فصلنامه مهندسی حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۳، بهار ۱۴۰۳، ص. ۳۸۴۳-۳۸۲۱

مقاله علمی-پژوهشی

کاربرد رویکرد استوار فازی به منظور مکانیابی - مسیریابی تسهیلات جمع‌آوری پسماندهای شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

حمید شاه بندرزاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده کسب و کار و اقتصاد، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

E-mail: shahbandarzadeh@pgu.ac.ir

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

دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

چکیده

امروزه مسأله مکانیابی مخازن زباله و مسیریابی خودروهای جمع آوری پسماند در ارتباط نزدیک با سلامت جامعه و همچنین محیط زیست دارد. در این مقاله، مسأله مکانیابی- مسیریابی کمان دوره ای همراه با ایستگاه‌های تخلیه میانی در شرایط عدم قطعیت مورد بررسی قرار می‌گیرد که هدف آن کاهش تعداد مکان‌های فعال جهت جمع‌آوری پسماند در سطح شهر بوشهر، تعیین مسیرهای بهینه جهت سرویس دهی تمامی یال‌های دارای تقاضای شبکه گراف شهری در طول هفته و تعداد وسایل نقلیه موردنیاز است. یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط همراه با در نظر گرفتن تقاضای فازی برای بهینه‌سازی مسأله توسعه داده می‌شود و برای حل تقریبی مسأله از در ابعاد بزرگ الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده می شود. برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، از حل کننده CPLEXنرم افزار GAMSدر حل مسائل با ابعاد کوچک و متوسط بهره برده می شود. در پژوهش حاضر از آنجا که در مسأله برنامه-ریزی مدیریت پسماند شناسایی دقیق و صحیح توزیع پارامترها خیلی مشکل است و اغلب داده‌های مورد نیاز از عدم قطعیت برخوردار هستند برای مدلسازی مسأله پژوهش از رویکرد بهینه‌سازی استوار و رویکرد فازی شهودی استفاده شده است. نتایج انجام این پژوهش نشان می‌دهد که مقدار توابع هدف تعیین شده در روش استوار فازی نسبت به روش قطعی از مقدار کمتری برخوردار است. از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش ۹ درصدی در میزان استفاده از مخازن مورد نیاز تخصیص داده شده به مکان‌های جمع‌آوری پسماند و همچنین کاهش ۵۲ درصدی مکان های فعال جهت جمع‌آوری پسماند اشاره نمود.

واژه‌های کلیدی: مدیریت پسماند، برنامه‌ریزی استوار فازی، عدم قطعیت، الگوریتم ژنتیک چند هدفه، شهر بوشهر

۱. مقدمه

افزایش ناگهانی جمعیت، گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی، برداشت بی‌رویه از منابع، عدم توجه به آمایش سرزمین و توسعه پایدار و دهها مورد از این دست بشر امروز را در تلاطمی وارد ساخته که شاید این باور را از دست داده که محیط زیست امانتی در اختیار نسل کنونی است و نسل‌های آینده نیز حق حیات دارند. بطور کلی اجتماعات انسانی از دیرباز پس از استفاده از منابع مختلف طبیعی موجود بر روی کره زمین، قسمت‌های غیرقابل مصرف و زاید آن را دفع می-کردند. 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 زاید به نحو آشکاری گریبان‌گیر حیات جوامع بشری به ویژه شهرها شده است.

مواد زاید شهری شامل تمام مواد زاید حاصل از فعالیت–هایی است که در شهر انجام می‌گیرد. بر اساس مطالعات انجام شده، سالانه حدود ۱/۳×۱۰۹ تن زباله در سطح جهان تولید می گردد که پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۵ به رقم ۲/۲×۱۰۹ برسد. که یکی از دلیل این امر افزایش جمعیت شهرنشین می باشد. دریک شهر، بخش‌های مختلفی در فعالیت هستند و هر بخش نیز در تولید مواد زاید شهری نقش دارد. بخش‌های خانگی، تجاری، حمل و نقل، صنعتی، درمانی، بهداشت و خدمات هرکدام مواد زایدی با خصوصیات ویژه‌ای تولید می‌کنند. از نظر حجم نیز از ذرات گرد و غبار تا وسایل اسقاطی در این زائدات وجود دارد. از نظر خطرناک بودن نیز شامل مواد زائد و غیر فاسد پذیر و هم مواد کاملا خطرناک مثل مواد زائد بیمارستانی را در بر می‌گیرد.

ابعاد مسئله تعریف شده در این پژوهش با توجه به اندازه و جمعیت شهرها متفاوت است. در شهرهای پرجمعیت، مناطق مختلف شهر طبقه‌بندی می‌شوند و مدیریت پسماند هرکدام مختص شهرداری یا سازمان‌های مربوطه است. همچنین با بررسی و مصاحبه های انجام شده در سازمان مدیریت پسماند شهر بوشهر مشخص گردید که جمع‌آوری پسماندهای شهر بوشهر به صورت سنتی انجام می‌شود که معمولا اتلاف زمان، تجهیزات و نیروی انسانی به چشم می‌خورد که هزینه های بسیاری را به بدنه مدیریت شهری تحمیل می‌کند .

بررسی ادبیات نظری پژوهش و همچنین انجام مصاحبه با خبرگان حوزه پسماند در شهرداری بندر بوشهر نشان داد که از جمله ضعف‌ها ،چالش‌ها و مشکلات موجود در بخش جمع-آوری پسماند در شهر بوشهر عدم مشارکت مردمی، نارسایی و عدم رعایت مسائل بهداشتی، مشکلات موجود در بخش مهندسی عملیات حمل و انتقال، جایگاه‌های موقت و انبارهای عمومی زباله در سطوح شهری، نامناسب بودن جاده‌های حمل و نقل، عدم وجود سیستم نظارتی مستمر و منسجم مواد و مدیریت جمع‌آوری، عدم وجود آموزش و آگاهی همگانی و تخصصی در خصوص مسایل مرتبط با جمع‌آوری به منظور کاهش پیامدهای نامطلوب و کاهش بهره‌وری سیستم مدیریت مواد زاید، کمبودهای موجود شهرداری‌ها و عدم وجود توان جهت تامین ماشین آلات جدید و تجهیزات، عدم وجود نیروی انسانی آموزش دیده در سیستم جمع‌آوری پسماند شهری شهر بوشهر متناسب با رشد و شهرنشینی، کمبود بودجه شهرداری، بالا بودن هزینه‌های جمع آوری و انتقال پسماند، عدم وجود نظارت بر جمع‌آوری و حمل و پردازش سریع تر پسماندها در تمام نقاط شهر بوشهر و ساعات شبانه روز، ساماندهی و استحصال نخاله‌های مازاد ساختمانی می‌باشد.

این مورد یک مسئله کلیدی در مدیریت پسماند شهری می-باشد که همچنان حل نشده باقی مانده است. همچنین با توجه به مطالعه ادبیات نظری و پیشنه پژوهش‌های انجام شده در حوزه مدیریت پسماند می‌توان بیان داشت که برای برنامه‌ریزی مناسب و بهینه در این حوزه بایستی موضوع مکانیابی[1] و پهنه-

بندی سطح شهر، تخصیص ایستگاه‌های و تأسیسات مورد نیاز جهت جمع‌آوری و بازیافت زباله در سطح شهر و همچنین ارائه راه‌کارهایی جهت حداقل کردن هزینه‌های حمل و نقل مورد توجه قرار داد.

براساس مطالب ذکر شده اهمیت سیستم بهینه جمع‌آوری زباله بیش از پیش مشخص می‌شود. بنابراین انتخاب سیاست بهینه جمع آوری زباله نقش مهمی در کاهش هزینه‌ها دارد. مدلسازی مسائل مسیریابی به منظور جمع آوری زباله های شهری در دو دسته مختلف تقسیم بندی می شوند: ۱) در دسته نخست یک سری گره (نقطه) از قبل مشخص وجود دارد و هدف پیدا کردن بهترین تورهایی است که از تمامی گره ها عبور نماید و ۲) در دسته دوم یک سری یال های تعریف شده در شبکه دارای تقاضا هستند و هدف یافتن بهترین تورهایی است که از تمامی یال های دارای تقاضا عبور نمایند. جمع آوری زباله های خانگی در دسته دوم جای دارد. در مسأله جمع آوری زباله های خانگی زباله ها در طول یال ها قرار دارند (یال ها همان خیابان یا کوچه ها هستند که تقاضا در طول آنها قرار دارد). علاوه بر آن، ظرفیت وسایل نقلیه محدود است، و هنگامی‌که از یک یال به یال دیگر می روند از ظرفیت آن ها کاسته می شود. در این پژوهش علاوه بر اتخاذ تصمیم‌گیری های بهینه مسیریابی، تصمیم‌گیری‌های مکانیابی مخازن زباله توسط وسایل نقلیه جمع آوری زباله به صورت در نظر گرفتن نقاط کاندید در شبکه گراف در هر دوره زمانی نیز مطرح می-شود.

همچنین باید بیان گردد که 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. البته عدم قطعیت این داده‌ها نمی‌تواند ناشی از وجه تصادفی حاکم بر رویدادها تلقی شود. برای چنین شرایط که با عدم قطعیت معرفتی و کمبود دانش روبرو هستیم، استفاده از رویکرد بهینه‌سازی استوار فازی رویکرد محاسباتی مناسب برای مدیریت عدم قطعیت است. از اینرو در این پژوهش، محقق بر آن است تا با بهره‌گیری از مفاهیم برنامه-ریزی استوار و همچنین رویکرد فازی شهودی اقدام به ارائه مدلی جهت مکانیابی - مسیریابی تسهیلات انتقال پسماند با هدف کاهش تعداد مکان‌های فعال جهت جمع آوری پسماندهای تولید شده توسط همه شهروندان در سطح شهر ارائه دهد به گونه‌ای که ضمن حفظ منافع سازمان، بتوان پیامدهای زیست محیطی را نیز کاهش داد.

۲. ادبیات نظری و پیشینه تحقیق

از آغاز تمدن بشری یکی از چالش‌های مردمان، چگونگی دفع زباله و پسماند بوده است. امروزه با گسترش شهرنشینی و افزایش انواع گوناگون زباله و پسماند، دفع صحیح و اصولی پسماندهای حاصل از زندگی روزمره و فعالیت‌های گوناگون شهروندان یکی از چالش‌های مهم و جدی "مدیریت شهری" در همه جوامع و کشورها می‌باشد. با روند سریع شهرنشینی و بهبود سطح مصرف ساکنان، مواد زاید بیشتری در شهرها و روستاها تولید شده است. حالت سنتی دفع مواد زائد دیگر نمی‌تواند از شرایط جدید پیروی کند و به حفاظت از محیط زیست و حفاظت از انرژی و غیره بپردازد.

به طور کلی انواع پسماندها به ۵ نوع تقسیم بندی می‌گردد: (۱) پسماندهای عادی: به پسماندهایی گفته می‌شود که به صورت معمول از فعالیت‌های روزمره انسان‌ها در شهرها، روستاها و خارج از آنها تولید می‌شود. از قبیل زباله‌های خانگی و نخاله‌های ساختمانی. (۲) پسماندهای پزشکی: به کلیه پسماندهای عفونی و زیان آور ناشی از بیمارستان‌ها، مراکز بهداشتی، درمانی، آزمایشگاه‌های تخصصی طبی و سایر مراکز مشابه گفته می‌شود. (۳) پسماندهای ویژه: به کلیه پسماندهایی گفته می شود که به دلیل بالا بودن حداقل یکی از خواص خطرناک از قبیل سمی بودن، بیماری زایی، قابلیت انفجار یا اشتعال، خورندگی و مشابه آن به مراقبت ویژه نیاز داشته باشد. (٤) پسماندهای کشاورزی: به پسماندهای ناشی از فعالیت‌های

تولیدی در بخش کشاورزی گفته می‌شود از قبیل فضولات، لاشه حیوانات، محصولات کشاورزی فاسد یا غیر قابل مصرف. (۵) پسماندهای صنعتی: به کلیه پسماندهای ناشی از فعالیت‌های صنعتی و معدنی، پسماندهای پالایشگاهی، صنایع گاز، نفت و پتروشیمی و نیروگاهی و امثال آن گفته می‌شود از قبیل براده‌ها، سرریزها و لجن‌های صنعتی.

سیستم مدیریت پسماند[۲] از شش مرحله اصلی تولید پسماند، ذخیره سازی، جمع‌آوری، حمل و نقل، بازیافت و دفع تشکیل شده است. در حال حاضر بخش اعظم منابع مالی و انسانی صرف جمع¬آوری و حمل و نقل می‌شود. جمع‌آوری و حمل پسماند بنا بر ضرورت و امکانات به شیوه‌های متفاوتی انجام می‌گیرد که شیوه استفاده از ایستگاه انتقال پسماند از رایج‌ترین شیوه‌ها درکشور هاست. ایستگاه‌های انتقال بخش مهمی از سیستم‌های مدرن مدیریت مواد زاید هستند. جوامعی به ایستگاه انتقال نیاز دارند که فاصله بین مکان جمع‌آوری زباله تا محل دفن یا کارخانجات تبدیل زباله زیاد باشد. پس ایستگاه انتقال یک مرکز واقع در نزدیکی مناطق مسکونی است که زباله تا زمانی که به طور موقت به محل‌های دفن، مراکز پردازش، و یا امکانات کمپوست حمل و نقل شود را دریافت و نگهداری می‌کند.

ایستگاه‌های انتقال برای انتقال مواد زاید از وسایل نقلیه کوچک به وسایل نقلیه بزرگتر استفاده می‌کند که با توجه به روش‌های بارگیری، ایستگاه‌های انتقال به سه دسته تقسیم می‌شوند: ۱- بارگیری مستقیم،۲- ذخیره، ۳- ترکیبی از بارگیری مستقیم و ذخیره. هدف اصلی از اجرای یک ایستگاه انتقال کمک به بهبود عملیات جمع‌آوری، حمل و دفع مناسب زباله است. ایستگاه انتقال زباله، آلودگی جدی زیست محیطی مرتبط با انباشت زباله، و اجتناب از نشت در طول حمل و نقل را کاهش می دهد. علاوه بر موارد فوق از دیگر مزایای ایستگاه انتقال عبارتند از: کاهش هزینه‌های حمل و نقل، کاهش ترافیک کامیون‌ها، کاهش آلودگی هوا، کاهش مصرف سوخت و کاهش استهلاک جاده‌ها بوسیله ادغام کردن زباله‌ها و حمل آنها با تعداد وسایل نقلیه کمتر است. اما به طور کلی می‌توان گفت این ایستگاه‌ها به منظور کاهش هزینه و بهبود وضعیت انتقال پسماند به محل دفع می‌باشند.

ایستگاه‌های انتقال چنانچه به خوبی مکان‌یابی شده باشند از جنبه‌های بهداشتی و اقتصادی بسیار موثرند. مکانیابی آنها باید بر اساس ملاحظات انسانی بهداشتی، زیست محیطی، فنی و مدیریتی باشد. پس انتخاب مکان مناسب برای سایت ایستگاه نیاز به مطالعات دقیق و موشکافانه دارد تا از گسترش نابسامانی‌ها و تهدیدها به ویژه از جنبه زیست محیطی و اقتصادی ممانعت گردد.

از آنجا که فعالیت‌های جمع‌آوری و حمل و نقل زباله بیشترین سهم بودجه مدیریت پسماند شهرداری‌ها را به خود اختصاص می‌دهد، طراحی و ارزیابی مطلوب سیستم مدیریت پسماند منجر به حفظ و ذخیره بودجه کل شهرداری‌ها می‌شود. همچنین جمع‌آوری زباله‌های ذخیره شده در امتداد خیابان یا کوچه‌ها در اسرع وقت از اهمیت بالایی برخوردار است، و این به تأمین پرسنل مورد نیاز، وسایل نقلیه، برنامه‌ریزی دقیق و سایر منابع مرتبط با توجه به مطالب فوق ، اهمیت و استفاده از مشکلات مسیریابی در زباله‌های شهری را نشان می‌دهد.

همچنین در مسأله جمع‌آوری زباله از ایستگاه های انتقال، دو موضوع اساسی وجود دارد: (۱) مسأله مسیریابی وسایل نقلیه . در این دسته به جمع آوری زباله‌های تجاری مانند زباله‌های رستوران و سازمان‌ها، که در ظروف بزرگ ذخیره می شوند (که به عنوان گره تقاضا در نظر گرفته می شوند) توسط وسایل نقلیه پرداخته می‌شود. (۲) مسأله مسیریابی کمان. در این دسته می توان به جمع‌آوری زباله‌های خانگی به گونه‌ای که زباله‌ها در سطل‌ها و یا کیسه‌های زباله‌ای که آنها را می‌توان در امتداد خیابان‌ها یا کوچه‌ها به عنوان یک شاخه دید، پرداخته می شود. در این مسأله، شناسایی محل دقیق یک نقطه تقاضا لازم نیست. بطور کلی هدف اصلی این دو دسته مسأله یکسان است و برای

به حداقل رساندن کل هزینه عبور وسایل نقلیه مدلسازی می گردد.

بطور کلی، فرآیند مدیریت پسماندهای شهری است یکی از اساسی‌ترین فعالیت‌های هر شهر به شمار می‌رود. از اینرو نادیده گرفتن اهمیت این مسأله می‌تواند برای ساکنان شهر مشکل ساز باشد. از این رو، سازمان‌هایی مانند شهرداری‌ها ایستگاه‌ها و امکانات جمع‌آوری زباله را در مناطق مختلف شهری به منظور ارائه خدمات سریع و کم شدن میزان آلودگی تخصیص داده‌اند با این حال، مطالعه این موضوع به عنوان یک مسأله مکانیابی – تخصیص تسهیلات و امکانات می باشد که با در نظر گرفتن ماهیت نامشخص زباله‌های تولید شده از نظر هزینه یا خدمات به موقع از اهمیت بالایی برخوردار است. از سوی دیگر با افزایش حجم پسماندهای تولید شده در شهر توسط جمعیت شهرنشین و صنایع موجود در آن، و همچنین وجود حیوانات و جوندگان مختلف، عدم جمع آوری به موقع پسماند می تواند باعث مشکلات فراوانی مانند آلودگی و شیوع بیماری های واگیردار شود. از اینرو جمع آوری به موقع پسماندها می تواند باعث کاهش اثرات آلودگی در سطح شهر شود، که یکی از راه حل‌های مناسب تخصیص امکانات مورد نیاز جمع‌آوری زباله به هر بخش از سطح شهر می‌باشد.

با توجه به نکات ذکر شده در بالا، برخی اختلاف نظرها از نظر نحوه مکانیابی و روش استقرار و تخصیص امکانات مورد نیاز برای جمع آوری زباله وجود دارد، که در صورت نادیدیه گرفتن می تواند مشکلات بزرگی را برای جمعیت شهری ایجاد کند. به عنوان یک بحث مهم در مورد این مسأله، می‌توان چندین مکان نامزد برای ایجاد تسهیلات دائمی یا مراکز موقت در مناطق مختلف شهر برای جمع‌آوری زباله در نظر گرفت و به آن نقاط تخصیص داد. در این حالت هر یک از این امکانات دارای مجموعه ظرفیت‌های مختلف، هزینه ایجاد و تأسیس متفاوت و همچنین میزان انتشار آلودگی مختلفی با هم دارند. از اینرو در این مسأله، یک تصمیم بهینه می تواند شامل تعیین نوع، تعداد و مکان تأسیسات هر منطقه برای پوشش کل زباله-های تولید شده در هر دوره زمانی است. این امکانات همچنین در تعداد تأسیسات از نوع دائمی یا موقتی با محدودیت‌هایی روبرو هستند.

جمع‌آوری زباله‌های شهری یکی از فرایندهای اصلی در شهرداری‌ها با هزینه‌های کلان و عملیات پر زحمت به شمار می‌آید. بین موضوعات مهمی که در این زمینه مطرح می‌شود، عدم آگاهی از میزان دقیق زباله‌های تولید شده، باعث ایجاد مشکل در فرآیندهای جمع‌آوری، حمل و نقل و دفع می‌شود. برای این منظور، بررسی مسئله جمع‌آوری زباله در شرایط عدم قطعیت می تواند نقش اساسی در فرآیند تصمیم‌گیری مدیران داشته باشد. از اینرو می‌توان بیان داشت که یکی چالش‌های بزرگی که این سازمان‌ها با آن مواجه هستند عدم اطمینان در میزان پسماند جمع‌آوری شده در هر نقطه از شهر و در نهایت اختصاص آن به محل‌های پردازش و بازیافت بالقوه است که در ابتدای افق برنامه‌ریزی ایجاد شده‌اند.

یکی از موفق ترین مطالعات درباره جایگاه جمع آوری پسماند توسط لادلما و همکاران انجام گردید. در این پژوهش مدلی به منظور مکانیابی جایگاه تصفیه پسماند با در نظر گرفتن انواع معیار و متغیرهای تصادفی و همچنین تکنیک های تصمیم گیری چند معیاره ارائه گردید. یسلانکار و همکارانش پژوهشی به منظور مکانیابی و انتخاب مکان مناسب جهت دفع ضایعات خطرناک با استفاده از معیارهای زمین شناسی، توپوگرافی و معیارهای کاربردی انجام دادند (یسلانکار و ستین، ۲۰۰۵). چانگ و همکاران از تصمیم گیری چند معیاره و همچنین رویکرد سیستم اطلاعات جغرافیایی برای مسأله مکانیابی محل دفن زباله در جنوب تگزاس انجام دادند. ارکات و همکاران برای مسأله مکان یابی و تخصیص آن در مناطق شهری برای مدیریت پسماند جامد از روش عدد صحیح مختلط استفاده نمودند.

لی و همکاران از روش برنامه ریزی درجه دوم استوار برای مدیریت پسماند شهری در شرایط عدم اطمینان استفاده نمودند. هدف این پژوهش کمک به تصمیم گیری بهینه درباره امکانات جمع آوری، یافتن کوتاهترین مسیر برای جمع آوری زباله در سطح شهر می باشد. همچنین یک روش ترکیبی از تکنیک های تصمیم گیری چند معیاره و تحلیل پوششی داده ها توسط خدیوی و همکاران با توجه به جنبه های محیط زیستی ارائه گردید.

همچنین غیانی و همکاران از روش برنامه ریزی عدد صحیح برای مکانیابی مراکز جمع آوری زباله در سطح شهر استفاده نمودند. این پژوهشگر در مطالعه دیگری به میزان اثربخشی مکانیابی مراکز بازیافت زباله با رویکرد طبقه بندی مناطق مختلف شهری پرداخت که در نتیجه این مطالعه سازگاری انواع مختلف سطل های زباله به مراکز تخصیص داده شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که بعد از اجرای مدل پیشنهادی می توان به میزان ۲۵ درصد از کل مسافت طی شده برای جمع آوری زباله کاهش داد.

وانگ و همکاران از یک مدل سلسله مراتبی و تحت شرایط عدم اطمینان برای طراحی شبکه لجستیک معکوس برای جمع آوری زباله استفاده نمودند. بر اساس مدل پیشنهادی آنان می توان از دو نوع مدل برنامه ریزی تصادفی برای به حداقل رساندن هزینه مورد انتظار بر اساس معیارهای تصمیم گیری استفاده نمود. اسلت و ماریانوف مدلهای مختلف مکان یابی برای جمع آوری زباله های جامد را مورد بررسی قرار دادند. آنها در مطالعه خود انواع مدل های تصمیم گیری را برای چهار دهه مورد بازنگری قرار دادند. چاهان و همکاران از روش تصمیم گیری چند معیاره فازی برای انتخاب مکان برای دفع زباله های بهداشتی استفاده نمودند. بر اساس این پژوهش پیشنهاد گردید که از رویکردهای مورد مطالعه می توان برای طراحی سیستم کنترل آلودگی و بهداشت در مراکز دفع پسماند استفاده نمود.

یاداو و همکاران مدلی ریاضی را برای مکانیابی جمع‌اوری زباله در شرایط عدم اطمینان توسعه دادند. آنها در این پژوهش پارامترهایی مانند میزان تولید زباله، هزینه عملیاتی امکانات جمع آوری زباله، هزینه حمل و نقل و میزان درآمدها را با استفاده از اعداد فازی مورد بررسی قرار دادند. همچنین در مطالعه‌ای دیگر که توسط این پژوهشگران انجام شد، از روش برنامه‌ریزی خطی فازی برای ارزیابی سیستم مدیریت جمع-آوری پسماند در شرایط عدم اطمینان دوره‌ای بهره گرفته شد.

در پژوهشی دیگر که توسط مانیب و همکاران انجام شد، از مدل برنامه‌ریزی فازی دو سطحی برای سیتسم جمع‌آوری زباله با توجه به هزینه‌های موجود در فرایند جمع‌آوری زباله در سطح شهر استفاده گردید. تمرکز این پژوهش بر روی برنامه-ریزی 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. حبیب و همکاران به طراحی سیستم جامع مدیریت پسماند در محیط عدم اطمبنان 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.

سارما و راثور از یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح برای مسأله مکانیابی ایستگاه های 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 ایستگاه های 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 هزینه های 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: جمع اوری زباله از ایستگاه‌ها بدون در نظر گرفتن تفکیک انواع آن، سناریو دوم: جمع‌آوری زباله از ایستگاه و تفکیک انواع زباله در ایستگاه انتقال. همچنین گامبلا و همکاران از مدل برنامه‌ریزی تصادفی برای تخصیص جریان مواد پسماند در مسأله مدیریت پسماند جامد استفاده نمودند. آنها در پژوهش خود از محدودیت‌های واقعی که اپراتورهای جمع آوری زباله با انها روبرو هستند استفاده کردند. در نهایت آنها مدل پیشنهادی خود را با طراحی سناریوهای مختلف در زمینه تولید زباله مورد آزمایش قرار دادند.

جدول ۱. خلاصه پژوهش های انجام شده

منابع		لادما و همکاران (۲۰۰۲)	ارکات و همکاران (۲۰۰۲)	خدیوی و همکاران (۲۰۱۲)	جیانی و همکاران (۲۰۱٤)	وانگ و یانگ (۲۰۱٤)	چاهان و همکاران (۲۰۱٦)	یاداو و همکاران (۲۰۱۸)	مانیب و همکاران (۲۰۱۸)	سارما و همکاران (۲۰۱۹)	گامبلا و همکاران (۲۰۱۹)
نوع مسأله	مکانیابی	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	تخصیص		✓		✓	✓			✓	✓	✓
وضعیت	قطعی		✓	✓	✓					✓	
	عدم اطمینان	✓				✓	✓	✓	✓		✓
نوع تابع هدف	اقتصادی	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
	اجتماعی	✓		✓			✓				
	محیط زیست	✓	✓	✓			✓				
تکنیک حل		برنامه ریزی عدد صحیح مختلط،	استفاده از تحلیل چند معیاره تصادفی	رویکرد حداقل سازی لکسیکوگراف	فرایند تحلیل شبکه و تحلیل پوششی داده ها	رویکردهای فراابتکاری و عدد صحیح مختلط	تکنیک چند معیاره فازی	الگوریتم های فراابتکاری	برنامه ریزی آرمانی فازی	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط، استفاده از نرم افزار ARCGIS و CPLEX	برنامه ریزی عدد صحیح مختلط و حل با استفاده از نرم افزار CPLEX

۳. بیان مسأله و مدل پژوهش

مسأله پیشنهادی یک مدل برنامه‌ریزی استوار برای مکانیابی تسهیلات بالقوه 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 مختلف می‌باشد. 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 زباله. 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.

یکی از مسأله های این پژوهش شامل بدست آوردن تعداد بهینه وسایل نقلیه و تورهای بهینه هر یک از آن ها، با توجه به کمینه سازی تابع هدف کل شامل هزینه بکارگیری وسایل نقلیه، هزینه عبور از یال های شبکه و هزینه راه اندازی سکوهای میانی جهت تخلیه بار وسایل نقلیه، است. بدین صورت که وسایل نقلیه در قرارگاه (گره شماره۱) قرار دارند، و سفر خود را جهت سرویس دهی به یال های دارای تقاضا، آغاز می کنند و پس از پر شدن ظرفیت آن ها به محل سکوی تخلیه منتخب (مجموعه گره های بالقوه و کاندید برای راه اندازی موقت سکوهای تخلیه میانی و مخازن زباله) می روند تا ظرفیت خود را صفر کنند و دوباره در صورت زمان کافی سفر خود را از سکوی تخلیه آغاز کنند و به محل عملیاتی باز گردند. علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، محدودیت زمانی هر یک از وسایل نقلیه نیز اهمیت دارد؛ هنگامیکه زمان باقیمانده وسایل نقلیه صفر شود به ناچار باید به سکوی تخلیه بازگردند و پس از خالی کردن بار خود، در نهایت به قرارگاه بازگردند.

در گام بعد 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: (۱) یک کلانشهر به مناطق مختلف تقسیم می‌شود. این مناطق باید به گونه‌ای باشد که در مجموع زباله‌های جمع آوری شده در هر یک از آنها از حد ظرفیت تجهیزات مربوطه که در آن نقطه فعالیت می کنند؛ تجاوز نمی کند. (۲) باید یک افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شود. (۳) هر منطقه شامل گره‌های تقاضای از پیش تعریف شده است، به گونه‌ای که ارزش تقاضا در هر دوره متفاوت است. (٤) 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. (۵) تابع هدف مدل ارائه شده علاوه بر کمینه سازی هزینه عبور از یال ها، شامل کمینه سازی تعداد ناوگان حمل و تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز جهت برآوردن کل تقاضا و هزینه بکارگیری سکوی تخلیه میانی موردنیاز است. (٦) وسایل نقلیه ناهمگن می باشند و شبکه گراف نامتقارن است. (۷) شکست جمع آوری وجود ندارد، یعنی هر یال باید یکبار وتوسط یک وسیله نقلیه سرویس داده شود. (۸) هر وسیله نقلیه دارای حداکثر زمان به خدمت گرفتن است. (۹) زمان و هزینه طی کردن یک مسیر در بین تمامی وسایل نقلیه یکسان است.

- مجموعه اندیس‌های مدل ریاضی

i منابع تولید پسماند (منازل شهروندان)

j شماره مکان‌های بالقوه جهت جمع‌آوری پسماند ، $j=1,2,...,J$

U انواع مخزن‌های زباله جهت تخصیص به مکان‌های جمع‌آوری

V مجموعه کل گره های شبکه

D مجموعه گره های ایستگاه های میانی و مخازن زباله

K مجموعه وسایل نقلیه

T مجموعه دوره های زمانی به طوریکه T={۱،۲ }

P_k مجموعه سفرهای وسیله نقلیه k ام

E مجموعه کل یال های شبکه

E_R مجموعه کل یال های دارای تقاضای شبکه

S مجموعه ای اختیاری از یال های شبکه

d اندیس های بکار گرفته شده بیانگر گره های شبکه

k اندیس وسایل نقلیه

t اندیس دوره زمانی

p_k اندیس سفر وسیله نقلیه k ام

- پارامترهای مدل ریاضی

Q_u ظرفیت مخزن‌های زباله نوع u بطوریکه $u \in U$ (مقیاس: کیلوگرم)

l_u فاصله بین مخزن‌های زباله نوع u بطوریکه $u \in U$ (مقیاس: متر)

b_u تعداد کل مخزن‌های زباله نوع u جهت تخصیص به مکان-های جمع‌آوری پسماند بطوریکه $u \in U$

q_i میزان تولید روزانه پسماند مربوط به شهروندان بطوریکه $i \in V_1$

L_j فاصله بین مکان های بالقوه جهت جمع آوری پسماند بطوریکه $j \in V_2$

c_{ij} هزینه عبور از یال(I,j)

cv_k هزینه استفاده از وسیله نقلیهk ام

FC_d هزینه راه اندازی ایستگاه ها و مخازن زباله d ام

f_{ij} تقاضای یال (I,j)

W_k ظرفیت وسیله نقلیه k ام

tt_{ij} زمان عبور از یال (I,j)

T_{max} حداکثر زمان در دسترس وسایل نقلیه

Cap_d ظرفیت ایستگاه ها و مخازن d ام

$Mbig$ یک عدد بزرگ اختیاری

- متغیرهای مدل ریاضی

Z_j اگر مکان بالقوه جمع‌آوری پسماند $j \in V_2$ فعال باشد، مقدار یک، در غیر این صورت مقدار صفر به خود اختصاص می‌دهد.

X_{ij} اگر منبع تولید پسماند $i \in V_1$ به مکان جمع‌آوری پسماند $j \in V_2$ تخصیص یابد، مقدار یک، در غیر این صورت مقدار صفر به خود اختصاص می‌دهد.

y_{uj} تعداد کل مخزن‌های زباله نوع $u \in U$ که به هر مکان جمع-آوری $j \in V_2$ تخصیص می‌یابد.

x_{ijpk}^t اگر یال $(i,j) \in E$ توسط وسیله نقلیه k ام در سفر p ام، n بار عبور کند مقدار یک و در غیر اینصورت مقدار صفر به خود اختصاص می دهد.

y_{ijpk}^t اگر یال $(i,j) \in E$ توسط وسیله نقلیه k ام در سفر p ام، سرویس داده شود مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر به خود اختصاص می دهد.

YY_{dt} اگر سکوی d در دوره t به کار گرفته شود مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر به خود اختصاص می دهد.

u_{kt} اگر وسیله نقلیه k در دوره t به کار گرفته شود مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر به خود اختصاص می دهد

- مدل ریاضی پژوهش

$$Min\ z_1 = \sum_{j \in V_2} Z_j \qquad (۱)$$

$$Min\ z_2 = \sum_{(i,j)\in E} \sum_{p_k \in P_k} \sum_{t=1}^{2} c_{ij} x_{ijpk}^t + \sum_{k \in K} cv_k\, u_{kt} + \sum_{d \in D} \sum_{t=1}^{2} FC_d\, YY_{dt} \qquad (۲)$$

st:

$$\sum_{i \in V_1} q_i X_{ij} \le \sum_{j \in V_2} Q_u y_{uj} \qquad \forall j \in V_2 \qquad (۳)$$

$$\sum_{k \in K} l_u y_{uj} \le L_j Z_j \qquad \forall j \in V_2 \qquad (٤)$$

$$\sum_{j \in U_i} X_{ij} = 1 \qquad \forall\, i \in V_1 \qquad (٥)$$

$$\sum_{j \in V_2} y_{uj} \le b_u \qquad \forall u \in U \qquad (٦)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ijpk}^t = \sum_{j=1}^{n} x_{jipk}^t \quad \forall i \in V \setminus \{1, D\} \qquad (٧)$$

$$\sum_{p_k \epsilon P_k} \sum_{t=1}^{2} \left(y_{ijpk}^t + y_{ijpk}^t\right) = 1 \quad \forall (i,j) or\ (j,i) \in E_R \qquad (٨)$$

$$\sum_{(i,j)\in E_R} f_{ij} y^t_{ijpk} \le W_k \quad \forall k \in K\,, \forall p_k = 1,2,..,P_k \qquad (۹)$$

$$y^t_{ijpk} \le x^t_{ijpk} \quad \forall k \in K\,, \forall p_k = 1,2,..,P_k \qquad (۱۰)$$

$$\sum_{p_k \epsilon P_k} \sum_{(i,j)\in E} x^t_{ijpk} \le Mbig\ u_{kt} \quad \forall k \in K\,, \forall t \in \{1,2\} \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{p_k \epsilon P_k} \sum_{(i,j)\in E} tt_{ij} x^t_{ijpk} \le T_{max} \quad \forall k \in K\,, \forall t \in \{1,2\} \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{i\in V\setminus\{1,D\}} \sum_{p_k \epsilon P_k} x^t_{ijpk} \le Mbig\ YY_{dt} \quad \forall k \in K\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{(i,j)\in E_R} \sum_{p_k \epsilon P_k} \sum_{k\in K} q_{ij} y^t_{ijpk} \le Cap_d\, YY_{dt} \quad \forall t \in \{1,2\}\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱٤)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x^t_{1jpk} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱۵)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x^t_{jdpk} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x^t_{djpk} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{2,D\}} x^t_{jdpk} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}\,, \forall d \in \{D\} \qquad (۱۸)$$

$$\sum_{(j,h)\in S} x^t_{jhpk} = \text{Mbig} \sum_{i\notin V[S]} \sum_{j\in V[S]} x^t_{ijpk} \quad \forall S \subseteq V,\ \forall t \in \{1,2\} \qquad (۱۹)$$

$$x^t_{ijpk} \in Z^+; y^t_{ijpk}, YY_{dt}, u_{kt} \in \{0,1\} \qquad (۲۰)$$

$$Z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in V_2 \qquad (۲۱)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in V_1\ ,\ \forall j \in V_2 \qquad (۲۲)$$

$$y_{Uj} \ge 0\,, integer \quad \forall j \in V_2\ , \quad \forall k \in K \qquad (۲۳)$$

۳-۱ تابع هدف

تابع هدف اول (۱) مدل بهینه‌سازی فوق به دنبال حداقل رساندن تعداد مکان‌های لازم جهت جمع‌آوری پسماند در بین مجموعه مکان‌های نامزدها می باشد. استفاده از چنین تابع هدفی نه تنها موجب کاهش انتخاب مکان‌های جمع‌آوری می‌شود، بلکه کاهش هزینه کلی مربوط به مرحله جمع‌آوری را نیز تضمین می‌کند. علاوه بر این، مدل این پژوهش به دنبال تخصیص بهینه شهروندان به سایت‌های جمع‌آوری می باشد. همچنین این مدل انواع مخزن‌های مورد نیاز جهت تخصیص به مکان های جمع آوری به گونه ای که کل تقاضای منطقه برآورده شود. مخزن‌های زباله اختصاص داده شده به این سایت‌ها ممکن است از انواع مختلف، با دارا بودن فواصل مختلف از منازل شهروندان و حتی ظرفیت‌های مختلف باشد. درنهایت، هریک از شهروندان توسط یک سایت جمع‌آوری پسماند خدمت دریافت می‌کند که فاصله منزل آن تا مکان جمع‌آوری کمترین مسافت را داشته باشد.

همچنین تابع هدف (2) دارای سه قسمت به ترتیب شامل کمینه کردن هزینه عبور از یال (i, j) توسط وسیله نقلیه K ام، کمینه کردن هزینه بکارگیری وسیله نقلیه k ام و هزینه راه اندازی ایستگاه های میانی d ام در دوره t است.

۳-۲ محدودیت‌های مدل ریاضی

از نظر مدلسازی ریاضی می‌توان این مسأله را بر اساس یک گراف بیان نمود. در این حالت گراف $G(V_1 \cup V_2, A)$ را تعریف می‌کنیم. در این گراف بردار V_1 نشان دهنده منابع تولید پسماند (مانند شهروندان) و همچنین بردار V_2 در برگیرنده مکان‌های بالقوه برای جمع‌آوری پسماند شهری می‌باشد. به عبارت دیگر در این مسأله بردار V_1 خوشه‌ای از شهروندان را نشان می‌دهد که براساس موقعیت خاصی گروه‌بندی شده‌اند. به عبارت دیگر یک خوشه ممکن است شامل تمام شهروندان ساکن در یک خیابان و حتی بخشی از آن خیابان باشند که می‌توان آنها را به عنوان نقطه‌ای جهت تولید پسماند در نظر گرفت. بنابراین با در نظر گرفتن این فرض مجموعه شاخه‌ها عبارتست از $A = V_1 \times V_2$ که نشان دهنده جریان تولید پسماند از منازل شهروندان تا مکان‌های بالقوه جهت جمع‌آوری ان می‌باشد. از این می توان به هر شاخه یک مشخصه ثابت d_{ij} نسبت داد که نشان دهنده فاصله بین منازل شهروندان $(i \in V_1)$ تا مکان‌های جمع‌آوری پسماند $(j \in V_2)$ را نشان می‌دهد.

محدودیت اول (۳) و محدودیت دوم (٤) نشان دهنده محدودیت ظرفیت و همچنین روابط منطقی بین متغیرهای

مسأله را بیان می‌کند. به طور مشخص محدودیت اول (۳) نشان می‌دهد که کل پسماند تولید شده بایستی حداکثر به اندازه ظرفیت انواع مخزن‌های اختصاص یافته به هر مکان جمع‌آوری پسماند باشد. محدودیت دوم (٤) مانع از این می‌شود که هر مکان بالقوه جمع‌آوری پسماند، مخزن‌هایی بیشتر از ظرفیت خود از نظر فاصله تخصیص یابد. محدودیت سوم (٥) هر مرکز تولید پسماند (منازل شهروندان) را یک مکان فعال جهت جمع‌آوری پسماند که در فاصله آستانه d_{ij} تخصیص می‌دهد. محدودیت چهارم (٦) به دنبال تخصیص انواع مخزن‌های جمع‌آوری پسماند به هر مرکز فعال می‌باشد.

محدودیت پنجم (۷) بیانگر روابط موازنه جریان برای هر وسیله نقلیه است. محدودیت ششم (۸) تضمین می‌کند که هر یال دارای تقاضا سرویس داده می‌شود. محدودیت هفتم (۹) بیانگر محدودیت ظرفیت وسیله نقلیه k ام است. محدودیت هشتم (۱۰) بیانگر آن است که یال دارای تقاضا توسط وسیله نقلیه‌ای که از آن عبور کرده است، سرویس داده می‌شود (وسیله نقلیه ممکن است از یالی عبور کند ولی سرویس ندهد). محدودیت نهم (۱۱) تضمین می کند که از وسیله نقلیه k ام در دوره زمانی t وقتی استفاده می‌شود که هزینه آن پرداخت شود. محدودیت دهم (۱۲) نشان‌دهنده محدودیت زمانی هر وسیله نقلیه است. محدودیت یازدهم (۱۳) بیانگر آن است که از ایستگاه تخلیه میانی d ام در دوره زمانیt ام استفاده می‌شود که راه اندازی شده باشد. محدودیت دوازدهم (١٤) بیانگر محدودیت ظرفیت ایستگاه تخلیه میانی d ام است. محدودیت-های سیزدهم و چهاردهم (۱۵ و ١٦) تضمین میکند که سفر اول وسیله نقلیه از قرارگاه شروع شوند و به ایستگاه تخلیه ختم می‌شود. محدودیت‌های پانزدهم و شانزدهم (۱۷ و ۱۸) تضمین می‌کنند که سفرهای دوم به بعد وسایل نقلیه در صورت وجود از ایستگاه تخلیه آغاز و به سکوی تخلیه ختم می‌شوند. محدودیت هفدهم (۱۹) تضمین میکند که هیچ زیرتوری تشکیل نمی‌شود. همچنین محدودیت های هجدهم تا آخر (۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳) نشان دهنده دامنه تغییرات متغیرهای مسأله می باشد.

٤. مواد و روش‌های پژوهش

هدف این پژوهش یافتن حداقل تعداد مخازن موردنیاز جهت جمع آوری پسماند در سطح شهر و همچنین کمینه کردن هزینه‌های مسیر می‌باشد. برای یافتن تعداد حداقل مخازن مورد نیاز از رویکرد استوار فازی شهودی جهت مدلسازی مسأله پژوهش استفاده شده است. همچنین برای حل مدل پژوهش از الگوریتم ژنتیک چند هدفه بهره برده شده است.

٤-۱ رویکرد استوار برتسیمس و سیم

مدل بهینه‌سازی را در حالت کلی می توان به شکل زیر نوشت:

$$max\{c^T x + d: Ax \leq b\} \qquad (٢٤)$$

که در آن x بردار سطری و c^T یک بردار ستونی به عنوان ضرایب تابع هدف می باشد. A به عنوان ماتریس ضرایب محدودیت ها و b بردار اعداد سمت راست محدودیت ها هستند. در این مدل کلیه پارامترها قطعی فرض می شود. بنابراین در صورتی که مقدار این پارامترها با داده های اسمی آن تفاوت داشته باشد کیفیت و شدنی بودن مسئله تحت تأثیر قرار می گیرد و جواب بهینه ای که با این داده های اسمی به دست آمده است ممکن اسن دیگر بهینه وحتی شدنی نباشد. پس ضروری است از رویکردهایی استفاده کنیم که جواب مسئله را 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 داده های غیر قطعی باشد. با فرض اینکه هرکدام از ضرایب a_{ij} به صورت یک متغیر تصادفی مستقل با توزیع متقارن و کراندار $\tilde{a}_{ij}$ مدل می شود و در بازه $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}\, , a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ مقدار می گیرد که a_{ij} و $\hat{a}_{ij}$ به ترتیب مقدار اسمی و حداکثر انحراف از مقدار

اسمی را نشان می دهد. همچنین J_i را مجموعه پارامترهای نادقیق در محدودیت i ام در نظر بگیرید.

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

$$Max\ Z = \sum_{j=1}^{n} c_j x_j \qquad (۲۵)$$

$$st: \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j + z_i\Gamma_i + \sum_{j=1}^{n} p_{ij} \le b_i \qquad \forall i = 1, \dots, m \qquad (۲۶)$$

$$z_i + p_{ij} \ge \hat{a}_{ij} y_i \qquad \forall i = 1, \dots, m\ ,j = 1, \dots, n \qquad (۲۷)$$

$$-y_j \le x_j \le y_j \qquad \forall j = 1, \dots, n \qquad (۲۸)$$

$$x_j, y_j \ge 0 \qquad \forall j = 1, \dots, n \qquad (۲۹)$$

$$z_i \ge 0 \qquad \forall i = 1, \dots, m \qquad (۳۰)$$

$$p_{ij} \ge 0 \qquad \forall i = 1, \dots, m\ , j = 1, \dots, n \qquad (۳۱)$$

٤-۲ 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 (۲۰۱۲) تعمیمی از مجموعه‌های فازی را به نام مجموعه‌های فازی شهودی [3]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 $f_A: U \to [0,1] * [0,1]$ به طوریکه $f_A(u) = (\mu_A(u), v_A(u))$ و $0 \le \mu_A(u), v_A(u) \le 1$ برای هر $u \in U$ نظیر می‌کنیم. در گام اول عبارت های کلامی فازی شهودی باید مشخص گردد.

جدول ۲. عبارت های کلامی و اعداد فازی تخصیص یافته به آنها

عبارت کلامی	$IFN'(\mu, V)$
بسیار کم(VL)	(۰/۱و۰/۹)
کم(L)	(۰/۱۵و۰/۲۵)
کمتر از متوسط(ML)	(۰/۲۵و۰/۳۵)
متوسط(M)	(۰/۵و۰/٤)
بیشتر از متوسط(MH)	(۰/۵۵و۰/۲۵)
زیاد(H)	(۰/۸۵و۰/۱)
بسیار زیاد (VH)	(۰/۹و۰/۱)

در گام بعد وزن شهودی اهداف به صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۳۲). در این رابطه IW_r وزن شهودی هدف r، W_{DM_A} وزن تصمیم گیرنده A، $E^r_{DM_A}$ ارزیابی تصمیم گیرنده A از هدف و n تعداد تصمیم گیرندگان را نشان می دهد.

$$IW_r = \sum_{A=1}^{n} (W_{DM_A} \otimes E^r_{DM_A}) \qquad (۳۲)$$

همچنین وزن قطعی نهایی از رابطه ۱۸ بدست می‌آید.

$$FCW_r = \frac{\mu_r + \pi_r(\frac{\mu_r}{\mu_r + v_r})}{\sum_{r=1}^{m} \mu_r + \pi_r(\frac{\mu_r}{\mu_r + v_r})} \qquad (۳۳)$$

$$\sum_{r=1}^{m} FCW_r = 1 \qquad (۳٤)$$

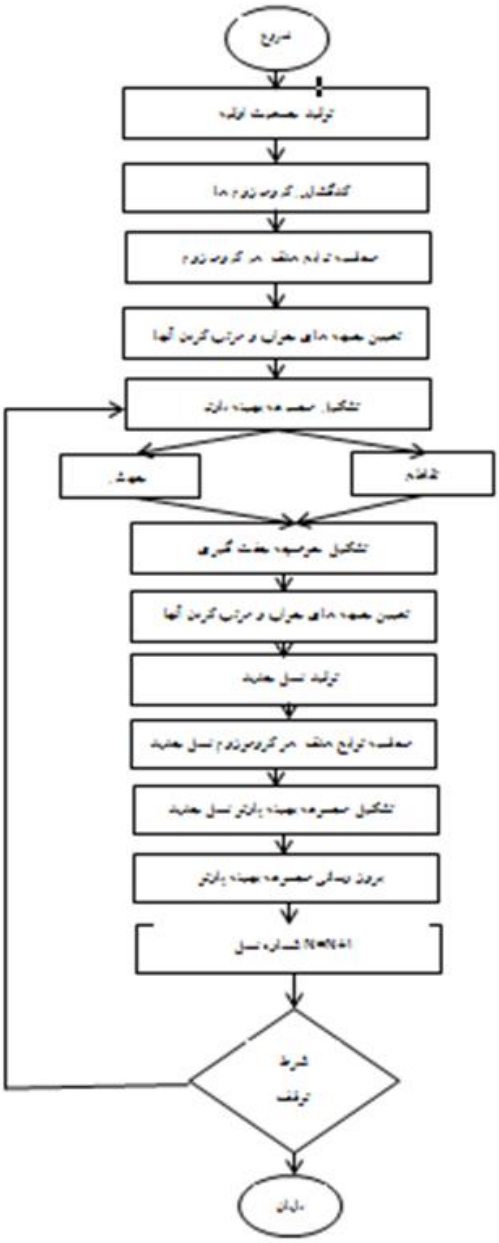
در این پژوهش پنج نفر از متخصصان در ارزیابی اهداف مشارکت داشته‌اند. جدول زیر اهمیت تصمیم گیرنده، ارزیابی تصمیم گیرندگان از اهداف، وزن شهودی و وزن قطعی محاسبه شده است.

جدول ۳. اهمیت تصمیم‌گیرندگان و نتایج ارزیابی توابع هدف

تصمیم‌گیرندگان	DM_1 (VH)	DM_2 (M)	DM_3 (M)	DM_4 (MH)	DM_5 (H)	IW_r	FCW
تابع هدف اول	H	M	H	MH	H	(0/836,0,008)	0/61
تابع هدف دوم	VH	M	L	MH	L	(0/91,0/009)	0/39

٤-٣ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو و بهینه‌سازی براساس اصول تکامل طبیعی است. این روش در دسته الگوریتم‌های بهینه‌سازی که قادر به یافتن جواب‌های بهینه عمومی و یا نزدیک به بهینه قرار دارد. این الگوریتم کاربردهای بسیاری دارد. در مباحث مربوط به مکانیابی، به دلیل ساختار ناقص و پیچیده آن، می‌توان به نحو مطلوبی از از الگوریتم ژنتیک بهره برد. مبنای کاربرد الگوریتم ژنتیک، استفادهاز یک اصل طبیعی به نام برازش یا انتخاب پایداری برترین‌ها یا مناسب‌ترین‌ها است. منظور ار مناسب ترین، افرادی از یک جمعیت است که مناسب‌ترین (نه الزاما بهترین) ویژگی را داشته باشند. در شکل شماره ۱ گام های الگوریتم NSGAII نشان داده شده است.



شکل ۱. مراحل انجام الگوریتم NSGAII

٤-٤ کاربرد مدل استوار فازی

در این قسمت مدل ارائه شده استوار فازی شهودی را برای مکان‌یابی تسهیلات موردنیاز جهت جمع‌آوری پسماند تولید در

سطح شهر بوشهر به کار می‌بریم. یک شهر دارای پسماندهای متفاوتی را از قبیل پسماندهای خانگی، پسماندهای صنعتی، پسماندهای ساختمانی و غیره می‌باشد که بایستی جمع‌آوری گردد. در این پژوهش میزان تولید روزانه پسماند را بعنوان پارامتر استوار در نظر گرفته شده است. از اینرو مدل استوار فازی برتسیمس و سیم زیر برای مسأله این پژوهش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Min\ w = \sum_{j\in V_2} Z_j \qquad (۳۵)$$

$$Min\ z_2 = \sum_{(i,j)\in E}\sum_{p_k\in P_k}\sum_{t=1}^{2} c_{ij}x_{ijpk}^{t} + \sum_{k\in K} cv_k\, u_{kt} + \sum_{d\in D}\sum_{t=1}^{2} FC_d\, YY_{dt} \qquad (۳۶)$$

st:

$$\sum_{i\in V_1} q_i X_{ij} + z_i\Gamma_i + \sum_{j=1}^{n} p_{ij} \le \sum_{j\in V_2} Q_k y_{kj} \quad \forall j \in V_2 \qquad (۳۷)$$

$$\sum_{k\in K} l_k y_{kj} \le L_j Z_j \qquad \forall j \in V_2 \qquad (۳۸)$$

$$\sum_{j\in U_i} X_{ij} = 1 \qquad \forall\, i \in V_1 \qquad (۳۹)$$

$$\sum_{j\in V_2} y_{kj} \le b_k \qquad \forall k \in K \qquad (۴۰)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ijpk}^{t} = \sum_{j=1}^{n} x_{jipk}^{t} \quad \forall i \in V \setminus \{1, D\} \qquad (۴۱)$$

$$\sum_{p_k\epsilon P_k}\sum_{t=1}^{2}\left(y_{ijpk}^{t} + y_{ijpk}^{t}\right) = 1 \quad \forall (i,j) or\ (j,i) \in E_R \qquad (۴۲)$$

$$\sum_{(i,j)\in E_R} f_{ij} y_{ijpk}^{t} \le W_k \quad \forall k \in K, \forall p_k = 1,2,..,P_k \qquad (۴۳)$$

$$y_{ijpk}^{t} \le x_{ijpk}^{t} \quad \forall k \in K, \forall p_k = 1,2,..,P_k \qquad (۴۴)$$

$$\sum_{p_k\epsilon P_k}\sum_{(i,j)\in E} x_{ijpk}^{t} \le Mbig\ u_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in \{1,2\} \qquad (۴۵)$$

$$\sum_{p_k\epsilon P_k}\sum_{(i,j)\in E} tt_{ij}x_{ijpk}^{t} \le T_{max} \quad \forall k \in K, \forall t \in \{1,2\} \qquad (۴۶)$$

$$\sum_{i\in V\setminus\{1,D\}}\sum_{p_k\epsilon P_k} x_{ijpk}^{t} \le Mbig\ YY_{dt} \quad \forall k \in K, \forall d \in \{D\} \qquad (۴۷)$$

$$\sum_{(i,j)\in E_R}\sum_{p_k\epsilon P_k}\sum_{k\in K} q_{ij}y_{ijpk}^{t} \le Cap_d\, YY_{dt} \quad \forall t \in \{1,2\}, \forall d \in \{D\} \qquad (۴۸)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x_{1jpk}^{t} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}, \forall d \in \{D\} \qquad (۴۹)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x_{jdpk}^{t} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}, \forall d \in \{D\} \qquad (۵۰)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{1,D\}} x_{djpk}^{t} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}, \forall d \in \{D\} \qquad (۵۱)$$

$$\sum_{j\in V\setminus\{2,D\}} x_{jdpk}^{t} = u_{kt}\, YY_{dt}\ \forall t \in \{1,2\}, \forall d \in \{D\} \qquad (۵۲)$$

$$\sum_{(j,h)\in S} x_{jhpk}^{t} = \text{Mbig} \sum_{i\notin V[S]}\sum_{j\in V[S]} x_{ijpk}^{t} \quad \forall S \subseteq V,\ \forall t \in \{1,2\} \qquad (۵۳)$$

$$x_{ijpk}^{t} \in Z^{+}; y_{ijpk}^{t}, YY_{dt}, u_{kt} \in \{0,1\} \qquad (۵۴)$$

$$z_i + p_{ij} \ge \widehat{q_i} y_i \qquad \forall i = 1,\dots,m\ ,j = 1,\dots,n \qquad (۵۵)$$

$$-y_j \le X_{ij} \le y_j \qquad \forall j = 1,\dots,n \qquad (۵۶)$$

$$y_j \ge 0 \qquad \forall j = 1,\dots,n \qquad (۵۷)$$

$$z_i \ge 0 \qquad \forall i = 1,\dots,m \qquad (۵۸)$$

$$p_{ij} \ge 0 \qquad \forall i = 1,\dots,m\ ,j = 1,\dots,n \qquad (۵۹)$$

$$Z_j \in \{0,1\}, \qquad \forall j \in V_2 \qquad (۶۰)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall\, i \in V_1\ ,\ \forall j \in V_2 \qquad (۶۱)$$

$$y_{kj} \ge 0\ , integer \quad \forall j \in V_2\ , \quad \forall k \in K \qquad (۶۲)$$

۵. نتایج پژوهش

۵-۱ ارزیابی مدل پژوهش و حل مثال عددی

برای ارزیابی مدل ارائه شده، ابتدا مدل قطعی و مدل استوار فازی با رویکرد الگوریتم ژنتیک را جداگانه با استفاده از سطوح عدم قطعیت مختلف، مورد حل قرار گرفته است. برای حل

مدل از نرم‌افزار GAMS و MATLAB استفاده شده است. بدین منظور، ابتدا پارامترهایی را که غیر قطعی هستند، به شکل تصادفی در بازه مربوطه تولید می‌کنیم. به علت در دسترس نبودن بعضی از اطلاعات دقیق اعداد مربوط به آنها به شکل تقریبی، تخمین زده شد و در مدل جایگذاری شده است. شایان ذکر است که این اعداد با توجه به دامنه تغییرشان به شکل تصادفی تولید شده‌اند. همچنین تمام اطلاعات مربوط به مسأله را با استفاده از تیم متخصصان سازمان پسماند شهرداری بندر بوشهر جمع‌آوری گردیده است (جدول شماره٤). براساس جدول ٤ سه نوع مخزن مختلف با ظرفیت های متفاوت می‌تواند در هر مکان بالقوه استقرار یابد. همچنین فاصله بین انواع مخازن جمع‌آوری در مکان‌های بالقوه با استفاده از تابع یکنواخت برآورد شده است. همچنین برای برررسی روایی پژوهش از رویکرد مقایسهٔ نتایج به دست آمده با نتایج واقعی و بررسی واقعی بودن نتایج و برآورده شدن محدودیت‌ها استفاده شده است. از اینرو برای حل مدل پژوهش از الگوریتم ژنتیک NSGAII برای بهینه‌سازی بهره برده شد، به این دلیل که اولاً مسئلهٔ پژوهش از نوع NP-Hard است و روش‌های دقیق برای اینگونه مسائل کارایی ندارند. دوم این که مسأله پژوهش از نوع مسائل گسستهٔ ترکیبی است.

جدول ٤. اطلاعات اولیه مدل مورد بررسی بر اساس نظر کارشناسان

تعداد انواع مخزن	فاصله هر مخزن (متر)	ظرفیت هر مخزن (کیلوگرم)	انواع مخزن‌های زباله
۲۰۰	Uniform(100,700)	۵۰	K=1
۳۰۰		۲۰۰	K=2
٤۰۰		۵۰۰	K=3

به منظور بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی ابعاد مسأله پژوهش در سطوح عدم قطعیت متفاوت طراحی شده و کیفیت جواب‌های حاصل مورد بررسی قرار می‌گیرد. اطلاعات مربوط به مسائل تولید شده در جدول ۵ ارائه شده است. در این جدول از سمت چپ به ترتیب، ستون اول بیانگر سطوح عدم قطعیت، ستون دوم بیانگر تعداد کل گره‌های موجود در شبکه، ستون سوم بیانگر تعداد کل یال‌های تعریف شده در شبکه، ستون چهارم بیانگر تعداد کل یال‌های دارای تقاضا، ستون پنجم بیانگر تعداد ایستگاه‌های میانی بالقوه و ستون آخر نیز بیانگر تعداد وسایل نقلیه در دسترس در هر مسأله می‌باشد.

هم چنین، جدول ٦ مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترها با استفاده از توزیع یکنواخت را نشان می‌دهد.

جدول ۵. نمونه های تصادفی ایجاد شده

AV	TD	RE	TE	TN	سطوح عدم قطعیت
۱	۱	٦	۸	۵	۰/۱
۲	۳	۲۵	۳۷	۱۰	۰/۲
۵	۵	۵٤	۷۹	۱٦	۰/۵

جدول ٦. مقادیر پارامترهای مدل

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
c_{ij}	U(1,15)	f_{ij}	U(10,15)	T_{max}	520
cv_k	U(150,250)	W_k	U(50,200)	Cap_d	U(250,350)
FC_d	U(1500,2500)	tt_{ij}	U(0,./3)	$Mbig$	10^{15}

همچنین نحوه تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های ژنتیک (NSGAII) برای این مسأله در جدول ۷ نشان داده است. همانگونه که در جدول ۸ می‌توان مشاهده نمود ابعاد مسأله این پژوهش در سطوح عدم قطعیت مختلف ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۵ مورد حل قرار گرفته است. به منظور ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، نتایج محاسباتی آن ها با حل‌کننده CPLEX مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتایج خروجی توابع هدف تفاوت معنی داری را در هر دو حالت نشان می‌دهد. نتایج حل مدل فوق نشان می‌دهد که مسأله در حالت استوار فازی که با رویکرد الگوریتم ژنتیک مورد حل قرار گرفته است، تعداد کمتری از انواع مخازن را به مکان‌های بالقوه تخصیص می دهد. تفاوت بین توابع هدف در حالت قطعی که با حل کننده CPLEX و استوار فازی نشان می‌دهد که مدل در حالت استوار فازی می‌تواند جواب‌هایی قابل اعتمادتر در حالت عدم قطعیت ایجاد نماید. همچنین در شکل ۲ شبه کد الگوریتم نشان داده شده است.

```
Initialize Population P'
Generate random population – size N'
Evaluate Objective Values
Assign Rank (level) Based on Pareto dominance – sort
Generate Child Population
   Binary Tournament Selection
   Recombination and Mutation
For  i=1 to g do
     For each Parent and Child in Population do
        Assign Rank (level) based on Pareto – sort
        Generate sets of non-dominated vectors along PFknown
        Loop (inside) by adding solutions to next generation starting from the first front until
         N' individuals found determine crowding distance starting from points on each front
      End for
Select points (elitist) on the lower front (with lower rank) and are outside a crowding distance
Create next generation
   Binary Tournament Selection
   Recombination and Mutation
End for
```

شکل ۲. شبه کد الگوریتم NSGAII

همانگونه که در جدول شماره ۹ مشاهده می‌شود، تعداد مکان‌های بالقوه و همچنین تعداد مکان های فعال در سطوح عدم قطعیت متفاوت با استفاده از مدل پیشنهادی در مسأله برآورد شده است. نتایج جدول فوق نشان می‌دهد که با استفاده از مدل پیشنهادی پژوهش می‌توان موجب کاهش تعداد مکان‌های مورد نیاز جهت جمع‌آوری پسماند در سطح شهر بوشهر گردید که این امر موجب کاهش انواع هزینه‌ها می‌گردد.

جدول ۷. تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک NSGAII برای مسأله پژوهش

پارامترهای مسأله	
تعداد تکرار	MaxIt=500
اندازه جمعیت	nPop=200
درصد ایجاد تقاطع (ترکیب مجدد)	pCrossover=0/6
میزان زاد ولد	nCrossover=3*round(pCrossover*nPop/2)
درصد میزان جهش	pMutation=0/4
نرخ جهش	mu=0/03
اندازه مرحله جهش	sigma=0/1*(VarMax-VarMin)

جدول ۸. تخصیص مخزن‌های جمع‌آوری پسماند در سطح عدم قطعیت مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک *NSGAII*

میزان درصد کاهش	نتایج مدل استوار فازی (روش حل:الگوریتم ژنتیک)			نتایج مدل قطعی با حل کننده CPLEX		میزان تولید روزانه پسماند به ازای هر نفر (کیلوگرم)	سطح عدم قطعیت	
	K=3	K=2	K=1	K=3	K=2	K=1		
٪۱۵	۲٦۵	۲۳۳	۱۲۱	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۲	۰/۱
٪۱۱	۲۷٤	۲٤۵	۱۳٦	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۳	
٪٦	۲۸٤	۲۵۵	۱٤۸	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۵	
٪۱۳	۲٦٦	۲۳۷	۱۳۵	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۲	۰/۲
٪۹	۲۷۹	۲٤۸	۱٤۱	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۳	
٪٦	۲۸٦	۲۵٦	۱٤۷	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۵	
٪۱۱	۲۷۷	۲۳۹	۱۳۷	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۲	۰/۵
٪٦	۲۹۱	۲۵۰	۱٤٤	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۳	
٪٤	۳۰۲	۲۵۷	۱٤۷	۳۲۳	۲٦۲	۱۵۱	۵	
٪۹	میانگین کاهش تخصیص مخزن های جمع آوری پسماند							

جدول ۹. تعیین تعداد مکان‌های فعال جهت جمع آوری پسماند از بین مکان های بالقوه بااستفاده از الگوریتم ژنتیک *NSGAII*

میزان درصد کاهش	تعداد مکان‌های فعال	تعداد مکان‌های بالقوه	سطح عدم قطعیت
٪٤۵	۱۵۷	۲۹۰	۰/۱
٪۵۳	۱۳٦	۲۹۰	۰/۲
٪۵۸	۱۲۱	۲۹۰	۰/۵
٪۵۲	میانگین درصد کاهش مکان های فعال جهت جمع‌آوری پسماند		

٦. تحلیل حساسیت و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی

با توجه به اینکه روش‌های فرا ابتکاری، الگوریتم‌های تخمینی برای حل مسائل بهنیه سازی 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. در نهایت پس از بررسی ادبیات موضوع، سه شاخص زیر به عنوان شاخص‌های ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در این پژوهش شناسایی و معرفی شده‌اند.

(۱) شاخص تعداد جواب های پارتو[٤] (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*[15]*.

(۲) شاخص کیفیت [٥](QM) : این شاخص نشان دهنده سهم الگوریتم در مجموعه پاسخ های پارتو حاصل از ترکیب پاسخ های پارتو ارائه شده از طریق کلیه الگوریتم های مورد مقایسه است. هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشانه کارایی بهتر الگوریتم است*[15]*.

(۳) شاخص متوسط فاصله از نقطه ایده آل [٦](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 می باشد [15].

جدول ۱۰. شاخص های اعتبارستجی الگوریتم

الگوریتم ژنتیک NSGAII	سطح عدم اطمینان	تعداد مکان فعال	*NPS*	*QM*	*MID*
	۰/۱	۱۵۷	۲٤	۰/۸	۰/٦٥٥
	۰/۲	۱۳٦	۲۹	۰/۸	۰/٦۱٥
	۰/٥	۱۲۱	۳۱	۰/۸	۰/٥۹۹

۷. بحث و نتیجه‌گیری

مکانیابی تسهیلات مورد نیاز در حوزه پسماند از جمله مهمترین مسائلی است که می‌تواند باعث کاهش چشم‌گیر هزینه‌های واحد مدیریت پسماند در شهرداری‌ها گردد. در بسیاری از مدل‌های مکانیابی تسهیلات فرض عدم قطعیت بعضی از پارامترها یک فرض اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. مسائل مکانیابی و مسیریابی و تخصیص بهینه وسایل نقلیه، یکی از تصمیم گیری‌های مهم سازمان‌هایی هم چون شهرداری‌ها در بحث جمع‌آوری زباله شهری است؛ چرا که با مکانیابی بهینه، تخصیص بهینه وسایل نقلیه و به دنبال آن تعیین بهینه می توانند درصد مهمی از هزینه‌های مرتبط را کاهش دهند.

در این پژوهش، یک رویکرد کاملا جدید برای مواجهه با عدم قطعیت مدل‌های مکانیابی – مسیریابی ارائه شده است که با اعمال آن در مدل‌های قطعی می توان آنها را هرچه بیشتر به مسائل واقعی نزدیک کرد. مدل ارائه شده در اینجا که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط که شامل یک تابع هدف جهت یافتن حداقل مکان–های فعال جهت جمع‌آوری پسماندهای تولید شده در سطح شهر از بین مکان‌های بالقوه می‌باشد. همچنین تابع هدف دوم به دنبال یافتن کوتاه ترین مسیر عبور خودروهای حمل پسماند می باشد. برای حل مدل پژوهش از رویکرد الگوریتم ژنتیک چند هدفه بهره برده شده است.

بطور کلی در این پژوهش با مسأله مکان‌یابی سایت‌های جمع‌آوری پسماند و همچنین مسأله مسیریابی بهنه هر وسیله نقلیه

در سیستم مدیریت پسماند شهری روبرو هستیم. از اینرو در این پژوهش یک مدل بهینه‌سازی که به تصمیم‌گیری در مورد سایت‌هایی جهت قرار دادن انواع مخازن جمع‌آوری پسماند زباله کمک می‌کند ارائه شده است. همچنین در مدل پیشنهادی این مطالعه تعداد و ویژگی‌های این مخازن در مکان‌های بالقوه مشخص شده است. همچنین مدل ارائه شده در این پژوهش محدودیت‌هایی را معرفی می‌کند که از یک طرف، از کیفیت خدمات دریافت شده توسط شهروندان اطمینان حاصل می‌کند، و از طرف دیگر، مخازن جمع آوری پسماند را به سایت‌های جمع‌آوری تخصیص می‌دهد. علاوه بر این، نتایج محاسباتی داده‌های مربوط به یک مسأله از زندگی واقعی شهری، اثربخشی استفاده از مدل بهینه‌سازی این پژوهش را در انتخاب سایت‌های فعال جمع‌آوری پسماند (کاهش تا ۵۲٪) و مخازن زباله تخصیص داده شده به این سایت‌ها (کاهش تا ۹٪) را نشان می‌دهد. از اینرو کاهش‌ها در این متغیرهای مسأله می‌تواند به طور مداوم منجر به صرفه‌جویی‌های مالی در عملیات جمع‌آوری پسماند و همچنین در کاهش تأثیرات زیست محیطی گردد. همچنین می‌توان بخش‌های مختلف این پژوهش را با سایر پژوهش‌های انجام شده مورد مقایسه قرار داد که به طور خلاصه در جدول شماره ۱۱ نشان داده شده است.

جدول ۱۱. مقایسه پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌ها

منابع	نوع مسأله		وضعیت		تابع هدف	
	مکانیابی	مسیریابی	قطعی	غیرقطعی	یافتن حداقل مکان	کاهش هزینه
پژوهش حاضر (۲۰۲۲)	*	*		*	*	*
گامبلا و همکاران (۲۰۱۹)	*			*	*	
حبیب و همکاران (۲۰۱۹)	*		*			
یاداو و همکاران (۲۰۱۷)	*		*		*	

سپس برای اعتبار سنجی مدل و مقایسه شرایط قطعی و عدم قطعیت، با استفاده از داده‌های واقعی که با نظر کارشناسان حوزه پسماند شهرداری بندر بوشهر جمع‌آوری گردید چندین سطح عدم قطعیت با استفاده نرم افزار GAMS و MATLAB مورد حل قرار گرفت. از اینرو، مشخص شد که نتایج حل مسائل استوار فازی شهودی با الگوریتم حل ژنتیک بسیار متفاوت از مدل قطعی بود و عمدتا این تغییرات در پارامترهای موجود در هر دو مدل بود.

نتایج پژوهش نشان می‌دهد، که روش‌های تفکیک ضایعات و سیستم جمع‌آوری و انتقال آن بخوبی انجام نمی‌گیرد. از اینرو پیشنهاد می‌گردد به منظور جلوگیری از ذخیره‌سازی پسماندهای تولید شده توسط خانوارها و همچنین به منظور جلوگیری از ایجاد مشکلاتی از قبیل بو، رشد و تکثیر انواع باکتری‌های بیماری‌زا در محیط که همراه با مشکلات بهداشتی و زیست محیطی است، از رویکرد پیشنهادی این پژوهش به منظور تعیین تعداد و نحوه تخصیص ایستگاه‌های انتقال در هر منطقه از سطح شهر اقدام گردد. در بخش مسیریابی، پس از مسیریابی اولیه و اخذ نتایج از مسیرهای جدید، این نتایج با اطلاعات جمع‌آوری شده از مسیرهای موجود مقایسه گردید. نتایج حاکی از آن بود میزان کاهش در فاصله پیموده شده توسط خودروها و همچنین زمان طی شده خودروها به منظور جمع‌آوری همه پسماندهای تولید شده از اختلاف چشم‌گیری برخوردار خواهد بود. از اینرو پیشنهاد می‌گردد به منظور افزایش سرعت در جمع‌آوری پسماندهای موجود در سطح شهر از الگوریتم مسیریابی پیشنهادی در این پژوهش استفاده گردد. همچنین براساس الگوی پیشنهادی در این پژوهش می توان تعداد خودورهای موردنیاز برای جمع آوری پسماند در

هر منطقه از شهر را نیز تعیین نمود که این امر موجب کاهش هزینه خواهد شد.

همچنین براساس محدودیت‌هایی که در این پژوهش وجود دارد می‌توان برای مطالعات آینده و انجام پژوهش در این حوزه پیشنهاد نمود که استفاده از روش‌های غیرقطعی از قبیل سیستم-های خاکستری و سیستم‌های کنترل بهینه تصادفی و مقایسه نتایج آنها برای توسعه مدل این پژوهش بهره برد. علاوه براین برای نزدیک بودن به شرایط دنیای واقعی می‌توان توابع هدف جدیدی مانند حداکثر کردن میزان رضایت شهروندان از سیستم جمع‌آوری پسماند که یکی از جنبه‌های زندگی اجتماعی انسان‌ها می‌باشد، تعریف نمود.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Location
2. Waste management system
3. Intuitionistic Fuzzy Set
4. Number of Pareto Solution
5. Quality Metric
6. Mean Ideal Distance

۹. مراجع

– Locating a waste treatment facility by using stochastic multicriteria acceptability analysis with ordinal criteria. . Lahdelma, R., Salminen, P., Hokkanen, J. 2002, Eur.J. Oper. Res. 142 (2), 345–356.

– Site selection for hazardous wastes: A case study from the GAP area, Turkey. Eng. Geol. 81 (4), 371–388. Yesilnacar, M.I., Cetin, H.,. 2005.

– Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. Chang, N.-B., Parvathinathan, G., Breeden, J.B.,. : J. Environ. Manage. 87 (1), 139–153, 2008.

– A multicriteria facility location model for municipal solid waste management in North Greece. Eur. J.Oper. Res. 187 (3), 1402–1421. Erkut, E., Karagiannidis, A., Perkoulidis, G., Tjandra, S.A. 2008.

– Robust interval quadratic programming and its application to waste management under uncertainty. Environ. Syst. Res. 1 (1), 1. Li, Y., Huang, G.,. 2012.

– Solid waste facilities location using of analytical network process and data envelopment analysis approaches. Waste Manage. 32(6), 1258–1265. Khadivi, M.R., Ghomi, S.F.,. 2012.

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

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

– Hierarchical facility location for the reverse logistics network design under uncertainty. J. Uncertain Syst. 8 (4), 255–270. Wang, K., Yang, Q. 2014.

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

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

– A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment. Yadav, V., Bhurjee, A.K., Karmakar, S., Dikshit, A.K.: Sci. Total Environ. 603, 760–771, 2017.

– Optimization of sample size and order size in an inventory model with quality inspection and return of defective items. Cheikhrouhou, Naoufel: Springer Science+Business Media New York, 2017.

– A robust periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection considering drivers and crew's working time. Babaee Tirkolaee, Erfan, Mahdavi, Iraj & Seyyed Esfahani, Mir Mehdi.: Waste Management, 2018.

– A robust bi-objective multi-trip periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection using a multi-objective invasive weed optimization. Babaee Tirkolaee, Erfan: Waste Management & Research, 2019.

– A robust green location-allocation-inventory problem to design an urban waste management system under uncertainty. Babaee Tirkolaee, Erfan.: Waste Management 102 (2020) 340–350, 2020

– Hadi nezahd, F., Ramzi, A., & Khaje, M. (2018). Evaluation and comparison of multi-objective meta-heuristic algorithms to solve the optimization problem. No. 8.

– Designing a Multi-Objective Mathematical Model Using Intuitionistic Fuzzy Approach to Select Investment Projects (Case of Investment Opportunities in Bushehr Province). Marzieh Sadat Hosseini & Hamid Shahbandarzadeh. Commercial Strategies (In Persian).

– Interval-valued facility location model: An appraisal of municipal solid waste management system. J.Cleaner Prod. 171, 250–263. Yadav, V., Karmakar, S., Dikshit, A.K., Bhurjee, A.K. 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. Muneeb, S.M., Adhami, A.Y., Jalil, S.A., Asim, Z. 2018.

– Large-scale disaster waste management under uncertain environment. J.Cleaner Prod. 212, 200–222. Habib, M.S., Sarkar, B., Tayyab, M., Saleem, M.W., Hussain, A., Ullah, M., Iqbal, M.W., 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. Rathore, P., Sarmah, S.P., 2019.

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

– Operations research in solid waste management: a survey of strategic and tactical issues. Comput.Oper. Res. 44, 22–32. Ghiani, G., Laganà, D., Manni, E., Musmanno, R., Vigo, D. 2014.

– The rollon–rolloff waste collection vehicle routing problem with time windows. Eur. J. Oper. Res. 224 (3), 466–476. Wy, J., Kim, B.-I., Kim, S.,. 2013.

– Effective location models for sorting recyclables in public management. Eur. J. Oper. Res. 234 (3), 839–860. Toso, E.A.V., Alem, D. 2014.

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 و درجه دکتری خود را در سال ۱٤۰۰ با رتبه عالی در رشته مدیریت صنعتی گرایش تحقیق در عملیات از دانشگاه خلیج فارس اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی موردعلاقه ایشان مدیریت و فنون تصمیم گیری کمی و کیفی ، علم مدیریت فازی و مدلسازی ریاضی ، تجزیه و تحلیل، مستندسازی، آسیب شناسی و بهبود فرایندها و سیستم‌های سازمانی بوده، کاربرد رویکردهای هوش مصنوعی در علم مدیریت بوده و در حال حاضر عضو هیئت‌علمی با مرتبه استادیار در دانشگاه خلیج فارس بوشهر است.

حمید شاهبندرزاده، درجه کارشناسی در رشته مدیریت را در سال ۱۳٦۸ 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 تصمیم گیری چند معیاره، ارزیابی عملکرد، بهینه سازی 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.