌کرد؛ زیرا تعداد و توزیع انسان‌ها بر روی کره زمین به نسبت مساحت این کره خاکی خیلی کم بود. اما امروزه به دلیل افزایش تعداد و توزیع جمعیت و به دنبال آن تحولات پدید آمده در میزان و کیفیت مواد مصرفی، معضل تولید و دفع مواد زائد به نحو آشکاری گریبان‌گیر حیات جوامع بشری به ویژه شهرها شده است. بطور کلی می‌توان بیان داشت که مهمترین مرحله از مدیریت پسماندها مرحله تولید است؛ زیرا در صورت کاهش تولید پسماند در هزینه‌ها، انرژی، وقت و غیره صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین استفاده نادرست از روش‌های بازیافت و دفع ناکافی و باز پسماندها باعث آلودگی محیط پیرامون از قبیل آب، زمین و هوا می‌گردد و پایداری گونه‌های زنده را به خطر می‌اندازد. این شیوه‌های نادرست مدیریت پسماند سوالات، نگرانی‌ها، خطرات احتمالی و نیازهای مختلف برای چارچوب مدیریت پسماند را باز می‌کند، بنابراین پردازش و مدیریت انواع پسماندها می‌تواند به طور کارآمد و سازگار با محیط زیست انجام شود. اقدامات نظارتی و قانونی یکی از اقدامات موثر و ابزاری مناسب برای پیاده‌سازی سیستم مدیریت موفق انواع پسماندها در هر کشوری می‌باشد.

از اینرو در این پژوهش برای برنامه‌ریزی مناسب و بهینه در حوزه مدیریت پسماند مسأله مکانیابی و پهنه‌بندی سطح شهر، تخصیص ایستگاه‌های و تأسیسات مورد نیاز جهت جمع‌آوری و بازیافت زباله در سطح شهر و مسیریابی خودروهای جمع‌آوری پسماند و همچنین ارائه راه‌کارهایی جهت حداقل کردن هزینه‌های حمل و نقل مورد توجه قرار گرفته است. در مسأله برنامه‌ریزی مدیریت پسماند در سطح شهر شناسایی دقیق و صحیح توزیع پارامترها خیلی مشکل است و اغلب داده‌های مورد نیاز از عدم قطعیت برخوردار هستند.

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

نمودند [Ghiani, Laganà, Manni & Triki, 2012]. این پژوهشگر در مطالعه دیگری به میزان اثربخشی مکان‌یابی مراکز بازیافت پسماند با رویکرد طبقه‌بندی مناطق مختلف شهری پرداخت که در نتیجه این مطالعه سازگاری انواع مختلف سطوح‌های زباله به مراکز تخصیص داده شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بعد از اجرای مدل پیشنهادی می‌توان به میزان ۲۵ درصد از کل مسافت طی شده برای جمع‌آوری انواع پسماند کاهش داد [Ghiani, Manni & Toraldo, 2014].

وانگ و یانگ از یک مدل سلسله مراتبی و تحت شرایط عدم اطمینان برای طراحی شبکه لجستیک معکوس برای جمع‌آوری پسماند شهری استفاده نمودند. بر اساس مدل پیشنهادی آنان می‌توان از دو نوع مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای به حداقل رساندن هزینه مورد انتظار بر اساس معیارهای تصمیم‌گیری استفاده نمود [Wang & Yang, 2014]. اسلت و ماریانوف مدل‌های مختلف مکان‌یابی برای جمع‌آوری پسماند‌های جامد را مورد بررسی قرار دادند. آنها در مطالعه خود انواع مدل‌های تصمیم‌گیری را برای چهار دهه مورد بازنگری قرار دادند [Eiselt & Marianov, 2015]. چاهان و سینگ از روش تصمیم‌گیری چند معیاره فازی برای انتخاب مکان برای دفع پسماند‌های بهداشتی استفاده نمودند. بر اساس این پژوهش پیشنهاد گردید که از رویکردهای مورد مطالعه می‌توان برای طراحی سیستم کنترل آلودگی و بهداشت در مراکز دفع پسماند استفاده نمود [Chauhan, & Singh, 2016].

یاداو و همکاران مدلی ریاضی را برای مکان‌یابی جمع‌آوری پسماند در شرایط عدم اطمینان توسعه دادند. آنها در این پژوهش پارامترهایی مانند میزان تولید پسماند، هزینه عملیاتی امکانات جمع‌آوری پسماند، هزینه حمل و نقل و میزان درآمدها را با استفاده از اعداد فازی مورد بررسی قرار دادند [Yadav, Bhurjee, Karmakar & Dikshit, 2017]. همچنین در مطالعه‌ای دیگر که توسط این پژوهشگران انجام شد، از روش برنامه‌ریزی خطی فازی برای ارزیابی سیستم مدیریت جمع‌آوری

مدیریت مواد زائد جامد شهری بر اساس استفاده گسترده از تجزیه و تحلیل مواد و جریان آنها توصیف شده است و با مقایسه فن-آوری‌های مدیریت مواد زائد، به دنبال کمک به تصمیمات مدیریت پسماند در هر دو سطح استراتژیک و عملیاتی می‌باشد. در نهایت پژوهشگران این تحقیق بدین نتیجه رسیدند که حداکثر سطح جداسازی در مبدأ و جمع‌آوری زباله‌ها باید بر اساس توسعه پایدار تعریف شود [Arena, U., & Di Gregorio, 2014].

مین سیاردی و همکاران در پژوهش خود با عنوان "بهینه‌سازی چندهدفه جریان مواد زائد جامد: استراتژی‌های پایدار زیست محیطی برای شهرداری‌ها" با ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه غیرخطی به منظور تخصیص جریان زباله، چهار هدف هزینه‌های اقتصادی، ضایعات غیر بازیافتی، دفع بهداشتی مرکز دفن و تولید گازهای گلخانه‌ای زباله سوز را در نظر می‌گیرد [Minciardi, Paolucci, Robba & Sacile, 2017]. پژوهشی با عنوان "رویکردی چندهدفه برای مدیریت مواد زائد جامد" از یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه برای در نظر گرفتن مسائل اقتصادی و زیست محیطی در مدیریت مواد زائد جامد استفاده نمودند. مدل پیشنهادی آنها همزمان به دنبال کاهش هزینه‌های سالانه و آلودگی هوای ناشی از فعالیت‌های وسایل نقلیه مرتبط با سیستم مدیریت مواد زائد جامد می‌باشد [Galante, Aiello, Enea, & Panascia, 2017].

لی و هانگ از روش برنامه‌ریزی درجه دوم استوار برای مدیریت پسماند شهری در شرایط عدم اطمینان استفاده نمودند. هدف این پژوهش کمک به تصمیم‌گیری بهینه درباره امکانات جمع‌آوری، یافتن کوتاهترین مسیر برای جمع‌آوری زباله در سطح شهر می‌باشد [Li & Huang, G, 2012]. همچنین یک روش ترکیبی از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و تحلیل پوششی داده‌ها توسط خدیوی و قمی با توجه به جنبه‌های محیط زیستی ارائه گردید [Khadivi & Ghomi, S, 2012].

همچنین غیانی و همکاران از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری زباله در سطح شهر استفاده

پژوهش خود از محدودیت‌های واقعی که اپراتورهای جمع‌آوری زباله با آنها روبرو هستند استفاده کردند. در نهایت آنها مدل پیشنهادی خود را با طراحی سناریوهای مختلف در زمینه تولید زباله مورد آزمایش قرار دادند [Gambella, Maggioni & Vigo, 2019].

جدول ۱. خلاصه پژوهش‌های انجام شده

نویسنده	سال	هدف پژوهش	روش پژوهش
گامبلا، ماگیونی و ویگو	۲۰۱۹	تخصیص جریان پسماندهای شهری	سناریوسازی - برنامه‌ریزی تصادفی
لو و همکاران	۲۰۱۸	برنامه ریزی مدیریت مواد زائد جامد	روش تحلیلی - توصیفی
هی و همکاران	۲۰۱۸	برنامه‌ریزی برای توسعه تأسیسات پردازش مواد زائد جامد	برنامه ریزی ریاضی
مورتاس و همکاران	۲۰۱۷	بهینه سازی سیستم مدیریتی مواد زائد جامد	الگوریتم های بهینه سازی
یاداو و همکاران	۲۰۱۷	مکانیابی تسهیلات جمع آوری در شرایط عدم اطمینان	برنامه‌ریزی فازی
آرنا و همکاران	۲۰۱۴	برنامه ریزی مدیریت پسماند شهری با توجه به جریان تولید مواد زائد	برنامه ریزی ریاضی
مانیب و همکاران	۲۰۱۷	بهینه سازی سیستم جمع آوری پسماند	برنامه-ریزی فازی دوسطحی

### ۳. بیان مسأله و مدل پژوهش

مسأله پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی فازی استوار سبز برای مکانیابی، تخصیص، مسیریابی و موجودی چند دوره‌ای در حوزه مدیریت پسماند شهری می‌باشد. بطور کلی یک شبکه جمع‌آوری مدیریت پسماند شهری دارای محدودیت‌های متفاوتی از قبیل محدودیت ظرفیت و همچنین محدودیت تخصیص امکانات

پسماند در شرایط عدم اطمینان دوره‌ای بهره گرفته شد [Yadav, Karmakar, Dikshit & Bhurjee, 2018].

در پژوهشی دیگر که توسط مانیب و همکاران انجام شد، از مدل برنامه‌ریزی فازی دو سطحی برای سیستم جمع‌آوری پسماند با توجه به هزینه‌های موجود در فرایند جمع‌آوری پسماند در سطح شهر استفاده گردید. تمرکز این پژوهش بر روی برنامه‌ریزی تخصیص و میزان موجودی برای مراکز درمان بود. همچنین در انتهای این پژوهش از روش برنامه ریزی آرمانی برای ارزیابی مدل پیشنهاد شده استفاده شد [Muneeb, Adhami, Jalil & Asim, 2018]. حبیب و همکاران به طراحی سیستم جامع مدیریت پسماند در محیط عدم اطمینان پرداختند. آنها از یک مدل برنامه ریزی چند هدفه فازی برای فرایند زنجیره تأمین پسماند استفاده نمودند. همچنین مدل پیشنهادی آنان با استفاده از داده های واقعی در کراچی پاکستان مورد تأیید قرار گرفت [Habib, Sarkar, Tayyab, Saleem, 2019].

سارما و راثور از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای مسأله مکانیابی ایستگاه‌های انتقال زباله با توجه به نحوه جداسازی انواع زباله از مبدأ استفاده نمودند. آنها توانستند مدل پیشنهادی خود را با استفاده از نرم افزار CPLEX و ARCGIS حل و مورد تأیید قرار دهند. در این پژوهش با استفاده از سناریوهای اقتصادی مکانیابی ایستگاه‌های انتقال زباله با هدف تفکیک زباله از مبدأ انجام گرفت. پژوهش این افراد از دو مولفه اصلی که عبارتند از: ۱- مدلسازی ریاضی بهینه برای انواع هزینه‌های مدیریت پسماند، ۲- استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای فراهم آوردن داده‌های ریاضی برای مدلسازی ریاضی تشکیل شده است. همچنین دو سناریوی مختلف برای جمع‌آوری زباله در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. سناریوی اول: جمع‌آوری زباله از ایستگاه‌ها بدون در نظر گرفتن تفکیک انواع آن، سناریو دوم: جمع‌آوری زباله از ایستگاه و تفکیک انواع زباله در ایستگاه انتقال [Rathore & Sarmah, 2019]. همچنین گامبلا و همکاران از مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تخصیص جریان مواد پسماند در مسأله مدیریت پسماند جامد استفاده نمودند. آنها در

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

- ظرفیت و هزینه هر نوع خودرو مشخص و ثابت است. همچنین تعداد هر نوع خودرو مشخص است.
- مسیرهای مجاز زیرمجموعه‌ای از مسیر شبکه راه‌ها موجود می‌باشد. همچنین فواصل گره‌ها (مخزن‌های جمع‌آوری پسماند) و محل امکانات جمع‌آوری دائم و موقت مشخص است.
- امکانات جمع‌آوری می‌تواند دائمی یا موقتی باشد. امکانات دائمی فقط در یک دوره از افق برنامه‌ریزی در یک گره خاص می‌تواند وجود داشته باشد.
- امکانات پردازش و دفع پسماند دائمی می‌باشند و این توانمندی را دارا هستند که در حومه شبکه شهری تأسیس شوند. استفاده از فناوری سنتی و مدرن برای این امکانات با ظرفیت‌های مختلف و هزینه‌های استقرار متفاوت در نظر گرفته می‌شود. همچنین در صورت نیاز به این امکانات از ابتدای افق برنامه‌ریزی مد نظر قرار می‌گیرند.
- هر یک از امکانات و تسهیلات جمع‌آوری پسماند و همچنین هرکدام از مجموعه‌های پردازش و یا دفع پسماند دارای هزینه‌های مختلفی از جمله هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های تأسیس، ظرفیت و هزینه‌های حمل و نقل که با توجه به نوع هر منطقه که در آن تأسیس شده‌اند، تعیین می‌شوند.
- تعداد تأسیسات دائمی و موقتی ایجاد شده در هر منطقه محدود است. علاوه بر این، هر نوع تسهیلات محدودیت ظرفیت خاص خود را دارد.
- با توجه به انتشار آلودگی هر مجموعه، می‌توان هزینه جریمه که متناسب با فاصله آن از گره تقاضا است، در نظر گرفته شود. هرچه گره تقاضا فاصله بیشتری از امکانات جمع‌آوری به تقاضای گره‌ها داشته باشد، از سطح انتشار آلودگی پایین‌تری برخوردار است.
- مقدار پسماندهای جمع‌آوری شده و جمع‌آوری نشده، بیانگر میزان موجودی و کمبود در سیستم کنترل موجودی می‌باشد. از اینرو، این نقاط به دلیل اثرات مضر پسماندهای جمع‌آوری شده در این پژوهش از یک شبکه نمودار برای نشان دادن مناطق شهری با عنوان  $G(N,A)$ ، بطوریکه  $N$  تعداد گره‌ها را مشخص می‌کند و  $A$  مجموعه‌ای از کمان‌هایی را که اتصالات بین گره‌های موجود در شبکه را نشان می‌دهند، استفاده شده است. بطور کلی در هر شبکه شهری چندین منطقه وجود دارد؛ از قبیل گره‌های تقاضا و گره‌های کاندیدای محل و استقرار امکانات جمع‌آوری پسماند. همچنین تسهیلات باید به گونه‌ای مکانیابی شوند که بالاترین سطح خدمات به این گره‌های تقاضا در مناطق مختلف حاصل گردد.
- علاوه بر این، برخی از مکان‌های بالقوه به منظور مکان‌های فرآوری و یا دفع در مجاورت شبکه در نظر گرفته می‌شود. برای توسعه مدل ریاضی، برخی مفروضات عملی از ادبیات نظری پژوهش گرفته شده است و برخی از آنها بر اساس مشارکت تحقیقاتی ما پیشنهاد شده‌اند. بنابراین، فرضیات اصلی که این مدل را از سایر مدل‌های موجود متمایز می‌کند، به شرح زیر است:
- یک کلانشهر به مناطق مختلف تقسیم می‌شود. این مناطق باید به گونه‌ای باشد که در مجموع زباله‌های جمع‌آوری شده در هر یک از آنها از حد ظرفیت تجهیزات مربوطه که در آن نقطه فعالیت می‌کنند؛ تجاوز نمی‌کند.
- باید یک افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود.
- هر منطقه شامل گره‌های تقاضای (مخازن) از پیش تعریف شده است، به گونه‌ای که ارزش تقاضا در هر دوره متفاوت است.
- پسماندهای خانگی مختلف از قبیل کاغذ، شیشه، پلاستیک و فلز در نظر گرفته می‌شود. ترکیب پسماند بستگی به طیف گسترده‌ای از عوامل مانند عادات غذایی، آب و هوا و درآمد دارد. به این ترتیب، مقدار انواع پسماندهای تولید شده در هر منطقه نامشخص است.
- میانگین زمان سرویس برای هر گره (مخزن) مشخص است.

$\beta$	ضریب تبدیل فاصله به آلودگی
$Pof_{kjt}$	هزینه انتشار آلودگی ناشی از استقرار تأسیسات جمع آوری $f$ در گره $k$ ، منطقه $j$ طی دوره $t$
$Pe_{kijrt}$	هزینه جریمه ناشی از عدم تحقق تقاضای گره $i$ از زباله $r$ توسط تأسیسات بالقوه تأسیس شده در گره $k$ از منطقه $j$ در طول دوره $t$
$Tr_{ikjt}$	هزینه حمل و نقل پسماند از گره $i$ تا گره $k$ در منطقه $j$ در دوره $t$
$Tr'_{kjwt}$	هزینه حمل و نقل پسماند از گره $k$ به گره $w$ در منطقه $j$ در دوره $t$
$C_V$	ظرفیت ماشین $v$
$J_v$	هزینه هر واحد ظرفیت ماشین $v$
$L_{ij}$	طول کمان $i, j$ به طوریکه $i > 1$
$d_i$	ظرفیت مخزن (گره) $i$
$p_v$	هزینه هر واحد زمانی کارکرد (اجاره) از هر نوع ماشین $v$
$\alpha$	سرعت متوسط ماشین
$\lambda$	زمان متوسط برای سرویس در هر مخزن (گره)
$Co_{kijrt}$	هزینه عملیاتی برای جمع آوری زباله نوع $r$ از گره $i$ به تأسیسات $k$ در منطقه $j$ در طی دوره $t$
$Co'_{kjwt}$	هزینه عملیاتی متغیر دفع و حمل و نقل پسماند برای نوع زباله $r$ از تأسیسات $k$ در منطقه $j$ تا تأسیسات $w$ در طی دوره $t$
$m_j$	حداکثر تعداد تأسیسات جمع آوری دائمی پسماند که مجاز به تأسیس در منطقه $j$ در همه دوره ها می باشد
$m'_j$	حداکثر تعداد امکانات جمع آوری موقت پسماند که مجاز به تأسیس در منطقه $j$ در هر دوره می باشد
$Cap_{fr}$	ظرفیت تأسیسات جمع آوری $f$ برای زباله نوع $r$
$Cap'_{lr}$	ظرفیت تأسیسات پردازش $l$ برای نوع زباله $r$
$M$	عدد بسیار بزرگ

در جدول زیر متغیرهای موجود در مدل ریاضی نشان داده شده است.

آوری نشده که بر سلامتی و محیط زیست دارند، شامل هزینه-های جریمه می باشند که بر سیستم تحمیل کرده اند.

### جدول ۲. مجموعه اندیس های مدل ریاضی

نماد	تعریف
$i$ و $l$	فهرست شاخص های گره تقاضای مشخص شده در شبکه نمودار شهری
$j$	شماره مناطق مشخص شده در شبکه گراف، $j=1,2,\dots,J$
$r$	شماره انواع ( $r=1, 2, 3, 4$ ) به ترتیب نشان دهنده کاغذ، شیشه، پلاستیک و فلز
$f$	شماره امکانات جمع آوری زباله ( $f=1$ ) نشان دهنده تأسیسات دائمی و $f=2$ نشانگر تسهیلات موقتی است
$l$	شماره واحدهای پردازش و دفع زباله ( $l=1$ ) نشانگر تسهیلات با فناوری سستی و $l=2$ نشان دهنده امکانات با فناوری مدرن
$k$	شماره مکانهای بالقوه در شبکه های گراف شهری برای ایجاد امکانات جمع آوری پسماند، $k=1,2,\dots,K$
$w$	شماره مکانهای بالقوه در شبکه های گراف شهری برای ایجاد امکانات پردازش و دفع زباله، $w=1,2,\dots,W$
$V$	تعداد ماشین های در دسترس
$S$	زیرمجموعه اختیاری از $v$
$r(s)$	حداقل تعداد ماشین های مورد نیاز برای مجموعه $S$
$t$	شماره دوره های زمانی، $t=1,2,\dots,T$

همچنین در جدول زیر پارامترهای مدل ریاضی نشان داده شده است.

### جدول ۳. پارامترهای مدل ریاضی

پارامتر	تعریف
$Dem_{ijrt}$	تقاضای گره $i$ در منطقه $j$ برای نوع زباله $r$ طی دوره $t$
$C_{fkjt}$	هزینه تأسیس تسهیلات جمع آوری $f$ در گره $k$ ، از منطقه $j$ در طول دوره $t$
$C'_{lw}$	هزینه تأسیس محل پردازش یا دفع پسماند $l$ در گره $w$
$d_{ikj}$	فاصله بین گره های $i$ و $k$ در منطقه $j$
$d'_{kjwt}$	فاصله بین گره $w$ و $k$ در منطقه $j$

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جدول ۴. متغیرهای مدل ریاضی

متغیر	تعریف
$y_{fkjt}$	اگر تأسیسات جمع آوری $f$ در گره $k$ در منطقه $j$ در دوره $t$ تأسیس شده باشد عدد ۱؛ در غیر این صورت عدد صفر
$Z_{lw}$	اگر تأسیسات پردازش و یا دفع پسماند $l$ در گره $w$ در شروع افق برنامه ریزی تأسیس شده باشد عدد ۱؛ در غیر این صورت عدد صفر
$x_{ikjt}$	در صورت برآورده شدن تقاضای گره $i$ توسط تأسیسات بالقوه ایجاد شده در گره $k$ ، منطقه $j$ طی دوره $t$ عدد ۱؛ در غیر این صورت عدد صفر
$x'_{kjwt}$	اگر تأسیسات جمع آوری گره $k$ در منطقه $j$ به مرکز پردازش بالقوه گره $w$ در طی دوره $t$ اختصاص یابد برابر ۱؛ در غیر اینصورت عدد صفر
$\delta_{kijrt}$	مقدار پسماند نوع $r$ جمع آوری شده از گره $i$ در تأسیسات جمع آوری بالقوه گره $k$ در منطقه $j$ طی دوره $t$
$Bo_{kijrt}$	مقدار پسماند نوع $r$ از گره $k$ منطقه $j$ به تأسیسات پردازش بالقوه گره $w$ در طی دوره $t$
$x_{rw}^t$	مقدار تخصیص زیاده از منبع $i$ به تأسیسات $j$ در دوره $t$ (تن)
$x_{ij}^v$	در صورتیکه کمان $(i, j) \in A$ بوسیله ماشین $v$ طی شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با صفر خواهد بود
$Z_v$	تعداد سرویس (سفر) ماشین $v$ ، $Z_v \geq 0$

### ۳-۱ مدل ریاضی پژوهش

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z_1 = & \sum_{r=1}^T \sum_{f=1}^2 \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_{fkjt} y_{fkjt} + \sum_{l=1}^2 \sum_{w=1}^W C'_{lw} Z_{lw} + \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d'_{kjwt} Tr'_{kjwt} x'_{kjwt} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R C_{O_{kijrt}} \delta_{kijrt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^4 C_{O'_{kjwt}} \omega_{kjwt} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^4 d_{ikj} Tr_{ikjt} x_{ikjt} \\
 & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^4 P_{e_{kijrt}} Bo_{kijrt} + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^2 \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J P_{O_{fkjt}} y_{fkjt} \\
 \text{Min } Z_2 = & \sum_{v=1}^V Z_v J_v C_v + \sum_{v=1}^V J_v (Z_v C_v - \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^N d_i x_{ij}) + \sum_{v=1}^V p_v \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N x_{ij}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} + \lambda \right) + (Z_v \cdot g) + \sum_{i=1}^N x_{i1}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} \right) \right)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ikjt} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (1)$$

$$\sum_{w=1}^W x'_{kjwt} \geq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T y_{1kjt} \leq m_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{2kjt} \leq m'_j \quad (j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (4)$$

$$x_{ikjt} \leq \sum_{f=1}^2 y_{fkjt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (5)$$

$$x'_{kjwt} \leq \sum_{l=1}^L z_{lwt} \quad (w = 1, 2, \dots, W; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (6)$$

$$\delta_{kijrt} \leq Mx_{ikjt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (7)$$

$$\omega_{kjwt} \leq Mx'_{kjwt} \quad (k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; w = 1, 2, \dots, W; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K Dem_{ijrt} x_{ikjt} \leq Cap_{fr} \quad (f = 1, 2, \dots, F; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K \omega_{kjwt} \leq Cap'_{lr} \quad (l = 1, 2; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (10)$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{kijrt} \leq Dem_{ijrt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (11)$$

$$Bo_{kijrt} = \sum_{i=1}^I Dem_{ijrt} - \sum_{i=1}^I \delta_{kijrt} \quad (k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (12)$$

$$\sum_{i=2}^N x_{i1}^v = Z_v \quad \forall v \quad (13)$$

$$\sum_{i=2}^N x_{1j}^v = Z_v \quad \forall v \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{v=1}^V x_{ij}^v = 1 \quad \forall j > 1 \quad i \neq j \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V x_{ij}^v = 1 \quad \forall i > 1 \quad i \neq j \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^v = \sum_{k=1}^V x_{jk}^v \quad \forall j > 1, v \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N d_i \left( \sum_{j=1}^N x_{ij}^v \right) \leq Z_v C_v \quad \forall v \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N x_{ij}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} + \lambda \right) + (Z_v - 1) \cdot g + \sum_{i=1}^N x_{i1}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} \right) \leq y \quad (19)$$

$$\begin{cases} Z_v = 0 & \text{if } x_{11}^v = 1 & \forall v \\ Z_v \geq 1 & \text{if } x_{11}^v = 0 & \forall v \end{cases} \quad (20)$$

$$Z_v \geq x_{ij}^v \quad \forall v, i > 1, j \quad (21)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}^v \geq r(S) \quad \forall s \subseteq V - \{0\}, \quad s \neq \emptyset \quad (22)$$

$$x_{ij}^v = 0 \quad \forall i > 1, v \quad (23)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, v \quad Z_v \geq 0 \quad (24)$$

$$y_{fkjt}, x_{ikjt}, x'_{kjwt}, z_{lwt} \in \{0, 1\} \quad \delta_{kijrt}, Bo_{kijrt}, \omega_{kjwt} \in Z^+ \quad (25)$$



ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

### ۳-۲ تابع هدف

تابع هدف اول شامل دو شرط برای هزینه‌های تأسیس و راه اندازی برای امکانات جمع‌آوری و پردازش و دفع پسماند در مناطق مختلف می‌باشد. به ترتیب شامل هزینه‌های عملیاتی جمع‌آوری پسماند و پردازش / دفع پسماند، همچنین شامل هزینه‌های حمل و نقل مربوط به جمع‌آوری پسماند و هزینه‌های حمل و نقل مربوط به فرآوری و دفع پسماند می‌باشد. همچنین تابع هدف شامل هزینه‌های جریمه ناشی از عدم تحقق تقاضای همه گره‌های که منجر به عدم جمع‌آوری پسماندهای شهری شده و هزینه‌های آلودگی محیط زیست در مناطق مختلف را به سیستم تحمیل می‌کند؛ را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، این جریمه نشان دهنده اثرات مضر پسماند در محیط شهری را نشان می‌دهد. همچنین تابع هدف دوم از سه قسمت تشکیل شده است. دو بخش آن مربوط به هزینه ناوگان حمل، یعنی کمترین تعداد ماشین مورد نیاز برای سرویس‌دهی به کل گره‌ها و حداکثر کردن ظرفیت ناوگان و بخش آخر هزینه کارکرد آنها می‌باشد.

### ۳-۳ محدودیت مدل ریاضی

جمع‌آوری نمی‌شود. محدودیت (۸) بیان می‌کند که تا زمانی امکانات جمع‌آوری پسماند به یکی از مراکز پردازش و یا دفع پسماند اختصاص نیابد، هیچگونه پسماندی پردازش و یا دفع نمی‌شود. محدودیت (۹) محدودیت ظرفیت تسهیلات هر نوع پسماند را در هر منطقه نشان می‌دهد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند که کل پسماندهای انتقال یافته از محل جمع‌آوری به تأسیسات پردازش و یا دفع پسماند از ظرفیت خود فراتر نمی‌رود. محدودیت (۱۱) بیان می‌کند که حداکثر مقدار جمع‌آوری پسماند در هر منطقه برابر با میزان پسماندهای تولید شده در هر گره از آن منطقه می‌باشد. محدودیت (۱۲) مقدار پسماندها جمع‌آوری نشده در هر منطقه را محاسبه می‌کند. محدودیت‌های (۱۳) و (۱۴) بیانگر این مطلب هستند که نقطه شروع و پایان هر مسیر در هر سرویس برای ماشین  $v$ ، ایستگاه (گره شماره یک) است. محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۷) نشانگر این است که تنها یک ماشین حق ورود و خروج به یک گره و خدمت‌رسانی به آن را داراست. محدودیت (۱۸) این اطمینان را حاصل می‌کند که ظرفیت ماشین از حداکثر مجاز خود تجاوز نکند. محدودیت (۱۹) کنترل کننده زمان سرویس است که از حداکثر زمان در دسترس تجاوز نکند. محدودیت‌های (۲۰) و (۲۱) تعیین می‌کند که از ماشین‌های در دسترس از کدام یک استفاده شده و کدام یک بی استفاده‌اند. محدودیت‌های (۲۲) و (۲۳) تضمین کننده حذف تور فرعی است. محدودیت (۲۴) نیز نشان دهنده این است که  $x_{ij}^v$  متغیر صفر و یک و  $Z_v$  متغیر عدد صحیح می‌باشد. همچنین محدودیت (۲۵) دامنه متغیرها را تعریف می‌کند.

### ۴. رویکرد استوار برتسیمس و سیم

در مدل ارائه شده در بخش گذشته، پارامترها و محدودیت‌های مدل شرح داده شدند. مدل بهینه‌سازی را در حالت کلی می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$\max\{c^T x + d: Ax \leq b\} \quad (26)$$

که در آن  $x$  بردار سطری و  $c^T$  یک بردار ستونی به عنوان ضرایب تابع هدف می‌باشد.  $A$  به عنوان ماتریس ضرایب

محدودیت (۱) تضمین می‌کند که همه گره‌های تقاضا باید به یکی از امکانات جمع‌آوری پسماند برای دریافت خدمات در هر زمانی اختصاص داده شود. محدودیت (۲) مشخص می‌کند که همه امکانات جمع‌آوری پسماند باید حداقل به یک مرکز پردازش و یا دفع پسماند در هر دوره زمانی تخصیص داده شود. محدودیت‌های (۳) و (۴) نشان می‌دهد که تعداد امکانات و تسهیلات دائمی و موقتی که باید در هر منطقه ایجاد شود به ترتیب از حداکثر تعداد مجاز آنها تجاوز نکند. محدودیت (۵) بیانگر این است که یک گره تقاضا باید توسط تأسیسات جمع‌آوری پسماند هنگامی که در آن منطقه قرار گرفته شده، پوشش داده شود. همچنین محدودیت (۶) نشان می‌دهد که تسهیلات جمع‌آوری اگر قبلاً در منطقه ایجاد شده باشد، به یکی از مراکز پردازش و یا دفع پسماند تخصیص می‌یابد. محدودیت (۷) بیان می‌کند که تا زمانی گره تقاضا به تسهیلات مربوط به جمع‌آوری خود اختصاص نیابد، پسماند

$$x_j, y_j \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (31)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (32)$$

$$p_{ij} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (33)$$

## ۵. رویکرد فازی شهودی

هر چند نظریه مجموعه‌های فازی از عهده عدم اطمینان‌های ناشی از ابهام یا تعلقات جزئی به یک مجموعه بطور موفق عمل کرده است، ولی نمی‌تواند همه حالات عدم اطمینان که غالباً در مسائل زندگی واقعی و مختلف وجود دارد مخصوصاً مسائلی که با اطلاعات ناکافی سروکار دارند را مدل سازی کند. آتاناسوف (Atanassov, 2012) تعمیمی از مجموعه‌های فازی را به نام مجموعه‌های فازی شهودی<sup>۱</sup> معرفی نمود که می‌تواند بعد دیگری از تابع عضویت را نمایان سازد. یک مجموعه فازی شهودی در  $U$  مجموعه‌ای مانند  $A$  است که برای هر عضو  $u \in U$  دو درجه نسبت داده می‌شود. یکی "درجه عضویت" و دیگری "درجه عدم عضویت". یعنی مجموعه  $A$  را با تابع  $f_A: U \rightarrow [0,1] * [0,1]$  به طوریکه  $f_A(u) = (\mu_A(u), \nu_A(u))$  و  $0 \leq \mu_A(u), \nu_A(u) \leq 1$  برای هر  $u \in U$  نظیر می‌کنیم. در گام اول عبارت‌های کلامی فازی شهودی<sup>۲</sup> باید مشخص گردد (سادات حسینی و شاهبندرزاده، ۲۰۱۹).

جدول ۵. عبارت‌های کلامی و اعداد فازی تخصیص یافته به آنها

IFN <sup>3</sup> ( $\mu, \nu$ )	عبارت کلامی
(۰/۱ و ۰/۹)	بسیار کم (VL)
(۰/۱۵ و ۰/۲۵)	کم (L)
(۰/۲۵ و ۰/۳۵)	کمتر از متوسط (ML)
(۰/۵ و ۰/۴)	متوسط (M)
(۰/۵۵ و ۰/۲۵)	بیشتر از متوسط (MH)
(۰/۸۵ و ۰/۱)	زیاد (H)
(۰/۹ و ۰/۱)	بسیار زیاد (VH)

در گام بعد وزن شهودی<sup>۳</sup> اهداف به صورت زیر محاسبه می‌شود

(رابطه ۳۴). در این رابطه  $IW_j$  وزن شهودی هدف  $r$ ،  $W_{DM_A}$

محدودیت‌ها و  $b$  بردار اعداد سمت راست محدودیت‌ها هستند. در این مدل کلیه پارامترها قطعی فرض می‌شود. بنابراین در صورتی که مقدار این پارامترها با داده‌های اسمی آن تفاوت داشته باشد کیفیت و شدنی بودن مسئله تحت تأثیر قرار می‌گیرد و جواب بهینه‌ای که با این داده‌های اسمی به دست آمده است ممکن است دیگر بهینه و حتی شدنی نباشد. پس ضروری است از رویکردهایی استفاده کنیم که جواب مسئله را با در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامترهای مدل ارائه دهد. طبق تعریف برتسیمس و سیم فرض کنید پارامترهای  $c_j$  و  $b_i$  شامل اعداد قطعی و پارامترهای  $a_{ij}$  شامل داده‌های غیر قطعی باشد. با فرض اینکه هر کدام از ضرایب  $a_{ij}$  به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کراندار  $\tilde{a}_{ij}$  مدل می‌شود و در بازه  $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$  مقدار می‌گیرد که  $a_{ij}$  و  $\hat{a}_{ij}$  به ترتیب مقدار اسمی و حداکثر انحراف از مقدار اسمی را نشان می‌دهد. همچنین  $J_i$  را مجموعه پارامترهای نادقیق در محدودیت  $i$  ام در نظر بگیرد.

برتسیمس و سیم در راستای تحقق هدف استواری جواب، پارامتر  $\Gamma_i$  را برای هر محدودیت  $i$  معرفی کردند که عدم قطعیت نامیده می‌شود. پارامتر  $\Gamma_i$  در بازه  $[0, |J_i|]$  مقدار می‌گیرد، به طوری که  $|J_i|$  بیانگر تعداد ضرایب فنی غیر دقیق در محدودیت  $i$  ام است. نقش پارامتر  $\Gamma_i$  در محدودیت‌ها تنظیم میزان استواری در مقابل سطح محافظه کاری جواب است و هرچه بیشتر باشد، سطح محافظه کاری جواب افزایش می‌یابد. بنابراین مدل استوار برتسیمس و سیم با فرض غیرقطعی بودن ضرایب فنی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\text{Max } Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (27)$$

$$\text{st: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + z_i \Gamma_i + \sum_{j=1}^n p_{ij} \leq b_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (28)$$

$$z_i + p_{ij} \geq \hat{a}_{ij} y_i \quad \forall i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (29)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (30)$$

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

$$\sum_{r=1}^m FCW_r = 1 \quad (36)$$

در این پژوهش پنج نفر از متخصصان در ارزیابی اهداف مشارکت داشته‌اند. جدول ۶ اهمیت تصمیم گیرنده، ارزیابی تصمیم گیرندگان از اهداف، وزن شهودی و وزن قطعی محاسبه شده است.

وزن تصمیم گیرنده  $A$ ،  $E_{DM_A}^r$  ارزیابی تصمیم گیرنده  $A$  از هدف و  $n$  تعداد تصمیم گیرندگان را نشان می‌دهد.

$$IW_r = \sum_{A=1}^n (W_{DM_A} \otimes E_{DM_A}^r) \quad (34)$$

همچنین وزن قطعی نهایی<sup>۵</sup> از رابطه ۳۵ بدست می‌آید.

$$FCW_r = \frac{\mu_r + \pi_r \left( \frac{\mu_r}{\mu_r + v_r} \right)}{\sum_{r=1}^m \mu_r + \pi_r \left( \frac{\mu_r}{\mu_r + v_r} \right)} \quad (35)$$

جدول ۶. اهمیت تصمیم‌گیرندگان و نتایج ارزیابی توابع هدف

$FCW_r$	$IW_r$	$DM_5$ (H)	$DM_4$ (MH)	$DM_3$ (M)	$DM_2$ (M)	$DM_1$ (VH)	تصمیم‌گیرندگان
0/415	(0/945,0/007)	MH	MH	H	VH	VH	تابع هدف اول
0/585	(0/96,0/008)	L	MH	L	VH	VH	تابع هدف دوم

صنعتی، پسماندهای ساختمانی و غیره می‌باشد که بایستی جمع-آوری گردد. در این پژوهش میزان تولید روزانه پسماند را بعنوان پارامتر استوار در نظر گرفته شده است. از اینرو مدل نهایی برمبنای مدل پایه استوار برتسیمس و سیم زیر برای مسأله این پژوهش بصورت زیر می‌باشد.

## ۶. کاربرد مدل استوار برتسیمس و سیم و

### رویکرد فازی شهودی

در این قسمت مدل ارائه شده را برای مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی و موجودی تسهیلات موردنیاز جهت جمع‌آوری پسماند تولید در سطح شهر بوشهر به کار می‌بریم. یک شهر دارای پسماندهای متفاوتی را از قبیل پسماندهای خانگی، پسماندهای

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_1 = & \sum_{r=1}^T \sum_{f=1}^2 \sum_{k=1}^k \sum_{j=1}^j C_{f k j t} Y_{f k j t} + \sum_{l=1}^2 \sum_{w=1}^W C'_{l w} Z_{l w} + \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d'_{k j w} Tr'_{k j w t} x'_{k j w t} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R C_{o k i j r t} \delta_{k i j r t} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{w=1}^W \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^4 C_{o' k j w r t} \omega_{k j w r t} + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^4 d_{i k j} Tr_{i k j t} x_{i k j t} \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{r=1}^4 P e_{k i j r t} B_{o k j r t} + \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^2 \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J P o_{f k j t} Y_{f k j t} \\ \text{Min } Z_2 = & \sum_{v=1}^V Z_v J_v C_v + \sum_{v=1}^V J_v (Z_v C_v - \sum_{j=1}^N \sum_{i=2}^N d_i x_{i j}) + \sum_{v=1}^V p_v \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N x_{i j}^v \left( \frac{L_{i j}}{\alpha} + \lambda \right) + (Z_v \cdot g) + \sum_{i=1}^N x_{i 1}^v \left( \frac{L_{i j}}{\alpha} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^K x_{i k j t} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (37)$$

$$\sum_{w=1}^W x'_{k j w t} \geq 1 \quad (k = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (38)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T y_{1 k j t} \leq m_j \quad (j = 1, 2, \dots, J) \quad (39)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{2 k j t} \leq m'_j \quad (j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (40)$$

$$x_{i k j t} \leq \sum_{f=1}^2 y_{f k j t} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (41)$$

$$x'_{kjwt} \leq \sum_{l=1}^L z_{lw} \quad (w = 1, 2, \dots, W; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; t = 1, 2, \dots, T) \quad (42)$$

$$\delta_{kijrt} \leq Mx_{ikjt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (43)$$

$$\omega_{kjwt} \leq Mx'_{kjwt} \quad (k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; w = 1, 2, \dots, W; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \bar{D}em_{ijrt} x_{ikjt} + Z_{frt} \Gamma_{frt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} R_{ijrt} \leq Cap_{fr} \quad (f = 1, 2, \dots, F; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (45)$$

$$Z_{frt} + R_{ijrt} \geq E_{ikjt} \bar{D}em_{ijrt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (46)$$

$$-E_{ikjt} \leq x_{ikjt} \leq E_{ikjt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (47)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{w=1}^W \sum_{k=1}^K \omega_{kjwt} \leq Cap'_{tr} \quad (l = 1, 2; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (48)$$

$$\sum_{k=1}^K \delta_{kijrt} \leq Dem_{ijrt} \quad (i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (49)$$

$$Bo_{kijrt} = \sum_{i=1}^I Dem_{ijrt} - \sum_{i=1}^I \delta_{kijrt} \quad (k = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, J; r = 1, 2, 3, 4; t = 1, 2, \dots, T) \quad (50)$$

$$\sum_{i=2}^N x_{i1}^v = Z_v \quad \forall v \quad (51)$$

$$\sum_{i=2}^N x_{1j}^v = Z_v \quad \forall v \quad (52)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{v=1}^V x_{ij}^v = 1 \quad \forall j > 1 \quad i \neq j \quad (53)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V x_{ij}^v = 1 \quad \forall i > 1 \quad i \neq j \quad (54)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij}^v = \sum_{k=1}^V x_{jk}^v \quad \forall j > 1, v \quad (55)$$

$$\sum_{i=1}^N d_i \left( \sum_{j=1}^N x_{ij}^v \right) \leq Z_v C_v \quad \forall v \quad (56)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=2}^N x_{ij}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} + \lambda \right) + (Z_v - 1) \cdot g + \sum_{i=1}^N x_{i1}^v \left( \frac{L_{ij}}{\alpha} \right) \leq y \quad (57)$$

$$\begin{cases} Z_v = 0 & \text{if } x_{11}^v = 1 & \forall v \\ Z_v \geq 1 & \text{if } x_{11}^v = 0 & \forall v \end{cases} \quad (58)$$

$$Z_v \geq x_{ij}^v \quad \forall v, i > 1, j \quad (59)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij}^v \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V - \{0\}, \quad S \neq \emptyset \quad (60)$$

$$x_{ij}^v = 0 \quad \forall i > 1, v \quad (61)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, v \quad Z_v \geq 0 \quad (62)$$

$$y_{fkjt}, x_{ikjt}, x'_{kjwt}, z_{lw} \in \{0, 1\} \quad \delta_{kijrt}, Bo_{kijrt}, \omega_{kjwt} \in Z^+ \quad (63)$$

از جمله ویژگی‌های مطالعه علمی که هدفش حقیقت‌یابی است،

استفاده از یک روش تحقیق مناسب می‌باشد و انتخاب روش

۷. روش شناسی پژوهش

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

شکل‌گیری امپراطوری‌های اولیه، رقابت استعماری میان آنها شروع می‌شود. هر امپراطوری که نتواند در رقابت استعماری، موفق عمل کرده و بر قدرت خود بیفزاید (و یا حداقل از کاهش نفوذش جلوگیری کند)، از صحنه رقابت استعماری حذف خواهد شد. بنابراین بقای یک امپراطوری، وابسته به قدرت آن در جذب مستعمرات امپراطوری‌های رقیب، و به سطره درآوردن آنها خواهد بود. در نتیجه، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج بر قدرت امپراطوری‌های بزرگ افزوده شده و امپراطوری‌های ضعیف تر، حذف خواهند شد. امپراطوری‌ها برای افزایش قدرت خود، مجبور خواهند شد تا مستعمرات خود را نیز پیشرفت دهند. با گذشت زمان، مستعمرات از لحاظ قدرت به امپراطوری‌ها نزدیک‌تر خواهند شد و شاهد یک نوع همگرایی خواهیم بود. حد نهایی رقابت استعماری، زمانی است که یک امپراطوری واحد در دنیا داشته باشد، با مستعمراتی که از لحاظ موقعیت به خود کشور امپریالیست خیلی نزدیک هستند (عنایتی فر، یوسفی و داراس، ۲۰۱۳).

#### ۷-۲ شکل‌دهی امپراطوری‌های اولیه

در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه بر حسب متغیرهای مسأله است. لذا یک آزایی از متغیرهای مسأله که باید بهینه شوند، ایجاد می‌شود. در الگوریتم ژنتیک این آزایی، کروموزوم<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. در الگوریتم رقابت استعماری این آزایی را یک "کشور" می‌نامیم. در یک مسأله بهینه‌سازی  $N_{var}$  بعدی، یک کشور، یک آزایی  $1 \times N_{var}$  است. این آزایی به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Country = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_{N_{var}}] \quad (64)$$

مقادیر متغیرها در یک کشور، به صورت اعداد اعشاری نمایش داده می‌شوند. از دیدگاه تاریخی - فرهنگی، اجزای تشکیل دهنده یک کشور را می‌توان ویژگی‌های اجتماعی - سیاسی آن کشور همچون فرهنگ، زبان، ساختار اقتصادی و سایر ویژگی‌ها در نظر گرفت. به عبارت دیگر در حل یک مسأله بهینه‌سازی توسط الگوریتم معرفی شده؛ به دنبال بهترین کشور (کشوری با بهترین

تحقیق مناسب به هدف‌ها، ماهیت و موضوع مورد تحقیق و امکانات اجرایی بستگی دارد و هدف از تحقیق دسترسی دقیق و آسان به پاسخ پرسش‌های تحقیق است. پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت و روش جمع‌آوری داده‌ها، از نوع توصیفی - تحلیلی می‌باشد. در این پژوهش با استفاده از مطالعه کتابخانه‌ای، ادبیات پژوهش و نظریات مربوط به مسائل مکان‌یابی، موجودی، مسیریابی خودروها و تخصیص در بستر مدیریت سبز، جمع‌آوری گردید. به منظور کنترل عدم قطعیت برخی از پارامترهای مدل پژوهش از روش استوار فازی بهره گرفته شده است. از آنجا که مسأله این پژوهش np-hard می‌باشد با بهره‌گیری از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه و الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAII) مورد حل قرار گرفت. همچنین خروجی‌های مدل با استفاده از داده‌های استاندارد در محیط نرم افزار MATLAB مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

#### ۷-۱ الگوریتم رقابت استعماری

الگوریتم رقابت استعماری، یک الگوریتم الهام گرفته از تکامل اجتماعی انسان است که برای بهینه‌سازی توسعه داده شده است. این الگوریتم با الهام‌گیری از یک فرایند اجتماعی سیاسی دارای توانایی بالایی بوده و تا حد بسیار زیادی نیز سریع می‌باشد. همانند دیگر الگوریتم‌های تکاملی، این الگوریتم نیز با تعدادی جمعیت اولیه تصادفی که هر کدام از آنها یک "کشور" نامیده می‌شوند؛ شروع می‌شود. تعدادی از بهترین عناصر جمعیت به عنوان امپریالیست یا استعمارگر<sup>۹</sup> انتخاب می‌شوند. باقی مانده جمعیت نیز به عنوان مستعمره<sup>۷</sup>، در نظر گرفته می‌شوند. استعمارگران بسته به قدرتشان، این مستعمرات را با یک روند خاص به سمت خود می‌کشند.

قدرت کل هر امپراطوری، به هر دو بخش تشکیل دهنده آن یعنی کشور امپریالیست (به عنوان هسته مرکزی) و مستعمرات آن، بستگی دارد. در حالت ریاضی، این وابستگی با تعریف قدرت امپراطوری به صورت مجموع قدرت کشور امپریالیست، به اضافه درصدی از میانگین قدرت مستعمرات آن، مدل شده است. با

اولیه است.  $round$  نیز تابعی است که نزدیک‌ترین عدد صحیح به یک عدد اعشاری را می‌دهد. با در نظر گرفتن  $N.C_n$  برای هر امپراطوری، به این تعداد از کشورهای مستعمره اولیه به صورت تصادفی انتخاب شده و به امپریالیست  $n$  ام داده می‌شود. با داشتن حالت اولیه تمام امپراطوری‌ها، الگوریتم رقابت استعماری شروع می‌شود (عنایتی فر، یوسفی و داراس، ۲۰۱۳).

### ۳-۷ مدل‌سازی سیاست جذب (حرکت مستعمره‌ها به

#### سمت امپریالیست‌ها)

سیاست همگون‌سازی (جذب)<sup>۹</sup> با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌گیرد. کشورهای استعمارگر برای افزایش نفوذ خود، شروع به ایجاد عمران (ایجاد زیر ساخت‌های حمل و نقل، تأسیس دانشگاه و ...) می‌کنند (عنایتی فر، یوسفی و داراس، ۲۰۱۳).

### ۴-۷ انقلاب (تغییر ناگهانی در موقعیت یک کشور)

بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در جواب‌های بهینه محلی نجات یابد، که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آنرا به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد (صفری و فقیه، ۲۰۱۴).

### ۵-۷ جابجایی موقعیت مستعمره و امپریالیست

پس از اعمال سیاست جذب و انقلاب ممکن است به دلیل جابجایی‌های صورت گرفته وضعیت یک مستعمره در یک امپراتوری بهتر از خود امپریالیست شود. در این حالت جای مستعمره با امپریالیست عوض می‌شود. بنابراین در الگوریتم رقابت استعماری در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمار، ممکن است بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست تولید می‌فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره چهارم (۵۳) / تابستان ۱۴۰۱

ویژگی‌های اجتماعی - سیاسی) می‌باشیم. یافتن این کشور در حقیقت معادل یافتن بهترین پارامترهای مسأله است که کمترین مقدار تابع هزینه را تولید می‌کند. هزینه یک کشور با ارزیابی تابع هدف  $f$  در متغیرهای  $(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{Nvar})$  یافته می‌شود؛ بنابراین:

$$Cost_i = f(Country_i) = f(P_1, P_2, P_3, \dots, P_{Nvar}) \quad (65)$$

برای شروع الگوریتم، تعداد  $N_{Country}$  کشور اولیه ایجاد می‌شود.  $N_i$  تا از بهترین اعضای این جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست یا استعمارگر انتخاب می‌شود. باقیمانده  $N_{Col}$  تا از کشورها، مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هرکدام به یک امپراطوری تعلق دارند. در پایان این گام، کشورهای امپریالیست و مستعمره‌ای هر یک مشخص شده و هزینه مربوط به هر یک نیز با توجه به تابع هدف مسأله مشخص می‌شود (عنایتی فر، یوسفی و داراس، ۲۰۱۳).

$$C_n = \max\{C_i\} - c_n \quad (66)$$

که در آن  $C_n$ ، هزینه امپریالیست  $n$  ام،  $\max\{C_i\}$  بیشترین هزینه میان امپریالیست‌ها و  $c_n$  هزینه نرمالایز شده این امپریالیست، می‌باشد. هر امپریالیستی که هزینه دارای هزینه بیشتری باشد (امپریالیست ضعیف تری باشد)، دارای هزینه نرمالایز کمتری خواهد بود. با داشتن هزینه نرمالایز، قدرت نسبی نرمالایز هر امپریالیست به صورت زیر محاسبه شده و بر مبنای آن، کشورهای مستعمره، بین امپریالیست‌ها تقسیم می‌شوند.

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \quad (67)$$

از طرف دیگر، قدرت نرمالایز شده یک امپریالیست، نسبت مستعمراتی است که توسط آن امپریالیست اداره می‌شود. بنابراین تعداد اولیه مستعمرات یک امپریالیست برابر خواهد بود با:

$$N.C_n = round\{P_n \cdot (N_{col})\} \quad (68)$$

که در آن  $N.C_n$ ، تعداد اولیه مستعمرات یک امپراطوری و  $N_{col}$  نیز تعداد کل کشورهای مستعمره موجود در جمعیت کشورهای

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

در این رابطه  $T.C.n$  هزینه کل امپراطوری  $n$  ام و  $N.T.C.n$  هزینه کل نرمالیزه شده آن امپراطوری می باشد. هر امپراطوری که  $T.C.n$  کمتری داشته باشد،  $N.T.C.n$  بیشتری خواهد داشت. در حقیقت  $T.C.n$  معادل هزینه کل یک امپراطوری و  $N.T.C.n$  معادل قدرت کل آن می‌باشد. امپراطوری با کمترین هزینه، دارای بیشترین قدرت است. با داشتن هزینه کل نرمالیزه شده، احتمال (قدرت) تصاحب مستعمره مورد رقابت، توسط هر امپراطوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{pn} = \left| \frac{N.T.C.n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} N.T.C.i} \right| \quad (71)$$

با داشتن احتمال تصاحب هر امپراطوری، برای اینکه مستعمرات مذکور به صورت تصادفی، از  $P$  ولی با احتمال وابسته به احتمال تصاحب هر امپراطوری، بین امپراطوری‌ها تقسیم شود، بردار روی مقادیر احتمال یادشده، به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$P = [P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, \dots, P_{pN_{imp}}] \quad (72)$$

بردار  $P$  دارای سایز  $1 * N_{imp}$  است و از مقادیر احتمال تصاحب امپراطوری‌ها تشکیل شده است. سپس بردار تصادفی  $R$ ، هم اندازه با بردار  $P$  تشکیل می‌شود. آرایه‌های این بردار، اعدادی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه  $[0,1]$  هستند.

$$R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}}] \quad r_1, r_2, r_3, \dots, r_{N_{imp}} \in U(0,1) \quad (73)$$

سپس بردار  $D$  به صورت زیر تشکیل می‌شود.

$$D = P - R = [D_1, D_2, D_3, \dots, D_{N_{imp}}] = [P_{p1} - r_1, P_{p2} - r_2, \dots, P_{pN_{imp}} - r_{N_{imp}}] \quad (74)$$

با داشتن بردار  $D$ ، مستعمرات مذکور به امپراطوری داده می‌شود که اندیس مربوط به آن در بردار  $D$  بزرگتر از بقیه باشد (صفری و فقیه، ۲۰۱۴).

#### ۸-۷ سقوط امپراطوری‌های ضعیف

در جریان رقابت‌های امپریالیستی، امپراطوری‌های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراطوری‌های قوی می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراطوری در

کنند). در این حالت کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند (صفری و فقیه، ۲۰۱۴).

#### ۶-۷ قدرت کل یک امپراطوری (محاسبه هزینه کل هر امپراطوری)

قدرت یک امپراطوری برابر با قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن. بدین ترتیب برای هزینه کل یک امپراطوری برابر است با:

$$T.C_n = Cost(imperialist_n) + \xi \{mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (69)$$

که در آن  $T.C_n$  هزینه کل امپراطوری  $n$  ام و  $\xi$  عددی مثبت است که معمولاً بین صفر و یک و نزدیک به صفر در نظر گرفته می‌شود. کوچک در نظر گرفتن  $\xi$ ، موجب می‌شود که هزینه کل یک امپراطوری، تقریباً برابر با هزینه حکومت مرکزی آن (کشور امپریالیست) شود و افزایش  $\xi$  نیز باعث افزایش تأثیر میزان هزینه مستعمرات یک امپراطوری در تعیین هزینه کل آن می‌شود. در حالت نوعی  $\xi = 0/05$  در اکثر پیاده‌سازی به جواب‌های مطلوبی منجر شده است (صفری و فقیه، ۲۰۱۴).

#### ۷-۷ رقابت استعماری

هر امپراتوری که نتواند بر قدرت خود بیفزاید، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، به تدریج حذف می‌شود و به مرور زمان، امپراتوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست می‌دهند و امپراتوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب می‌کنند و بر قدرت خویش می‌افزایند. برای مدلسازی رقابت میان امپراطوری‌ها برای تصاحب مستعمرات، ابتدا احتمال تصاحب هر امپراطوری (که متناسب با قدرت آن امپراطوری است)، با در نظر گرفتن هزینه کل امپراطوری محاسبه می‌شود بدین منظور ابتدا از روی هزینه کل امپراطوری، هزینه کل نرمالیزه شده آن تعیین می‌شود.

$$N.T.C.n = \max\{T.C.i\} - T.C.n \quad (70)$$

و آخرین عنصر شماره انواع تسهیلات جمع‌آوری پسماند (دائم یا موقت) را که مشتری به آن تخصیص یافته است مشخص می‌سازد. تصویر ۱ راه حل اولیه استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همانگونه که در تصویر ۱ نشان داده شده است تعداد گره‌ها (مشتریان) ۷ و تعداد ۲ تسهیل (دائم و موقت) داریم. سطر اول نشان دهنده این موضوع است که از بین گره‌های (مشتریان) شماره ۱ تا ۷، دو سایت (تسهیل) شماره ۳ و ۵ انتخاب شده‌اند. همچنین سطر دوم نشان دهنده این است که مشتریان واقع در گره شماره ۱ برای دریافت خدمت بایستی به سایت (تسهیل) شماره ۳ تخصیص داده می‌شود. دیگر سطرها نیز به ترتیب مسیر انتقال تقاضای مشتریان ۲ تا ۷ را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲ شبکه جمع‌آوری پسماند در سطح شهر را نشان می‌دهد.

نظر گرفت. در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراطوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد (صفری و فقیه، ۲۰۱۴).

## ۷-۹ همگرایی

الگوریتم مورد نظر تا برآورده شدن یک شرط همگرایی، و یا اتمام تعداد کل تکرارها ادامه می‌یابد. پس از مدتی همه امپراطوری‌ها سقوط کرده و تنها یک امپراطوری خواهیم داشت و بقیه کشورها تحت کنترل این امپراطوری واحد قرار می‌گیرند. در الگوریتم رقابت استعماری در حالت پایه شرط توقف الگوریتم، حذف همه امپریالیست‌ها و باقی ماندن تنها یک امپریالیست است.

## ۸. نمایش راه حل

یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی هر الگوریتم فراابتکاری تعیین شیوه نمایش راه حل است. این نحوه نمایش با تصویر کردن خصوصیات راه حل در رشته‌ای از نمادها ارتباطی منطقی بین فضای اصلی مسئله و فضای جستجو با الگوریتم حل برقرار می‌کند. نحوه نمایش باید چنان باشد که بتواند تمامی راه حل‌های ممکن را نمایش دهد و از سوی دیگر با تغییر مقادیر مربوط به یک راه حل بتوان راه حل‌های دیگر مسئله را تولید کرد. در مسئله مورد بررسی، هر راه حل به کمک یک آرایه با  $n + 1$  ( $n$  تعداد مشتریان) سطر نمایش داده می‌شود. سطر نخست هر راه حل شماره سایت‌هایی را نشان می‌دهد که تسهیلات در آنها مستقر می‌گردند. بنابراین، این سطر به صورت رشته‌ای به طول  $m$  ( $m$  تعداد تسهیلات) در نظر گرفته می‌شود که در هر آرایه  $n$ ، شماره یکی از سایت‌های منتخب ذکر می‌گردد.

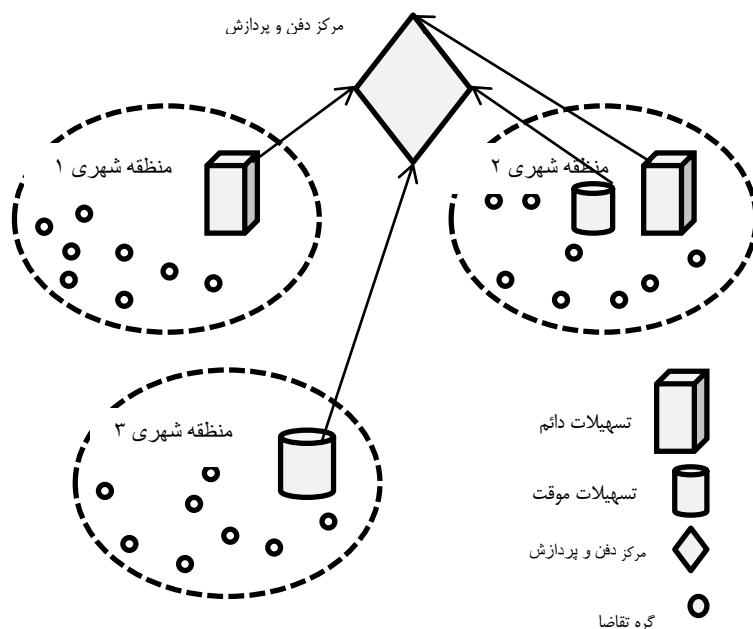
هر یک از  $n$  سطر بعدی، مسیرهای انتقال تقاضا میان مشتریان و هر یک از تسهیلات را مشخص می‌نماید؛ بنابراین، هر یک از سطرهای دوم تا  $n + 1$  به ترتیب مسیرهای انتقال تقاضای مشتریان اول تا  $n$  ام را تعیین می‌کنند. مسیر انتقال تقاضا از هر مشتری تا تسهیلات دائم و موقت متناظر به کمک شماره گره‌هایی که در آن مسیر قرار دارند، مشخص می‌شود. بنابراین، اولین عنصر هر سطر شماره مشتری (مخازن جمع‌آوری پسماند در سطح شهر)



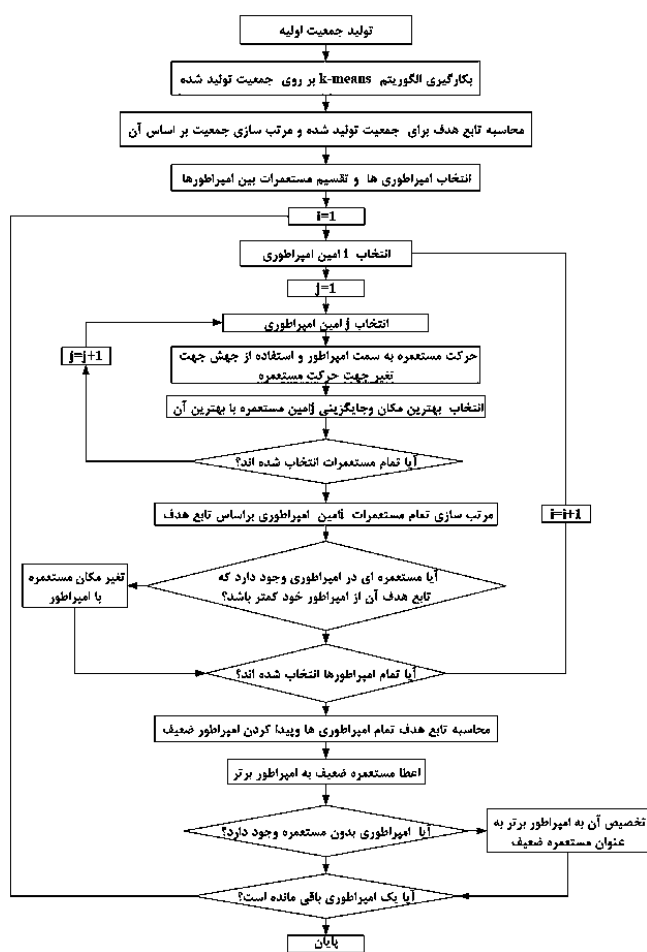
ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

۳	۵		
۱	۲	۳	
۲	۳		
۳			
۴	۵		
۵			
۶	۴	۵	
۷	۶	۴	۵

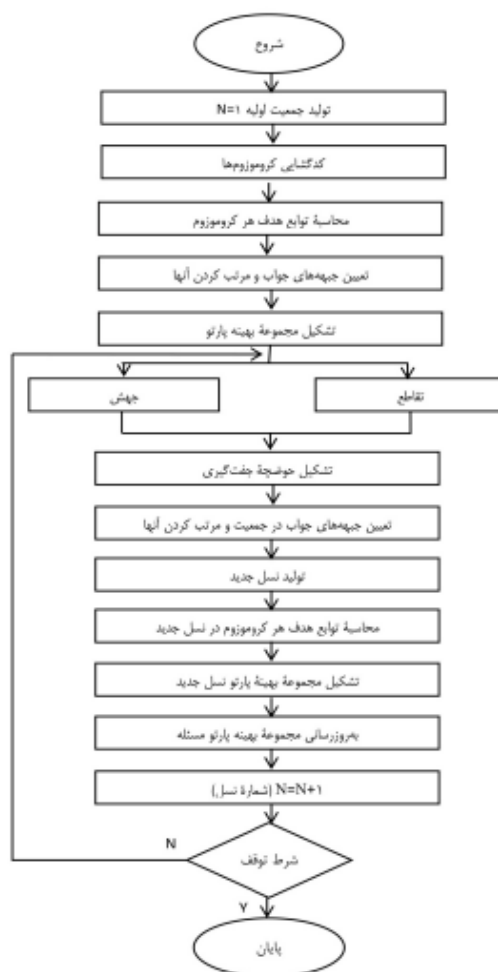
شکل ۱. نحوه نمایش راه حل اولیه مسیریابی بین گره‌های تقاضا تا تسهیلات دائم یا موقت جمع‌آوری پسماند



شکل ۲. شبکه جمع‌آوری پسماند در سطح شهر



فلوچارت الگوریتم (MOICA)



فلوچارت الگوریتم (NSGAI)

ندارند. دوم این که مسأله پژوهش از نوع مسائل گسسته ترکیبی است. به منظور بررسی همگرایی الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری دو هدفه، به جواب بهینه سراسری، ابتدا کد مربوط به الگوریتم و مدل مسئله به کمک نرم افزار متلب کدنویسی و شبیه سازی شد. همچنین عملیات پردازش بر روی رایانه ای با مشخصات Intel-corei5 2.67Ghz و RAM 4GB انجام شده است. تنظیم پارامترهای الگوریتم های ژنتیک دو هدفه (NSGAI) و رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) برای این مسأله در جدول ۷ نشان داده است.

## ۹. یافته های پژوهش

برای بررسی روایی مدل دو راه وجود دارد. ۱- بهره مندی از نظر خبرگان و کارشناسان و ۲- مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج واقعی و بررسی واقعی بودن نتایج و برآورده شدن محدودیت ها. در پژوهش حاضر از هر دو روش برای بررسی روایی و اعتبار مدل استفاده شده است. در این پژوهش از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه و همچنین الگوریتم ژنتیک دو هدفه برای بهینه سازی انتخاب شد، به این دلیل که اولاً مسئله پژوهش از نوع NP-Hard است و روش های دقیق برای اینگونه مسائل کارایی

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جدول ۷. تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه (NSGAI) و رقابت استعماری دو هدفه (MOICA) برای مسأله پژوهش

الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (MOICA)	الگوریتم‌های ژنتیک دو هدفه (NSGAI)
تعداد تکرار	تعداد تکرار
MaxIt=400	MaxIt=400
اندازه جمعیت	اندازه جمعیت
nPop=100	nPop=100
تعداد امپریالیست‌ها	درصد ایجاد تقاطع (ترکیب مجدد)
nEmp=6	pCrossover=0/8
ضریب جذب	میزان زاد ولد
beta=1/5	nCrossover=2*round(pCrossover*nPop/2)
میزان احتمال انقلاب	درصد میزان جهش
pRevolution=0.1	pMutation=0/5
نرخ رخ دادن انقلاب	نرخ جهش
mu=0/2	mu=0/04
ضریب هزینه مستعمره‌ها	اندازه مرحله جهش
zeta=0/1	sigma=0/1*(VarMax-VarMin)
سیاست انتخاب	جهش
alpha=1	

همچنین نحوه مسیریابی خودروهای جمع‌آوری پسماند در هر منطقه شهری و تخصیص مخازن به تسهیلات دائم یا موقت موجود در مناطق شهری در قالب مدل کوچکتر برای سناریو شماره ۱ (تعداد ۵ تسهیلات دائم و موقت و ۲۰ مخزن) مورد حل قرار گرفته است که در جدول شماره ۹ نشان داده شده است.

همچنین برای اجرای الگوریتم فراابتکاری رقابت استعماری دو هدفه و الگوریتم ژنتیک دو هدفه و به کمک داده‌های مورد نیاز، مدل ریاضی پژوهش در سناریوهای مختلف مورد حل قرار گرفته است. ابعاد سناریوهای تعریف شده در این پژوهش در جدول شماره ۸ نشان داده شده است.

جدول ۸. سناریوهای تعریف شده براساس داده‌های واقعی

سناریو	i	j	k	w	t
1	20	1	2	1	1
2	50	1	2	1	2
3	100	2	3	1	2

جدول ۹. سایت‌های دائم و موقت تعیین شده و نحوه تخصیص مخازن موجود به سایت‌های پیشنهادی

الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (ICAI)	الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)
شماره تسهیلات دائم	شماره تسهیلات دائم
۶-۹-۱۷	۴-۱۷-۱۹
شماره تسهیلات موقت	شماره تسهیلات موقت
۱۱-۲۰	۳-۲۰
تخصیص و مسیر حرکت خودروها از مخازن جمع‌آوری به تسهیلات دائم و شماره مخزن (شماره گره) یا موقت	تخصیص و مسیر حرکت خودروها از مخازن جمع‌آوری به تسهیلات دائم و شماره مخزن (شماره گره) یا موقت
۱	۱
۱-۶	۱-۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰
۲	۲
۲-۵-۱۱	۲-۵-۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۳	۳
۳-۷-۱۰-۱۸-۲۰	سایت جمع‌آوری پسماند موقت

فصلنامه مهندسی حمل‌ونقل / سال سیزدهم / شماره چهارم (۵۳) / تابستان ۱۴۰۱

الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (ICAI)		الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)	
۴	۴-۵-۱۱	۴	سایت جمع آوری پسماند دائم
۵	۵-۱۱	۵	۵-۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۶	سایت جمع آوری پسماند دائم	۶	۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰
۷	۷-۱۰-۱۸-۲۰	۷	۷-۱۰-۱۸-۲۰
۸	۸-۱۲-۱۸-۲۰	۸	۸-۱۲-۱۸-۲۰
۹	سایت جمع آوری پسماند دائم	۹	۹-۱۶-۱۷
۱۰	۱۰-۱۱-۲۰	۱۰	۱۰-۱۸-۲۰
۱۱	سایت جمع آوری پسماند موقت	۱۱	۱۱-۱۳-۱۴-۱۷
۱۲	۱۲-۱۸-۲۰	۱۲	۱۲-۱۸-۲۰
۱۳	۱۳-۱۴-۱۷	۱۳	۱۳-۱۴-۱۷
۱۴	۱۴-۱۷	۱۴	۱۴-۱۷
۱۵	۱۵-۲۰	۱۵	۱۵-۲۰
۱۶	۱۶-۱۷	۱۶	۱۶-۱۷
۱۷	سایت جمع آوری پسماند دائم	۱۷	سایت جمع آوری پسماند دائم
۱۸	۱۸-۲۰	۱۸	۱۸-۲۰
۱۹	۱۹-۲۰	۱۹	سایت جمع آوری پسماند دائم
۲۰	سایت جمع آوری پسماند موقت	۲۰	سایت جمع آوری پسماند موقت

(مخازن) ۱-۶-۷-۱۰-۱۸-۲۰ طی گردد. همچنین در جدول شماره ۱۰ مقادیر توابع هدف حاصل از اجرای هر الگوریتم نشان داده شده است.

همانگونه که در جدول ۹ نشان داده شده است مسأله پژوهش در ابعاد کوچک (تعداد ۲۰ گره و ۵ سایت) با هر دو الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک دو هدفه حل شده است. با توجه به خروجی حل هر دو الگوریتم می توان بیان نمود که برای جمع-آوری پسماندهای موجود در هر گره (مخزن) در روش رقابت استعماری مسیر کوتاه‌تری طی می‌شود که این نشان دهنده کارایی بالاتر این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک (NSGAI) دارد. برای مثال در روش حل الگوریتم رقابت استعماری، برای جمع آوری پسماند واقع در گره ۱ تنها فاصله تسهیلات جمع‌آوری دائم شماره ۶ تا گره ۱ طی می‌شود. به عبارت دیگر مخزن واقع در گره ۱ به تسهیل شماره ۶ تخصیص داده می‌شود. در عین حال این موضوع را می‌توان در روش الگوریتم ژنتیک (NSGAI) نیز دنبال نمود. همانگونه که در جدول فوق نشان داده شده است برای جمع آوری پسماند واقع در گره ۱ بایستی فاصله گره‌های

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جدول ۱۰. مقادیر توابع هدف حاصل از اجرای هر الگوریتم

سناریو	سطح عدم اطمینان	i	v	$Z_v$	مقدار تابع هدف الگوریتم رقابت		مقدار تابع هدف الگوریتم ژنتیک دو	
					استعماری دو هدفه (ICAI)		هدفه (NSGAI)	
					اول	دوم	اول	دوم
1		20	3	$\begin{cases} Z_1 = 1 \\ Z_2 = 1 \end{cases}$	332304/65	5915221/12	345608/75	6596217/74
2	0/2	50	3	$\begin{cases} Z_1 = 1 \\ Z_3 = 1 \end{cases}$	573703/41	9377952/19	596547/98	9987451/55
3		100	4	$\begin{cases} Z_1 = 1 \\ Z_2 = 1 \\ Z_4 = 1 \end{cases}$	810812/55	20227894/11	825654/41	22578951/54
1		20	3	$\begin{cases} Z_2 = 1 \\ Z_3 = 1 \end{cases}$	327960/12	5541257/47	379843/95	6984871/11
2	0/5	50	3	$\begin{cases} Z_1 = 1 \\ Z_2 = 1 \end{cases}$	453218/41	7596387/89	496471/36	8216487/44
3		100	4	$\begin{cases} Z_2 = 1 \\ Z_3 = 1 \\ Z_4 = 1 \end{cases}$	789854/94	20415841/96	810698/47	24859678/53

(۲) شاخص کیفیت<sup>۱۱</sup> (QM): این شاخص نشان دهنده سهم الگوریتم در مجموعه پاسخ‌های پارتو حاصل از ترکیب پاسخ‌های پارتو ارائه شده از طریق کلیه الگوریتم‌های مورد مقایسه است. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشانه کارایی بهتر الگوریتم است (هادی نژاد، رزمی و خواجه، ۲۰۱۸).

(۳) شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده آل<sup>۱۲</sup> (MID): این شاخص نشان دهنده میانگین فاصله نقاط پارتو از جواب ایده آل است. مقدار ایده آل برابر با بهترین مقدار ممکن برای هر یک از توابع هدف در تمامی الگوریتم‌های به کار رفته است. کمتر بودن مقدار این شاخص به معنای بهتر بودن کارایی الگوریتم می‌باشد (هادی نژاد، رزمی و خواجه، ۲۰۱۸).

(۴) شاخص فاصله<sup>۱۳</sup> (SM): این شاخص نشان دهنده انحراف معیار فاصله پاسخ‌های نامغلوب می‌باشد. به عبارت دیگر میزان فاصله نسبی پاسخ‌های متوالی پارتو را محاسبه می‌نماید. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان کارایی بهتر الگوریتم است.

(۵) شاخص گوناگونی<sup>۱۴</sup> (DM): این شاخص فاصله اقلیدسی بین جواب ابتدایی و انتهایی مجموعه پاسخ پارتو را نشان می‌دهد. این شاخص طول قطر مکعب فضایی را که به وسیله مقادیر انتهایی اهداف برای مجموعه پاسخ‌های نامغلوب به کار می‌رود، اندازه

## ۱۰. تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل

### پیشنهادی

با توجه به اینکه روش‌های فرا ابتکاری، الگوریتم‌های تخمینی برای حل مسائل بهینه‌سازی محسوب شده و ماهیتی تصادفی دارند؛ حل یک مسئله از طریق روش‌های مختلف ممکن است به پاسخ‌های مختلف منجر شود، لذا ارزیابی الگوریتم‌ها و انتخاب الگوریتم مناسب با کمک شاخص‌های متنوع مورد توجه محققان علوم مختلف قرار گرفته است. اما همگرایی در پاسخ‌های پارتو و فراهم نمودن چگالی و تنوع در میان مجموعه پاسخ‌ها، دو هدف مجزا و تا حدودی متضاد در الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه محسوب می‌شوند، لذا معیار مطلقی که بتواند در مورد عملکرد الگوریتم‌ها تصمیم بگیرد، وجود ندارد. در نهایت پس از بررسی ادبیات موضوع، شش شاخص زیر به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در این پژوهش شناسایی و معرفی شده‌اند.

(۱) شاخص تعداد جواب‌های پارتو<sup>۱۰</sup> (NPS): این شاخص نشانگر تعداد پاسخ‌های پارتو یافت شده از طریق الگوریتم می‌باشد و هر چه این تعداد بیشتر باشد، نشان دهنده کارایی بهتر الگوریتم مورد نظر است (هادی نژاد، رزمی و خواجه، ۲۰۱۸).

بایست مقادیر هر شاخص در الگوریتم ها محاسبه و ارائه گردد. برای اطمینان از جواب‌های الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی پس از حل یک مسئله در ابعاد کوچکتر، نتایج آنرا با الگوریتم فراابتکاری ژنتیک دوهدفه (NSGAI) مقایسه شد که نتایج آن در جدول ۱۱ نشان داده شده است.

می‌گیرد. هرچه مقدار این شاخص مقادیر بزرگتری اختیار کند، الگوریتم مربوطه کارایی بالاتری خواهد داشت. (۶) شاخص زمان اجرای الگوریتم (Time): این شاخص بر زمان اجرای الگوریتم تأکید کرده و از مهمترین شاخص ها در مقایسه الگوریتم های مختلف است و هر چه میزان آن کمتر باشد (در صورت برابر بودن سایر شاخص ها)، الگوریتم مورد نظر کارا تر خواهد بود. پس از شناسایی شاخص ها، در ادامه می

جدول ۱۱: مقایسه نتایج اجرای الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (ICAI) و الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)

الگوریتم	تعداد کوره	مجموع تسهیلات دائم و موقت	تعداد فراخوانی تابع هدف	نام شاخص					
				NPS	QM	MID	SM	DM	TIME (sec)
الگوریتم ژنتیک دو هدفه (NSGAI)	۱۰۰	۲۰	۱۲۳۸۲						۴۵۵
	۵۰	۱۰	۱۲۳۰۲	۲۳	۰/۷	۰/۷۶۹	۰/۱۵۷۴	۶/۳۶	۳۶۵
	۲۰	۵	۱۲۱۰۵						۲۲۰
الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه (ICAI)	۱۰۰	۲۰	۱۱۹۵۵						۴۲۰
	۵۰	۱۰	۱۱۳۰۲	۲	۰/۷	۰/۶۸۸	۰/۶۱۶۷	۶/۳۶	۳۲۱
	۲۰	۵	۱۱۰۳۸						۱۹۵

تعریف مسأله ارائه می‌شود. در بخش دوم بر اساس مفروضات در نظر گرفته شده، یک مدل ریاضی دو هدفه اولیه ارائه گردید. در بخش سوم، با بکارگیری روش استوار و همچنین روش وزن دهی فازی - شهودی اقدام به مدل‌سازی نهایی گردید. همچنین در بخش چهارم، از الگوریتم رقابت استعماری دو هدفه و الگوریتم ژنتیک دو هدفه برای حل مسأله در ابعاد بزرگ، استفاده گردید. نتایج حل به دست آمده الگوریتم‌های فراابتکاری برای یک ناحیه از سطح شهر بوشهر ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با مسیری درستی به ماشین‌های جمع‌آوری پسماند می‌توان از حداقل خودروهای در دسترس استفاده کرد و شاهد کاهش هزینه‌ها بود. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که الگوریتم‌های مورد استفاده برای حل مسأله در ابعاد بزرگ بسیار کارا می‌باشند و جواب بهینه تولید می‌کنند. از اینرو می‌توان بخش‌های مختلف این پژوهش را با سایر پژوهش‌های انجام شده مورد مقایسه قرار داد که به طور خلاصه در جدول شماره ۱۲ نشان داده شده است.

## ۱۱. نتیجه‌گیری و پیشنهاد

مکان‌یابی، مسیریابی و تخصیص تسهیلات مورد نیاز در حوزه جمع‌آوری پسماندهای شهری از جمله مهم‌ترین مسائلی است که می‌تواند باعث کاهش چشم‌گیر هزینه‌های واحد مدیریت پسماند در شهرداری‌ها گردد. در بسیاری از مدل‌هایی که به طور همزمان به چهار عامل مکان‌یابی، مسیریابی، تخصیص تسهیلات مورد نیاز و همچنین مدیریت موجودی توجه می‌کنند، بایستی فرض عدم قطعیت بعضی از پارامترها را به عنوان یک پیش‌فرض اجتناب‌ناپذیر در نظر گیرند. در این پژوهش، یک رویکرد کاملاً جدید برای مواجهه با عدم قطعیت اینگونه مدل‌ها ارائه شده است که با اعمال آن در مدل‌های قطعی می‌توان آنها را هرچه بیشتر به مسائل واقعی نزدیک کرد.

در این پژوهش برای حل مسأله مکان‌یابی، مسیریابی خودروهای جمع‌آوری پسماند، تخصیص امکانات و مدیریت موجودی پسماندهای جمع‌آوری شده، مدلی جدید در چهار مرحله ارائه گردید. در مرحله نخست بعد از خوانی ادبیات نظری پژوهش،

ارائه مدل چندهدفه فازی - استوار برای مسأله مکان‌یابی - تخصیص - مسیریابی موجودی سبز در بهینه‌سازی فرایند مدیریت پسماند شهری با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

جدول ۱۲. مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها

منابع	نوع مسأله			وضعیت		نوع تابع هدف			روش حل
	مکان‌یابی	مسیریابی	تخصیص	فقط	فقط	اقتصادی	اجتماعی	زیست محیطی	
پژوهش حاضر (۲۰۲۱)	*	*	*	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط - الگوریتم رقابت استعماری و الگوریتم ژنتیک
گامبلا و همکاران (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و حل با استفاده از نرم افزار <i>CPLEX</i>
راثور و سارما (۲۰۱۹)	*	*	*	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، استفاده از نرم افزار <i>CPLEX</i> و <i>ARCGIS</i>
مانیب و همکاران (۲۰۱۸)	*	*	*	*	*	*	*	*	برنامه‌ریزی آرمانی

خودروها به صورت سیستماتیک مدل‌سازی و بهینه‌یابی می‌گردد. از منظر نوآوری تکنیکی، توابع هدف مربوط به این پژوهش برحسب منطق فازی شهودی وزن‌دار شده‌اند که در نوع خود تحلیلی نوین با این توابع می‌باشد. استفاده از برنامه‌ریزی استوار در محدودیت‌های مسأله، بویژه در محدودیت مربوط به میزان پسماندهای تولیدی را می‌توان به عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های تکنیکی این پژوهش در مقایسه با سایر پژوهش‌ها در نظر گرفت. به عبارت دیگر مدل‌سازی پژوهش حاضر با تابع هدف فازی شهودی و همچنین محدودیت‌های استوار در نوع خود تحلیلی نوین به شمار می‌آید. در نهایت از منظر نوآوری کاربردی این پژوهش، بکارگیری مدل چندهدفه با وزن‌های فازی شهودی و محدودیت‌های استوار در مدیریت پسماند شهری در شهرداری بندر بوشهر می‌باشد که در این پژوهش مورد تبیین قرار گرفته است.

همچنین به منظور اعتبارسنجی مدل ریاضی و کارایی الگوریتم‌های حل ارائه شده از طریق مقایسه الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک دو هدفه (*NSGAI*)، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که هرکدام از الگوریتم‌های پیشنهادی می‌تواند در برخی از شاخص‌ها از کارایی بالاتری نسبت به دیگری برخوردار باشد. با توجه به نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌گردد که از سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری از قبیل بهینه‌سازی کلونی

همچنین در این پژوهش سعی شده است نوآوری را از سه جنبه خلاً نظری، تکنیکی و کاربردی مورد بررسی دقیق قرار گیرد که می‌توان از آنها به عنوان نقاط قوت پژوهش حاضر در مقایسه با سایر پژوهش‌ها نام برد. در این راستا پس از بررسی و تجزیه و تحلیل مقالات زیادی در حوزه مدیریت شهری که حدود ۲۶ مقاله در پژوهش حاضر به عنوان منابع اصلی مورد استفاده واقع شده است. در جدول شماره ۱۲ سعی شده است پژوهش حاضر را با ۳ پژوهش برتر در حوزه مدیریت پسماند مورد مقایسه قرار گیرد و ضعف‌های آنها را مورد تبیین و برطرف نمود.

در این راستا مشخص شده است که مقالات پیشین از نظر نوع مدل‌سازی مسأله، موضوعات مسیریابی و مدیریت موجودی (میزان پسماندهای جمع‌آوری شده و باقی مانده)، با بررسی دو نوع تابع هدف تحت عناوین اجتماعی و زیست محیطی به عنوان توابع جدید در این مدل به کار رفته است که در واقع برای تحلیل هزینه اقتصادی اجتماعی به دنبال کاهش زمان جمع‌آوری پسماندها با طی مسافت کوتاه‌تر موجب سرعت دهی به پاسخ‌گویی نیازهای دفع پسماند منطقه‌ای و جامعه خواهد شد که در این پژوهش مطرح شده است.

همچنین تابع هدف زیست محیطی که در آن به کمینه نمودن میزان پسماندهای باقی مانده در مخازن اشاره دارد که در واقع با مسیریابی

- Atanassov, K. (2012). On Intuitionistic Fuzzy Sets Theory.

- Chauhan, A., & Singh, A. (2016). A hybrid multi-criteria decision making method approach for selecting a sustainable location of healthcare waste disposal facility . J. Cleaner Prod. 139, 1001–1010.

- Eiselt, H., & Marianov, V. (2015). Location modeling for municipal solid waste facilities . Comput. Oper. Res. 62, 305–315.

- Enayatifar, R. (2013). MOICA: Anovel multi-objective approach based onimperialist competitive algorithm . Applied Mathematics and Computation 219 (2013)8829–8841.

- Galante, G., Aiello, G., Enea, M., & Panascia, E. (2017). A multi-objective approach to solid waste management . Waste Management, 30(8), 1720-1728.

- Gambella, C., Maggioni, F., & Vigo, D. (2019). A stochastic programming model for a tactical solid waste management problem. Eur. J. Oper. Res. 273 (2), 684–694.

- Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., & Triki, C. (2012). Capacitated location of collection sites in an urban waste management system. Waste Manage. 32 (7), 1291–1296.

- Ghiani, G., Manni, A., Manni, E., & Toraldo, M. (2014). The impact of an efficient collection sites location on the zoning phase in municipal solid waste management. Waste Manage. 34 (11), 1949–1956.

- Habib, M., Sarkar, B., Tayyab, M., Saleem, M., Hussain, A., Ullah, M., et al. (2019). Large-scale disaster waste management under uncertain environment. J.Cleaner Prod. 212, 200–222.

- Hadi nezahd, F., Ramzi, A., & Khaje, M. (2018). Evaluation and comparison of multi-

مورچگان<sup>۱۵</sup>، سیستم ایمنی مصنوعی<sup>۱۶</sup>، کلونی زنبوران<sup>۱۷</sup>، الگوریتم‌های تربیتی<sup>۱۸</sup>، الگوریتم‌های با هم تکاملی<sup>۱۹</sup>، و غیره برای حل مدل این پژوهش و مقایسه نتایج با الگوریتم‌های این پژوهش بهره گرفته شود.

## ۱۲. پی‌نوشت‌ها

1. Intuitionistic Fuzzy Set
2. Intuitionistic Fuzzy Linguistic Term
3. Intuitionistic Fuzzy Number
4. Intuitionistic Weight
5. Final Crisp Weight
6. Imperialist
7. Colony
8. Chromosome
9. Assimilation
10. Number of Pareto Solution
11. Quality Metric
12. Mean Ideal Distance
13. Spacing Metric
14. Diversification Metric
15. Ant colonies optimization
16. Artificial immune systems
17. Bee colony
18. Cultural algorithms
19. Co-Evolutionary algorithms

## ۱۳. منابع

- Enayatifar, R., Yousefi, M., Abdullah, A., & Darus, A. (2013). MOICA: Anovel multi-objective approach based onimperialist competitive algorithm. Applied Mathematics and Computation 219 (2013)8829–8841.

- Safari, H., & Faghih, A. (2014). Solving the Resource-Constrained Project Scheduling Problems (RCPSP) Using Developed Imperialistic Competition Algorithm (DICA).

- Arena, U., & Di Gregorio, F. (2014). A waste management planning based on substance flow analysis. Resources, Conservation and Recycling, 85, 54-66.



- objective meta-heuristic algorithms to solve the optimization problem. No. 8.
- Rathore, P., & Sarmah, S. (2019). Modeling transfer station locations considering source separation of solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city India. *J. Cleaner Prod.* 211, 44–60.
  - Sadat Hosseini, M., & Shahbandarzadeh, H. (2019). Designing a multi-objective mathematical model with intuitive fuzzy approach for selecting investment projects (Study of investment opportunities in Bushehr province. *Journal of Business Strategies / Shahed University / 26th Year/ No. 14.*
  - Wang, K., & Yang, Q. (2014). . Hierarchical facility location for the reverse logistics network design under uncertainty. *J. Uncertain Syst.* 8 (4), 255–270.
  - Yadav, V., Bhurjee, A., Karmakar, S., & Dikshit, A. (2017). A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment. *Sci. Total Environ.* 603, 760–771.
  - Yadav, V., Karmakar, S., Dikshit, A., & Bhurjee, A. (2018). Interval-valued facility location model: An appraisal of municipal solid waste management system. *J. Cleaner Prod.* 171, 250–263.
  - Khadivi, M., & Ghomi, S. (2012). Solid waste facilities location using of analytical network process and data envelopment analysis approaches. *Waste Manage.* 32(6), 1258–1265.
  - Li, Y., & Huang, G. (2012). Robust interval quadratic programming and its application to waste management under uncertainty. *Environ. Syst. Res.* 1 (1), 1. .
  - Lu, H. W., Huang, G. H., He, L., & Zeng, G. M. (2018). An inexact dynamic optimization model for municipal solid waste management in association with greenhouse gas emission control. *Journal of environmental management*,90(1), 396-409.
  - Minciardi, R., Paolucci, M., Robba, M., & Sacile, R. (2017). Multi-objective optimization of solid waste flows: environmentally sustainable strategies for municipalities. *Waste Management*, 28(11), 2202-2212.
  - Muneeb, S., Adhami, A., Jalil, S., & Asim, Z. (2018). Decentralized bi-level decision planning model for municipal solid waste recycling and management with cost reliability under uncertain environment. *Sustain. Prod. Consumpt.* 16, 33–44.

محمدحسین کبگانی، درجه کارشناسی در رشته مدیریت صنعتی را در سال ۱۳۸۹ با رتبه ممتاز از دانشگاه خلیج فارس بوشهر و درجه کارشناسی ارشد در مدیریت صنعتی - گرایش تحقیق در عملیات را در سال ۱۳۹۱ با رتبه ممتاز از دانشگاه خلیج فارس اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان مدیریت و فنون تصمیم‌گیری کمی و کیفی، علم مدیریت فازی و مدلسازی ریاضی، تجزیه و تحلیل، مستندسازی، آسیب‌شناسی و بهبود فرایندها و سیستم‌های سازمانی بوده، کاربرد رویکردهای هوش مصنوعی در علم مدیریت بوده و در حال حاضر دانشجوی دوره دکتری تحقیق در عملیات دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.



حمید شاهبندرزاده، درجه کارشناسی در رشته مدیریت را در سال ۱۳۶۸ با رتبه ممتاز از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت را در سال ۱۳۷۲ با رتبه ممتاز از دانشگاه تربیت مدرس اخذ نمود. در سال ۱۳۸۵ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات از دانشگاه تهران گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان فنون تصمیم‌گیری چند معیاره، ارزیابی عملکرد، بهینه‌سازی و مدلسازی ریاضی و کاربرد روش‌های هوش محاسباتی در مدیریت بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.



ابراهیم حیدری، درجه کارشناسی در رشته علوم اقتصادی گرایش اقتصاد نظری را در سال ۱۳۶۷ با رتبه ممتاز از دانشگاه شیراز و درجه کارشناسی ارشد در رشته برنامه‌ریزی سیستم‌های اقتصادی را در سال ۱۳۷۱ با رتبه ممتاز از دانشگاه شیراز اخذ نمود. در سال ۱۳۸۲ موفق به کسب درجه دکتری در رشته علوم اقتصادی گرایش منابع و انرژی از دانشگاه تربیت مدرس گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان اقتصاد کلان، اقتصاد انرژی، برنامه‌ریزی اقتصادی، کارایی و بهره‌وری بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.



سید نورالدین امیری، درجه کارشناسی در رشته علوم اجتماعی را در سال ۱۳۷۳ با رتبه ممتاز از دانشگاه شیراز و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی شهرسازی را در سال ۱۳۷۹ با رتبه ممتاز از دانشگاه شیراز اخذ نمود. در سال ۱۳۹۰ موفق به کسب درجه دکتری در رشته جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری از دانشگاه شهید بهشتی گردید. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان تحلیل و طراحی در حوزه شهر بندرها، بازآفرینی شهری و مدیریت شهری بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.

