مدل بهینه‌سازی یکپارچه ناب جمع‌آوری و جاروب زباله شهری با استفاده از تخصیص ناوگان ناهمگن ظرفیت محدود در پنجره‌های زمانی متفاوت

مقاله علمی – پژوهشی

میلاد رحیمی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
*__جواد رضائیان (نویسنده مسئول)__، دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
ایرج مهدوی، استاد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران
*__پست الکترونیکی نویسنده مسئول:j.rezaeian@ustmb.ac.ir__

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۹– پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۰
صفحه ۲۳۰-۲۰۹

چکیده

مدیریت بهینه جمع‌آوری زباله شهری با توجه به رشد جمعیت و افزایش نرخ تولید پسماندها به یکی از چالش‌های اساسی کلان‌شهرها تبدیل شده است به‌طوری‌که نسبت بالای هزینه عملیات جمع‌آوری در قیاس با کل هزینه‌های مدیریت پسماند از یک‌سو و محدودیت‌های زمانی و مکانی و تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از جمع‌آوری نامناسب زباله‌ها از سوی دیگر، ضرورت طراحی سیستم‌های کارآمد را نمایان می سازد. در این پژوهش، برای بهینه سازی هم‌زمان مکان‌یابی مراکز انبا شت زباله، م سیریابی ناوگان ناهمگن مشتمل‌بر موتوری (مکانیزه/غیرمکانیزه) و غیرموتوری (پاکبان‌ها) و تخصیص منابع دراختیار، ضمن رعایت ظرفیت محدود ناوگان‌ها و زمان کل در دسترس، پنجره‌های زمانی خدمت و اولویت پاکسازی معابر، با هدف کاهش هزینه‌های عملیاتی، حداقل‌سازی تأ خیرها، کاهش فسادپذیری زباله‌ها، افزایش پوشش خدمات و بهبود شاخص‌های ناب، از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی یکپارچه غیرخطی مختلط ا ستفاده شده و با دو رویکرد اپ سیلون-محدودیت و برنامه‌ریزی آرمانی حل شده ا ست. نتایج مثال عددی مورد برر سی نشان‌دهنده بهبود ۱۲ درصدی هزینه‌ها، بهبود ۱۷ درصدی نرخ جمع‌آوری زباله و کاهش ۳۵ درصدی فساد نا شی از تاخیر در جمع‌آوری زباله شده ا ست. لذا مدل ارائه شده با درنظر گرفتن اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و ناب، چارچوبی جامع برای تصمیم‌گیری در سیستم‌های مدیریت پسماند شهری فراهم می‌کند

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی چند هدفه، پنجره‌های زمانی، جمع‌آوری ناب زباله شهری، مسئله مکان‌یابی– مسیریابی، ناوگان ناهمگن

۱-مقدمه

شهرنشینی فزاینده دنیای امروز، مصرف بیشتر منابع و چالش‌های زیست‌محیطی فراوانی را به‌بار آورده است و این واقعیت در کشورهای در حال توسعه با شدت بیشتری در حال وقوع است. به‌طوری‌که پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ میلادی بیش از ٦۰ درصد از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی کرده و سریع‌ترین رشد شهرنشینی نیز مربوط به کشورهای آسیایی و آفریقایی بوده باشد (آرا و همکاران، ۲۰۲۱). این امر درخصوص ایران نگران‌کننده‌تر نیز خواهد بود زیرا براساس داده‌های مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۸، پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که ایران نیز در مرحله تسریع روند شهرنشینی قرار دارد (جواهری و همکاران، ۱٤۰۰). سازمان مدیریت پسماند شهر تهران در گزارشی که در سال ۲۰۱٦ میلادی تدوین نمود، ضمن اذعان به دو برابر شدن میزان تولید پسماند شهر تهران در طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ میلادی، هزینه جمع‌آوری و حمل و نقل این میزان پسماند را در انتهای این دوره روزانه در

حدود ۱/۵ میلیارد تومان تخمین زده است. این میزان افزایش تولید پسماند در طی این سال‌ها با دو برابر شدن تعداد ناوگان جمع‌آوری پسماند نیز همراه بوده است که بالتبع در افزایش سطح آلودگی‌های صوتی، بصری، زیست‌محیطی و همچنین میزان مصرف سوخت تاثیرات نامطلوب بسزایی داشته است. تا جایی‌که تعداد دفعات جمع‌آوری زباله در برخی از مناطق شهر تهران به دو تا سه مرتبه در روز نیز می‌رسد و این مقدار در قیاس با میانگین جهانی که حدودا ۲ تا ۳ مرتبه در هفته است، تفاوت چشم‌گیری دارد (باقری و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین، طبق گزارش ارائه شده از سوی سازمان پسماند شهری استان تهران، ایرانی‌ها هر روز حدود ۴۰ هزار تن زباله تولید می‌کنند که از این میان بیش از ۷ هزار تن متعلق به شهر تهران بوده و ارزش دلاری پسماند غذایی آشپزخانه‌ای، کاغذ و مقوا، آرد و نان دفن شده تنها در مرکز دفن واقع در غرب شهر تهران بیش از ۱۴۰ میلیون دلار است (انصاری نسب و همکاران، ۱۴۰۱).

جمع‌آوری و حمل زباله جامد شهری که معمولا توسط منازل مسکونی، واحدهای اداری و تجاری، مدارس، پارک‌ها، خیابان‌ها و غیره تولید می‌شوند، یکی از بخش‌های پرهزینه در مدیریت پسماند شهری می‌باشد به‌طوری‌که ۶۰ الی ۸۰ درصد از هزینه‌های مدیریت پسماند جامد شهری را به خود اختصاص داده است (مهدی علینقیان و همکاران ، ۱۳۹۴). با توجه به اتلاف حدود ۶۰ درصدی منابع در این بخش، مسیریابی جمع‌آوری و حمل زباله به یکی از مسائل مهم از میان انواع مسائل مسیریابی تبدیل شده است (حافظ‌الکتب و همکاران، ۱۴۰۲). این میزان از اتلاف منابع، با توجه به حجم ریالی زباله تولیدی و همچنین هزینه‌های تخمینی برای جمع‌آوری آن، لزوم توجه بیشتر به بهبود وضع موجود را افزایش می‌دهد.

در بخش جمع‌آوری و حمل زباله شهری که شامل برنامه‌ریزی وسایل حمل‌ونقل موتوری می‌باشد به‌منظور جمع‌آوری و انتقال زباله‌های انباشت شده در سطح معابر و در جنب منازل و ادارات، ابتدا نسبت به مکان‌یابی مراکز انباشت زباله در سطح جغرافیای مورد بررسی اقدام گردیده و با تخصیص ناوگان حمل‌ونقل موتوری، مسیر حرکت ناوگان نیز مشخص می‌گردد. مراکز مکانیزه انباشت زباله به کلیه تسهیلات انباشت زباله‌ای اطلاق می‌گردد که توسط وسائل مکانیزه، جمع‌آوری می‌شوند و معمولا در ابتدای معابر درون‌شهری، تقاطع‌ها و بر خیابان‌های اصلی شهرها مستقر می‌گردند. در به‌کارگیری این تسهیلات معمولا تراکم جمعیتی و شعاع دسترسی شهروندان مورد توجه قرار می‌گیرد. از این‌رو، با توجه به اینکه بخش اعظم زباله در مناطق شهری تولید می‌گردد استفاده از مراکز مکانیزه انباشت زباله رایج‌ترین شیوه برای تسهیل در جمع‌آوری زباله‌های جامد شهری است. (شاه‌بندرزاده و همکاران، ۱۴۰۳).

۲- پیشینه تحقیق

در مکان‌یابی مراکز انباشت زباله، عواملی مانند موقعیت مکانی و جغرافیایی، فاصله بین مراکز انباشت زباله، گنجایش مراکز انباشت، در معرض دید بودن و غیره تاثیرگذار هستند. سطل‌های فلزی و پلاستیکی سیار با ظرفیت‌های محدود، مخازن ثابت زیرزمینی با چند برابر ظرفیت‌های سطل‌های فلزی و پلاستیکی و همچنین ایستگاه‌های ثابت انتقال زباله که ضمن رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و بصری، ظرفیت انباشت زباله بیشتری را دارا می‌باشند، سه نوع از تسهیلات مکانیزه انباشت زباله شهری هستند. هرچند استفاده از سطل‌های مکانیزه سیار ابزار رایجی در ایران و اغلب کشورهای جهان است ولی عدم سازگاری با مبلمان شهری، آسیب‌پذیری در برابر آتش‌سوزی و زنگ‌زدگی، روباز بودن، نشت شیرابه، سرریز شدن زباله، چالش زباله‌گردها و غیره منجر شده تا در سال‌های اخیر به‌کارگیری مخازن ثابت زیرزمینی و ایستگاه‌های ثابت انتقال زباله نیز به تدریج در ادبیات موضوعی مدیریت پسماند جاپای خود را باز کرده و بالتبع در دنیای واقعی نیز به‌کارگرفته شوند. لذا چنانچه در مکان‌یابی و نوع مراکز انباشت زباله دقت نظر وجود داشته باشد تاثیر بسزایی بر اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی خواهد داشت. (نوری سپهر و همکاران، ۱۴۰۰).

در رابطه با مکان‌یابی مراکز انباشت زباله، پژوهش‌های متعددی صورت گرفته است که از اولین پژوهش‌های انجام شده در این حوزه می‌توان به پژوهش مارکز و لیبرمن در سال ۱۹۷۱ اشاره کرد که مکان‌یابی مراکز انباشت با ظرفیت محدود را به‌منظور حداقل نمودن هزینه‌ها بررسی نمودند (جبارزاده و همکاران، ۱۳۹۴). در سال ۲۰۰۶ پایلی، در پژوهش خود با هدف کاهش هزینه حمل و نقل، مکان بهینه‌ای برای مراکز انباشت مشخص نمود. همچنین، کومیلیس در سال ۲۰۰۸ در مقاله‌ای که هدف آن‌را کاهش زمان و هزینه رفت و برگشت ناوگان به جهت دست‌یابی به مسیر بهینه حمل‌و نقل زباله از محل تولید به محل دفن و بازیافت قرار داد، عامل اصلی نیل به این هدف را به‌کارگیری و مکان‌یابی بهینه مراکز انباشت زباله معرفی نمود (کومیلیس، ۲۰۰۸).

تقوی‌فرد و همکاران درسال ۱۳۸۶ در پژوهش خود با دسته‌بندی مسائل مکان‌یابی به دو بخش مکان‌یابی تسهیلات مطلوب و نامطلوب، سعی نمود تا با رویکرد به اصطلاح "نه در حیاط خلوت من" نسبت به تعریف مسئله اقدام نموده و ضمن بهینه نمودن اهداف ریالی و ریسک با دیدگاه فازی، نسبت به مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب در پژوهش خود اقدام نماید (پاکروان و همکاران، ۱۳۹۸). هرچند این پژوهش مستقیما در خصوص موضوع جمع‌آوری زباله نوشته نشد اما می‌توان مکان‌یابی مراکز انباشت زباله را جزو دسته مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب قرار داد به‌دلیل آن‌که وجود این دسته از تسهیلات برای زندگی روزمره شهروندان لازم و ضروری است ولی اکثر قریب به اتفاق شهروندان خواستار دور بودن تا سرحد امکان این تسهیلات از محل زندگی‌شان هستند. پژوهش رفیعی و همکاران در سال ۱۳۸۸ نیز در رابطه با بررسی سناریوهای مختلف مدیریت پسماند در شهر مشهد بود که مبیّن نقش بسزای مکان‌یابی مراکز انباشت زباله در کاهش سطح آلایندگی و میزان مصرف انرژی سیستم مدیریت پسماند می‌باشد (رفیعی و همکاران، ۱۳۸۸).

در پژوهش جبارزاده و همکاران در سال ۱۳۹٤ ضمن درنظر گرفتن ایستگاه‌های مکانیزه انتقال زباله به‌عنوان ایستگاه‌های هاب زباله، سعی نمودند تا باعث بهبود راندمان فرآیند جمع‌آوری زباله شده و وضعیت رضایت ذی‌نفعان این حوزه را نیز بهبود دهند. ایشان همچنین با در نظر گرفتن صف ماشین‌های جمع‌آوری در ایستگاه‌های انتقال تلاش کردند تا با لحاظ کردن محدودیت‌های دنیای واقعی اعتبار بیشتری به پژوهش خود ببخشند. آصفی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۷ توانستند با طراحی یک سیستم یکپارچه مکان‌یابی- مسیریابی در مدیریت زباله جامد شهری، هزینه‌های ثابت و حمل‌ونقل در سیستم جمع‌آوری زباله را در مطالعه موردی شهر تهران به‌ترتیب ۱۲/۵ درصد و ۲۲/۵ درصد کاهش داده و به‌طور هم‌زمان شاخص پایداری کلی سیستم را نیز ۱۷درصد بهبود ببخشند. همچنین، در سال ۲۰۱۹، سارما و راثور از جمله پژوهشگرانی بودند که در مقاله خود با بهره‌گیری هم‌زمان از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌سازی ریاضی سعی کردند تا با دلایلی از قبیل کاهش آلودگی، جمع‌آوری به‌موقع، تفکیک‌پذیری آسان‌تر و بهبود کارایی سیستم جمع‌آوری، تحت دو سناریوی تفکیک زباله از مبدا و عدم تفکیک زباله، بهترین مکان را برای ایستگاه انتقال زباله بدست آورند. پس از مکان‌یابی مراکز انباشت زباله، مبحث تخصیص منابع (افراد و وسایل حمل‌ونقل) به مناطق و مراکز انباشت جهت بررسی موضوعیت پیدا می‌کند. در این بخش، محدودیت منابع جهت جمع‌آوری و جاروب زباله‌های شهری نقش بسزایی خواهد داشت زیرا که کمبود منابع باعث عدم جمع‌آوری زباله در بعضی مراکز می‌شود و هدر رفت منابع نیز سبب تحمیل هزینه بیشتر به شبکه جمع‌آوری زباله می‌گردد. معمولا این دو موضوع مکان‌یابی و تخصیص تحت عنوان یک موضوع در پژوهش‌های مختلف با هم در نظر گرفته می‌شوند (کرم‌پور عمرانی، ۱٤۰۰).

برنامه‌ریزی استفاده از منابع، موضوع دیگری‌است که در جمع‌آوری و حمل زباله شهری مورد واکاوی قرار گرفته و معمولا در دنیای واقع با محدودیت‌های مختلفی همچون محدودیت زمانی منابع، ظرفیت دراختیار منابع، تعداد دوره‌ها و غیره همراه خواهد بود. از آن‌جایی‌که در مسائل حوزه جمع‌آوری زباله از یک یا چند ناوگان از نوع همگن یا ناهمگن که از یک یا چند ایستگاه شروع به حرکت نموده و به منظور خدمت‌رسانی به یک یا چند مشتری در مکان‌های مختلف طی مسیر می‌کنند، بنابراین مدل‌سازی جمع‌آوری زباله را می‌توان به‌صورت انواع مسائل مسیریابی برنامه‌ریزی نمود به‌طوری‌که اهداف متنوع انجام این کار بهینه گردد (نصیری جان‌آقا، ۱٤۰۲). مسئله اولیه مسیریابی وسائل نقلیه از زمان شکل‌گیری تاکنون در طیف‌های متنوعی مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله آن‌ها می‌توان به درنظرگرفتن محدودیت‌های ظرفیت، اعمال پنجره‌های زمانی در پذیرش و ارائه خدمات، لحاظ کردن فسادپذیری و زوال‌پذیری کالاها و خدمات، لزوم بازگشت و عدم بازگشت وسائل نقلیه به ایستگاه اولیه و چند دوره‌ای بودن افق برنامه اشاره کرد (درودگران و همکاران، ۱۳۹۱). در مسائل جمع‌آوری زباله شهری، معمولا مباحث مکان‌یابی مکان انباشت زباله و یافتن مسیر بهینه برای ناوگان به‌صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار می‌گیرند. در پژوهش مروری سیدحسینی و همکاران که در سال ۱۳۹٦ به‌انجام رسید بیشتر پژوهش‌های پایش شده در حوزه مسائل مکان‌یابی و مسیریابی جمع‌آوری زباله با اهداف اقتصادی بوده است. لذا خلاء کارهای تحقیقاتی پیرامون مسائل یکپارچه مکان‌یابی- مسیریابی با اهدافی فراتر از اقتصادی در حوزه جمع‌آوری زباله شهری نمود بیشتری می‌یابد. عیسایی و همکاران در سال ۱۳۸۷ در پژوهشی که پیرامون بهبود برنامه‌ریزی جمع‌آوری پسماند شهری برای شهر تهران انجام دادند، به‌منظور ارائه بهترین مسیر تردد درون هر ناحیه شهرداری، بدون در نظر گرفتن مکان‌یابی مکان‌های انباشت زباله، الگوریتم سه مرحله‌ایی را با هدف کمینه کردن طول مسیر پیمایش ناوگان موتوری ارائه دادند. همچنین در سال ۱۳۹٦ آهنگری در پژوهشی که به‌صورت موردی در شهر اصفهان انجام داد به‌منظور یافتن تعداد مراکز انباشت ثابت و موقت زباله و همچنین مکان‌یابی این مراکز از یک‌سو و از سوی دیگر تعیین تعداد بهینه ناوگان ناهمگن مورد نیاز، نسبت به تشخیص مسیر بهینه هر یک از ناوگان‌ها اقدام نمود.

در سال ۲۰۰۹، تاوارس و همکاران سعی کردند تا با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی سه بعدی به‌منظور یافتن بهترین مسیر جمع‌آوری و انتقال زباله شهری مدلی را با هدف کمترین میزان سوخت مصرفی طراحی نمایند. آن‌ها در پژوهش خود فرمولی را

برای مصرف سوخت با لحاظ کردن وزن ماشین و همچنین سرازیری و سربالایی بودن مسیر معین نمودند.

در سال ۱۳۹۷ نیسانی سامانی و همکاران با هدف کمینه‌کردن زمان کل سفرهای وسائل نقلیه به‌دنبال یافتن مسیرهای بهینه برای جمع‌آوری زباله شهری با کمک گرفتن از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی بودند. آن‌ها در پژوهش خود یک بخشی از شهر تهران را به‌عنوان مطالعه موردی مورد واکاوی قرار دادند که نتایج این پژوهش حکایت از کاهش ۱۴ الی ۲۴ درصدی در زمان مسافرت ناوگان حمل‌ونقل داشته است. مسئله مسیریابی دوره‌ای وسایل نقلیه ظرفیت‌دار دارای پنجره زمانی از جمله انواع طیف‌هایی است که اخیرا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. همچنین با توجه به‌اینکه مهم‌ترین منابع دراختیار در مسائل جمع‌آوری زباله، نیروی انسانی و وسایل نقلیه دراختیار می‌باشد، مسائل مسیریابی جمع‌آوری زباله را می‌توان شامل مسیریابی پاکبان‌ها و وسایل حمل‌ونقل در نظر گرفت. از آن‌جایی‌که پاکبان‌ها معمولا معابر را رفت‌وروب می‌کنند و وسائل نقلیه مکان‌های انباشت زباله را خدمت‌رسانی می‌نمایند، مسائل مسیریابی این حوزه را می‌توان به دو دسته مسائل گرهی و مسائل برداری دسته‌بندی نمود.

در همین راستا، بابایی تیرکلایی و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک مدل ریاضی چند دوره‌ای با ظرفیت محدود برای مسئله مسیریابی برداری جمع‌آوری زباله شهری توسعه دادند که با هدف کمینه‌سازی مسافت کل پیموده شده توسط ناوگان در کل دوره‌ها و همچنین حداقل‌سازی هزینه‌های کل این پیمایش و کمتر کردن تعداد کل ناوگان مورد نیاز در افق برنامه نوشته شده بود. باقری و همکاران در سال ۱۴۰۰ تلاش کردند تا با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی مسیریابی جمع‌آوری زباله شهری را در دو منطقه از شهر تهران به‌صورت مطالعه موردی با فرض یک نوع ناوگان در اختیار با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های ریالی مدل‌سازی نموده و نتایج حاصل از مدل را که شامل مسیر حرکت ناوگان و همچنین زمان‌بندی راننده و ناوگان را تحت وب برای متصدیان استفاده از این برنامه به نمایش بگذارند. درسال ۱۴۰۱ نیز شاه‌بندرزاده و همکاران با مطالعه موردی شهر بوشهر در پژوهش خود سعی کردند تا با رویکرد فازی استوار نسبت به یافتن تعداد ناوگان مورد نیاز و همچنین مسیر حرکت بهینه آن‌ها و تعداد و مکان مناسب مراکز انباشت زباله با هدف کمینه کردن هزینه‌های ریالی کل، اقدام نمایند. حافظ‌الکتب و همکاران، پژوهش چندهدفه خود را در سال ۱۴۰۲ تحت عنوان بهینه‌سازی مسیر حرکت ناوگان موتوری در اختیار در شهر ساوه را با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های حمل، حداقل‌سازی آلودگی ناشی از حمل‌ونقل و حداکثرسازی رضایت شهروندان به‌عنوان هدف اجتماعی به انجام رساندند و در نهایت اثبات کردند که مدل پیشنهادی ایشان عملکرد خوبی داشته است. خلاصه پژوهش‌های مورد بررسی که برخی از آن‌ها در بخش‌های قبلی ذکر شده در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است.

همان‌گونه که در جدول شماره ۱ اشاره شده، تمرکز اصلی پژوهش‌های صورت گرفته پیرامون موضوع مسیریابی جمع‌آوری زباله شهری در سال‌های اخیر بر بهینه‌سازی اهداف اقتصادی به‌منظور یافتن مسیر حرکت ناوگان موتوری در یک افق تک دوره‌ای بوده و سعی شده تا با لحاظ کردن پنجره‌های زمانی ارائه خدمات، نسبت به واقعی‌تر نمودن مدل اقدام نمایند. هرچند آنچه که تاکنون صورت پذیرفته، قابل قدردانی است ولی واقعیات جامعه امروز حکایت از نادیده گرفتن مباحث قابل توجهی در این حوزه دارد. علی‌رغم این‌که پژوهش‌های مورد بررسی، اهداف زیست‌محیطی را نیز جزو اهداف مورد توجه محققان نشان می‌دهند اما درعین حال آنچنان که باید اهتمام ویژه‌ای به اهداف اجتماعی در این پژوهش‌ها، صورت نگرفته است.

از جمله مباحثی که در این پژوهش‌ها مورد غفلت واقع شده است می‌توان به باز در نظر گرفتن مسیربندی ناوگان جمع‌آوری زباله‌ها اشاره نمود. به‌این معنا که ناوگان مد نظر بعد از حرکت از ایستگاه اولیه و طی مسیر مربوطه لزوما به ایستگاه اولیه بازنمی‌گردد. به‌عبارت بهتر پیش‌فرض اکثر این پژوهش‌ها مسیریابی حلقه‌بسته بوده است. همچنین از آنجایی‌که بخش قابل توجهی از هزینه‌های مدیریت پسماند مربوط به جمع‌آوری بوده و بالغبر نیمی از منابع مورد استفاده در این قسمت اتلاف می‌گردد، از این‌رو، لزوم توجه به بحث هدر رفت منابع یا به‌عبارتی مبحث ناب، بیش از پیش احساس می‌شود. بررسی آخرین مطالعات صورت‌گرفته در حوزه جمع‌آوری و مسیریابی پسماند، حاکی از غفلت پژوهش‌گران از موضوع ناب بوده و لذا در این پژوهش به آن پرداخته شده است. مدل‌های ناب با تمرکز بر کاهش اتلاف منابع و بهینه‌سازی فرآیندها، می‌توانند به‌عنوان یک راه‌کار مؤثر در مدیریت زباله مطرح شوند به‌طوری‌که این مدل‌ها با شناسایی و حذف فعالیت‌های غیرضرور می‌توانند به کاهش زمان و هزینه‌های جمع‌آوری زباله کمک کنند.

از دیگر موضوعاتی که در پژوهش‌های مورد بررسی در حوزه جمع‌آوری و مسیریابی حمل پسماند مورد بی‌توجهی قرار گرفته، موضوع فسادپذیر بودن و از ارزش افتادن زباله و به‌خصوص زباله‌های تر می‌باشد. این واقعیت از آنجایی مهم است که در دنیای امروز از زباله به‌عنوان طلای کثیف یاد شده و لذا توجه و تمرکز پژوهش‌گران پیرامون اثرات زمان‌بندی و مسیریابی بهینه جمع‌آوری و حمل پسماند بر میزان فسادی که در زباله‌های فسادپذیر (تر) ایجاد می‌کند، ضروری به‌نظر می‌رسد.

جدول ۱. پژوهش‌های بررسی شده در حوزه جمع‌آوری و حمل زباله شهری

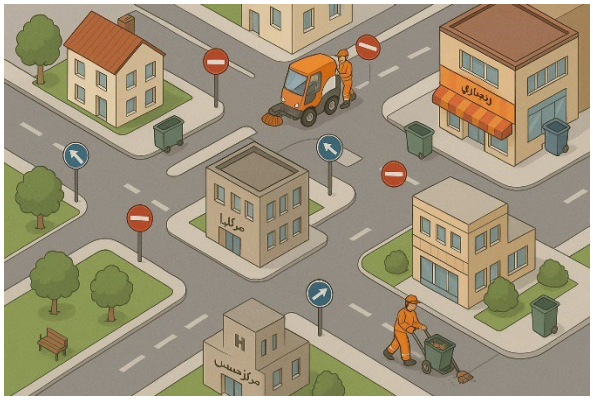
سال	نویسندگان	هدف		مسیریابی	نوع اهداف	مکان‌یابی	ناب	پنجره زمانی	پاکسازی اولویت‌دار	فسادپذیری زباله	ناوگان		دوره	
		تک	چند								موتوری	غیرموتوری	تک	چند
۲۰۱۷	Seyed Jafar Sadjadi, et al		❋		Eco Env Soc	❋					❋		❋	
۲۰۱۷	Hossein Asefi, et al		❋	گرهی	Eco Env Soc	❋					❋		❋	
۲۰۱۸	Erfan Babaee Tirkolaee,et al	❋		برداری	Eco						❋			❋
۲۰۱۹	Erfan Babaee Tirkolaee,et al			گرهی	Eco			❋	❋		❋		❋	
۲۰۲۰	Liu, Lin et al		❋	گرهی	Eco Env						❋		❋	
۲۰۲۱	Erfan Babaee Tirkolaee,et al		❋	برداری	Eco Env Soc						❋			❋
۲۰۲۲	Yong Wang and et al		❋	گرهی	Eco Env			❋			❋			❋
۲۰۲۲	Erdem, M		❋	گرهی	Eco			❋			❋		❋	
۲۰۲۲	Bihun, R. and et al	❋		گرهی	Eco						❋		❋	
۲۰۲۲	Hajiaghaei-Keshteli et al		❋	گرهی	Eco Env Soc						❋		❋	
۲۰۲۲	Caramia, M		❋	گرهی	Eco Soc	❋					❋		❋	
۲۰۲۲	Shawky, Waleed	❋		گرهی	Eco			❋			❋			❋
۲۰۲۲	Moazzeni, S,et al	❋		برداری	Eco	❋					❋		❋	
۲۰۲۲	Muminu O. Adamu, et al	❋		گرهی	Eco	❋					❋		❋	
۲۰۲۲	Abed Zabihian, et al		❋	گرهی	Eco Env	❋		❋			❋		❋	
۲۰۲۲	Liang Wu		❋	برداری	Eco Env						❋		❋	
۲۰۲۲	Chunjian Shang, et al	❋		گرهی	Eco	❋		❋	❋		❋		❋	
۲۰۲۳	Golman Rahmanifar, et al		❋	گرهی	Eco Env			❋			❋		❋	
۱۴۰۲	افروزرحمان‌دوست و دیگران		❋	گرهی	Eco Env Soc						❋		❋	
۱۴۰۳	حمید شاه‌بندرزاده و دیگران		❋	گرهی	Eco	❋					❋		❋	
۲۰۲۴	Abed Zabihian, et al		❋	گرهی	Eco Env Soc	❋					❋		❋	
۲۰۲۴	Narat Rattanawai, et al	❋		گرهی	Eco				❋	❋	❋		❋	
۲۰۲۴	Chenge Wei, et al	❋		برداری	Eco	❋					❋		❋	
۱۴۰۳	پژوهش حاضر		❋	گرهی	Eco Env Soc	❋	❋	❋	❋	❋	❋	❋	❋	

۳-تعریف مسئله

رشد صنعتی، تغییر در الگوی تولید کارخانجات، تمرکز ناموزون جمعیتی، رشد شهرنشینی و تغییر در الگوی مصرف شهروندان، منجر به بروز معضلات زیست‌محیطی و اجتماعی متعددی در جوامع بشری شده است به‌طوری‌که کارشناسان امور اجتماعی و مدیریت شهری بارزترین معضل بهداشتی و زیست‌محیطی قرن حاضر را بحران زباله معرفی می‌کنند. با توجه به روند رو به‌رشد تولید زباله‌های جامد شهری از یک‌سو و همچنین عواملی مانند بافت شهری، کاربری زمین‌ها، تراکم جمعیتی، فصول سال، عادات اجتماعی و غیره به‌عنوان عوامل تاثیرگذار بر کیفیت و کمیت این زباله‌های تولیدی از سوی دیگر، جمع‌آوری و مدیریت زباله‌ها توجه ویژه‌ای را هم از طرف شهروندان به‌عنوان تولیدکنندگان زباله و هم از طرف مسئولین به‌عنوان متصدیان مدیریت زباله، می‌طلبد (بهرام‌خواه و همکاران، ۱۴۰۰). زیرا مدیریت ناصحیح زباله‌های جامد شهری که به‌علت وجود مواد آلاینده و فسادپذیر و نیز رطوبت و حرارت کافی، محل مناسبی برای انواع حشرات و جوندگان موذی می‌باشند منشا بسیاری از بیماری‌های مشترک بین انسان و حیوان و سایر بیماری‌های واگیر و غیرواگیر خواهند بود.

در این تحقیق شبکه‌ای از تسهیلات ناهمگون به‌منظور جمع‌آوری و انتقال زباله‌های انباشت شده در سطح معابر، جنب منازل و مراکز انباشت طراحی می‌گردد که ضمن لحاظ نمودن محدودیت‌های زمانی و مکانی تردد، رفتار متفاوت شهروندان درخصوص زمان انباشت زباله را نیز مد نظر قرار می‌دهد. همچنین این مسئله نسبت به مکان‌یابی تسهیلات انباشت زباله (شامل سطل‌های فلزی و پلاستیکی سیار با ظرفیت‌های محدود، مخازن ثابت زیرزمینی و همچنین ایستگاه‌های ثابت انتقال زباله که ضمن رعایت ملاحظات زیست‌محیطی و بصری، ظرفیت انباشت زباله بیشتری را دارا می‌باشند) در مراکز انباشت موجود در هر معبر اقدام نموده و با تخصیص ناوگان حمل‌ونقل موتوری و غیرموتوری با ظرفیت محدود به این معابر، مسیریابی ناوگان را به‌گونه‌ای اجرا می‌کند که با توجه به فسادپذیر بودن زباله‌های تر، در راستای بهبود مقادیر اهداف اقتصادی، اهداف زیست‌محیطی و اجتماعی (شامل مجموع آلودگی‌های ناشی از حمل‌ونقل وسائل نقلیه، آلودگی ناشی از جاری شدن شیرابه از زباله‌های تر، آلودگی‌های بصری ناشی از تاخیر در جمع‌آوری زباله‌ها و همچنین صحنه‌های ناخوشایند ناشی از زباله‌گردی) و همچنین اهداف ناب پژوهش، گام‌های بیشتری برداشته شود.

در شبکه مطروحه، جغرافیای مورد بررسی به چند معبر مختلف افراز می‌گردد که هر معبر شامل چندین گره (مرکز انباشت زباله) و چندین یال (راه‌های ارتباطی) می‌باشد. جهت یال‌ها حاکی از محدودیت‌های ترددی بین مراکز انباشت بوده و میزان زباله تولیدی توسط شهروندان به‌عنوان تقاضا در گره‌ها و یال‌ها معرفی می‌شود. همچنین ویژگی‌های جمعیتی و جغرافیای شهری هر معبر در قالب درجه اولویت پاکسازی هر معبر، در تعداد و نوع و مکان تسهیلات انباشت زباله که می‌بایست در محل گره‌های این شبکه مکان‌یابی شوند، موثر خواهند بود. شکل ۱، نشان‌دهنده یک نمایش گرافیکی از شبکه مورد بحث می‌باشد.



شکل ۱. نمایش گرافیکی از مسئله جمع‌آوری زباله شهری

٤-مدل ریاضی

در این بخش از تحقیق ضمن معرفی مفروضات مسئله مورد بررسی، نسبت به تعریف پارامترها و متغیرهای تصمیم مد نظر اقدام شده و در نهایت مدل ریاضی مسئله مفروض با نوشتن توابع هدف و محدودیت‌های مربوطه تدوین گردیده است.

مفروضات مدل

- مدل تک دوره‌ای است.
- برای تخمین پارامترها از داده‌های آماری گذشته استفاده شده است.
- یک مرکز پارکینگ و یک مرکز بازیافت وجود دارد.
- هر ناوگان موتوری در صورت انتخاب، تور ویزیت خود را از مرکز پارکینگ یا گاراژ آغاز می‌نماید.
- مسیریابی بازگشت از مرکز بازیافت به مرکز پارکینگ در این مسئله مد نظر قرار نگرفته است.
- در هر معبر مکان‌های بالقوه‌ای جهت مکان‌یابی مراکز انباشت زباله مد نظر قرار گرفته است.

- حجم زباله تولیدی توسط شهروندان براساس بسته‌های استاندارد برآورد می‌شود.
- زباله‌های موجود در سطح معابر به‌صورت خاکروبه است.
- ناوگان موتوری اعم از مکانیزه و غیرمکانیزه، برای عبور از مناطق مختلف می‌تواند هر گره را تنها یک بار ملاقات کند.
- ناوگان موتوری مکانیزه می‌تواند فقط در گره‌های دارای تسهیل انباشت زباله اقدام به خدمت‌رسانی زباله نماید.
- ناوگان موتوری اعم از مکانیزه و غیرمکانیزه، هر گره را فقط یکبار می‌توانند سرویس‌دهی نمایند.
- وظیفه جمع‌آوری زباله از سطل‌های زباله جنب درب شهروندان برعهده ناوگان موتوری غیرمکانیزه و ناوگان غیرموتوری است.
- شهروندان فاقد سطل زباله جنب منزل، زباله تولیدی خود را در نزدیک‌ترین مکان بالقوه انباشت زباله می‌اندازند.
- هر ناوگان موتوری اعم از مکانیزه و غیرمکانیزه، یک آستانه ظرفیت دارند که با رسیدن به آن باید عملیات بارگیری را متوقف کنند.
- پاکسازی زباله سطح معابر برعهده ناوگان غیرموتوری است.
- ناوگان غیرموتوری می‌تواند چند تور ویزیت داشته باشد.
- هر ناوگان غیرموتوری باید چرخ‌دستی خود را در همان معبری که پاکسازی می‌نماید، تخلیه کند.
- در هر گره، حداکثر یک نوع مرکز انباشت مستقر می‌گردد.
- معبری که گره خروج ناوگان موتوری در آن قرار دارد مبنای تاثیر نرخ ترافیک خواهد بود.
- معبر خدمت‌رسانی ناوگان غیرموتوری، مبنای اثر نرخ تردد است.
- فاصله محل مرکز پارکینگ و مرکز بازیافت و تفکیک از گره‌ها، در جغرافیای مورد بررسی به‌اندازه کافی زیاد می‌باشد.

لذا مسافت از/ به این مراکز و از/ به گره‌ها عدد ثابتی تقریب‌زده شده و پارامترهای مرتبط برآورد شده‌اند.

اندیس‌ها

a و b	شمارنده معابر $a, b: 1,2,..,K$
i	شمارنده شهروندان $i = 1,2,..,I$
f	شمارنده ناوگان موتوری $f = 1,2,..,F$
d	شمارنده رانندگان $d = 1,2,..,D$
s	شمارنده پاکبان‌ها $s = 1,2,..,S$
o و p و q	شمارنده گره‌ها $o, p, q = 1,2,..,H$
w	شمارنده نوع مرکز انباشت $w = 1,2,..,W$
t	شمارنده پنجره زمانی $t = 1,2,..,T$

پارامترها

LA_a	طول معبر a
AA_a	سطح معبر a
TB_i	وجود سطل زباله دم درب برای شهروند i بر حسب صفر و یک
NB_i	میانگین تعداد بسته زباله تولیدی شهروند i
$Throw_p$	شماره پنجره زمانی که انباشت زباله در گره p معمولا در ابتدای آن صورت می‌گیرد
Ave_p	میانگین مسافت گره p از شهروندان پیرامونش
$TWalk$	میانگین مدت زمان پیمایش هر واحد طول توسط یک پاکبان در حین جمع‌آوری بسته‌های زباله
$TPack$	میانگین مدت زمان پک کردن زباله‌های حاصل از جاروب معابر توسط یک پاکبان در نایلون زباله
$TGrasp$	میانگین مدت زمان جمع‌آوری زباله توسط یک پاکبان از سطل‌های زباله دم درب شهروندان یا از گره‌های فاقد تسهیل انباشت
$TSweep_s$	میانگین مدت جاروب هر واحد سطح توسط پاکبان s
TG_f	میانگین مدت زمان طی هر واحد طول توسط ناوگان موتوری f در حالت جمع‌آوری زباله
$RWtime_w$	میانگین مدت زمان مورد نیاز برای تخلیه و شستشوی تسهیل انباشت زباله w
$Tmax$	حداکثر زمان کار در دسترس در طی دوره
NSW_f	تعداد پاکبان مورد نیاز برای ناوگان موتوری f
$NumWin$	تعداد پنجره زمانی در یک دوره بر حسب عدد صحیح بزرگتر از یک
Nmg	تعداد بسته‌ای که هر پاکبان می‌تواند با خود حمل کند
$Sbag$	حجم خاروخاشاک هر واحد سطح که توسط یک پاکبان جاروب می‌شود برحسب تعداد بسته زباله
$SCap_w$	حجم تسهیل انباشت زبالهw برحسب تعداد بسته زباله
$Tuck$	حجم چرخ دستی همراه هر پاکبان غیرموتوری بر حسب تعداد بسته زباله
$FCap_f$	حجم ناوگان موتوری f بر حسب تعداد بسته زباله
μ_f	ضریب آستانه ظرفیت ناوگان f برحسب عددی بین صفر و دو
$SCost_{wp}$	میانگین هزینه استقرار تسهیل انباشت زبالهw در گرهp
$FCost_f$	میانگین هزینه طی هر واحد طول توسط ناوگان موتوری f
$DCost_d$	میانگین هزینه هر راننده از نوع d در هر واحد زمانی
$LCost$	میانگین هزینه هر پاکبان در هر واحد زمانی
$DNum$	تعداد راننده در دسترس
$SNum$	تعداد پاکبان در دسترس

PA_a درجه اولویت پاکسازی معبر a

$SSafe_w$ درجه امنیت و سلامت تسهیل انباشت زباله w برحسب عددی بین صفر و یک

$SPlty_{pw}$ درجه عدم تناسب تسهیل انباشت زباله w در گره p برحسب عددی بین صفر و یک

$WPerio_t$ درجه اولویت پاکسازی پنجره زمانی t

$RSpo$ نرخ فسادپذیری زباله برحسب تاخیر یک پنجره زمانی دیرتر بر حسب عددی بین صفر و یک

$IntSpo$ نرخ فسادپذیری اولیه زباله‌ها بر حسب عددی بین صفر و یک

$MTraf_{at}$ ماتریس نرخ ترافیک موتوری معبر a در پنجره زمانی t برحسب عددی بین صفر و یک

$NTraf_{at}$ ماتریس نرخ تردد شهروندان معبر a در پنجره زمانی t برحسب عددی بین صفر و یک

$Traf_{af}$ ماتریس ممنوعیت تردد ناوگان موتوری f در معبر a برحسب صفر و یک

$Aneig_{ab}$ ماتریس وجود ارتباط مستقیم از معبر a به معبر b برحسب صفر و یک

$DtoF_{df}$ ماتریس قابلیت تخصیص راننده d به ناوگان موتوری f برحسب صفر و یک

$BtoA_{ia}$ ماتریس تخصیص تولیدکننده زباله i به معبر a برحسب صفر و یک

$PtoA_{pa}$ ماتریس تخصیص گره انباشت زباله p به معبر a برحسب صفر و یک

$PtoP_{op}$ مسافت دسترسی بین گره انباشت زباله o و گره انباشت زباله p

$BtoP_{ip}$ ماتریس دسترسی نزدیک‌تر تولیدکننده زباله i به گره p در مقایسه با گره‌های آن معبر برحسب صفر و یک

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ضرایب نرمال‌سازی تابع هدف حداکثرسازی کارایی جمع‌آوری زباله برحسب عددی بین صفر و یک

β_1, β_2 ضرایب نرمال‌سازی تابع هدف حداکثرسازی کیفیت تسهیلات انباشت برحسب عددی بین صفر و یک

ω_1, ω_2 ضرایب نرمال‌سازی تابع هدف حداکثرسازی اولویت‌های جمع‌آوری زباله‌ها و جاروب معابر برحسب عددی بین صفر و یک

γ_1, γ_2 ضرایب نرمال‌سازی تابع هدف حداقل‌سازی فسادپذیری زباله در اثر تاخیر در جمع‌آوری برحسب عددی بین صفر و یک

φ_1, φ_2 ضرایب نرمال‌سازی تابع هدف حداقل‌سازی ظرفیت خالی و تاخیرها در جمع‌آوری زباله‌ها برحسب عددی بین صفر و یک

متغیر تصمیم:

X_{pw} اگر تسهیل انباشت زباله w در گره p مستقر شود یک و درغیر این صورت صفر است.

NX_{pw} تعداد تسهیل مستقر انباشت زباله w که در گره p

$FStart_{fp}$ اگر ناوگان موتوری f تور ویزیت خود را از گره p شروع نماید یک و درغیر این صورت صفر است.

$TStartF_{fp}$ پنجره زمانی شروع تور ناوگان موتوری f از گره p

YD_{df} اگر راننده d به ناوگان موتوری f تخصیص یابد یک و درغیر این صورت صفر است.

YMS_{sf} اگر پاکبان s به ناوگان موتوری f تخصیص یابد یک و در غیراین صورت صفر است.

$FServe_{fp}$ اگر ناوگان موتوری f در گره p خدمت‌رسانی نماید یک و در غیر این صورت صفر است.

YF_{fop} اگر ناوگان موتوری f از گره o به گره p حرکت نماید یک و درغیر این صورت صفر است.

$FStop_{fp}$ اگر ناوگان موتوری f تور ویزیت خود را در گره p تمام کند یک و درغیر این صورت صفر است.

$SStart_{sp}$ اگر پاکبان s تور ویزیت خود را به‌عنوان ناوگان غیرموتوری از گره p شروع نماید یک و درغیر این صورت صفر است.

$TStartS_{sp}$ پنجره زمانی آغاز تورناوگان غیرموتوری s از گره p

$SServe_{sa}$ اگر پاکبان s در معبر a خدمت‌رسانی نماید یک و درغیر این صورت صفر است.

YS_{abs} اگر پاکبان s به‌عنوان ناوگان غیرموتوری برای پاکسازی از معبر a به منطقه b برود یک و درغیر این صورت صفر است.

$SStop_{sa}$ اگر پاکبان s تور ویزیت خود را به‌عنوان ناوگان غیرموتوری در گره p به پایان برساند یک و در غیر این صورت صفر است.

$LoTimeS_s$ مدت کارکرد پاکبان s در طی دوره

$LoTimeD_d$ مدت کارکرد راننده d در طی دوره

$SerTS_{sa}$ مدت خدمت‌رسانی پاکبان s در معبر a

$SerTF_{fo}$ مدت خدمت‌رسانی ناوگان موتوری f در گره o

$MoTime_{fop}$ مدت جابجایی ناوگان موتوری f از گره o به گره p

GCR نرخ کل جمع‌آوری زباله در طی دوره

TG کل زباله تولیدی در دوره

GC کل زباله جمع‌آوری شده در طی دوره

$In\theta_{fo}$ پنجره زمانی ورود ناوگان موتوری f به گره o

$In\delta_{sa}$ پنجره زمانی ورود پاکبان s به‌عنوان ناوگان غیرموتوری به معبر a

$Ex\theta_{fo}$ پنجره زمانی خروج ناوگان موتوری f از گره o

$Ex\delta_{sa}$ شماره پنجره زمانی خروج پاکبان s به‌عنوان ناوگان غیرموتوری از معبر a

NCR نرخ پوشش گرهی مسیر خدمت‌رسانی

ASR نرخ پوشش برداری مسیر خدمت‌رسانی

SD حداقل مسافت کل طی شده توسط پاکبان‌ها به‌عنوان ناوگان غیرموتوری در مسیر خدمت‌رسانی

$TDis$ حداقل مسافت کل طی شده توسط ناوگان‌های موتوری در مسیر خدمت‌رسانی

$NFCap$ ظرفیت خالی ناوگان‌های موتوری در طی دوره

$UCap_f$ ظرفیت استفاده شده ناوگان موتوری f درطی دوره

$InTime_{fo}$ زمان ورود ناوگان موتوری f به گره o

$InTimeS_{sa}$ زمان ورود پاکبان s غیرموتوری به معبر a

$ExTime_{fo}$ زمان خروج ناوگان موتوری f از گره o

$ExTimeS_{sa}$ زمان خروج پاکبان s غیرموتوری از منطقه a

$TardF_{fo}$ تعداد پنجره زمانی که ناوگان موتوری f برای خدمت‌رسانی، دیرتر از پنجره زمانی ریختن زباله، به گره o مراجعه می‌کند

$EarlF_{fo}$ تعداد پنجره زمانی که ناوگان موتوری f برای خدمت‌رسانی، زودتر از پنجره زمانی ریختن زباله، به گره o مراجعه می‌کند

$TardS_{sa}$ تعداد پنجره زمانی که پاکبان غیرموتوری s برای خدمت‌رسانی، دیرتر از پنجره زمانی ریختن زباله به معبر a مراجعه می‌کند

$EarlS_{sa}$ تعداد پنجره زمانی که پاکبان غیرموتوری s برای خدمت‌رسانی، زودتر از پنجره زمانی ریختن زباله به معبر a مراجعه می‌کند

$WDegOf_{pt}$ میزان فسادپذیری زباله انباشت شده در گره p در پنجره زمانی t براساس تعداد پنجره زمانی تاخیر در جمع‌آوری زباله

$WDegTo_{pt}$ میزان فسادپذیری زباله جمع‌آوری شده از گره p در پنجره زمانی t براساس تعداد پنجره زمانی تاخیر در انتقال زباله به ایستگاه دپو و بازیافت

$AveWDegOf$ میانگین میزان فسادپذیری زباله‌های انباشت شده براساس تعداد پنجره زمانی تاخیر در جمع‌آوری

$AveWDegTo$ میانگین میزان فسادپذیری زباله‌های جمع‌آوری شده در انتقال زباله به ایستگاه دپو و بازیافت

توابع هدف

$$Min\ Z_1 = \sum_{p\in H}\sum_{w\in W}\left(SCost_{wp}\times NX_{wp}\right) + \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}\sum_{p\in H}\left(FCost_f \times YF_{fop}\times PtoP_{op}\right) + \sum_{d\in D}\sum_{f\in F}\left(DCost_d \times YD_{df}\times LoTimeD_d\right) + \sum_{s\in S}\sum_{f\in F}\left(LCost\times YMS_{sf}\times LoTimeS_s\right) \quad (1)$$

$$Max\ Z_2 = (\alpha_1\times GCR) + (\alpha_2\times NCR) + (\alpha_3\times ASR) \quad (2)$$

$$Max\ Z_3 = \beta_1\times\left(1-\left(\frac{\sum_{p\in H}\sum_{w\in W}\left(SPlty_{pw}\times NX_{wp}\right)}{\sum_{p\in H}\sum_{w\in W}NX_{wp}}\right)\right) + \beta_2\times\left(\frac{\sum_{p\in H}\sum_{w\in W}\left(SSafe_w\times NX_{wp}\right)}{\sum_{p\in H}\sum_{w\in W}NX_{wp}}\right) \quad (3)$$

$$Max\ Z_4 = \omega_1\times\left(\left(\frac{\sum_{s\in S}\sum_{a\in K}(SServe_{sa}\times PA_a)}{\sum_{a\in K}PA_a}\right) + \left(\frac{\sum_{f\in F}\sum_{p\in H}\sum_{a\in K}\left(FServe_{fp}\times PtoA_{pa}\times PA_a\right)}{\sum_{p\in H}\sum_{a\in K}\left(PtoA_{pa}\times PA_a\right)}\right)\right) + \omega_2 \times\left(\left(\frac{\sum_{f\in F}\sum_{p\in H}\sum_{\substack{t\in T\\ t=In\theta_{fp}}}\left(WPerio_t\times FServe_{fp}\right)}{\sum_{t\in T}WPerio_t}\right) + \left(\frac{\sum_{s\in S}\sum_{a\in K}\sum_{\substack{t\in T\\ t=In\delta_{sa}}}\left(WPerio_t\times SServe_{sa}\right)}{\sum_{t\in T}WPerio_t}\right)\right) \quad (4)$$

$$Min\ Z_5 = (\gamma_1\times AveWDegOf) + (\gamma_2\times AveWDegTo) \quad (5)$$

$$Min\ Z_6 = \varphi_1 \times \left(\frac{NFCap}{TDis}\right) + \varphi_2 \times \left(\frac{\sum_{f\in F}\sum_{o\in H} EarlF_{fo}}{\sum_{f\in F} UCap_f}\right) \quad (6)$$

محدودیت‌ها

$$\sum_{f\in F} FServe_{fp} \le 1 \qquad \forall p \in H \quad (7)$$

$$\sum_{s\in S} SServe_{sa} \le 1 \qquad \forall a \in K \quad (8)$$

$$\sum_{f\in F} YMS_{sf} \le 1 \qquad \forall s \in S \quad (9)$$

$$\sum_{s\in S}\sum_{f\in F} YMS_{sf} \le SNum \quad (10)$$

$$\sum_{s\in S} YMS_{sf} \ge NSW_f \qquad \forall f \in F \quad (11)$$

$$\sum_{a\in K} SServe_{sa} + \sum_{f\in F} YMS_{sf} \le 1 \qquad \forall s \in S \quad (12)$$

$$\sum_{f\in F} YD_{df} \le 1 \qquad \forall d \in D \quad (13)$$

$$\sum_{d\in D}\sum_{f\in F} YD_{df} \le DNum \quad (14)$$

$$\left(\left(\sum_{d\in D} YD_{df} \times \sum_{s\in S} YMS_{sf}\right) - \sum_{o\in H} FStart_{fo}\right) \ge 0 \qquad \forall f \in F \quad (15)$$

$$\left(\sum_{a\in K} SServe_{sa}\right) - SStart_{so} \ge 0 \quad \forall s \in S\ ;\ \forall o \in H \quad (16)$$

$$\left(1 - \left[1 - \frac{\left(\left(\sum_{i\in I}(NB_i \times BtoP_{ip})\right) + (PtoA_{pa} \times AA_a \times Sbag)\right)}{(SCap_w \times NX_{pw})}\right]\right) \ge X_{pw} \qquad \forall p \in H;\ \forall w \in W \quad (17)$$

$$LoTimeD_d \le Tmax \qquad \forall d \in D \quad (18)$$

$$LoTimeD_s \le Tmax \qquad \forall s \in S \quad (19)$$

$$UCap_f \le FCap_f \qquad \forall f \in F \quad (20)$$

$$\left(\left[\frac{UCap_f}{(\mu_f \times FCap_f)}\right] - FStop_{fo}\right) \ge 0 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \quad (21)$$

$$\left(\left(\sum_{o\in H} YF_{fop} + \sum_{q\in H} YF_{fpq}\right) - FServe_{fp}\right) \ge 0 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \quad (22)$$

$$\sum_{o\in H} FStart_{fo} \le 1 \qquad \forall f \in F \quad (23)$$

$$\sum_{o\in H} FStop_{fo} \le 1 \qquad \forall f \in F \quad (24)$$

$$\left(\sum_{o\in H} FStop_{fo} - \sum_{o\in H} FStart_{fo}\right) \ge 0 \qquad \forall f \in F \quad (25)$$

$$\left(FStop_{fo} \times FStart_{fo}\right) = 0 \quad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \quad (26)$$

$$\left(FServe_{fo} - FStart_{fo}\right) \ge 0 \quad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \quad (27)$$

$$\left(FServe_{fo} - FStop_{fo}\right) \ge 0 \quad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in \square \quad (28)$$

$$\left(\sum_{q\in H} YF_{fpq} - \left(\left(\sum_{o\in H} YF_{fop}\right) \times \left(1 - \left(FStop_{fp} \times FStart_{fp}\right)\right)\right)\right) \ge 0\ \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \quad (29)$$

$$\left(\sum_{o\in H} YF_{fop} - \left(\left(\sum_{q\in H} YF_{fpq}\right) \times \left(1 - \left(FStop_{fp} \times FStart_{fp}\right)\right)\right)\right) \ge 0\ \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \quad (30)$$

$$\left(\left(Traf_{af} \times PtoA_{pa}\right) - \sum_{o \in H} YF_{fop}\right) \geq 0 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{31}$$

$$\left(FStart_{fp} \times \sum_{o \in H} YF_{fop}\right) = 0 \quad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{32}$$

$$\left(FStop_{fp} \times \sum_{q \in H} YF_{fpq}\right) = 0 \quad \forall f \in F\ ;\ \forall q \in H \tag{33}$$

$$\left(\left(\sum_{q \in H} YF_{fpq}\right) - FStart_{fp}\right) \geq 0 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{34}$$

$$\left(\left(\sum_{o \in H} YF_{fop}\right) - FStop_{fp}\right) \geq 0\ \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{35}$$

$$\sum_{o \in H} YF_{fop} \leq 1 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{36}$$

$$\sum_{q \in H} YF_{fpq} \leq 1 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{37}$$

$$InTime_{fo} = TStartF_{fo} \qquad \forall o \in H\ ;\ \forall f \in F\ , FStart_{fo} = 1 \tag{38}$$

$$ExTime_{fo} = InTime_{fo} + SerTF_{fo} \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \tag{39}$$

$$\sum_{w \in W} X_{ow} \leq 1 \qquad \forall o \in H \tag{40}$$

$$ExTime_{fo} \leq Tmax \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \tag{41}$$

$$Ex\theta_{fo} = \left[\left(\frac{ExTime_{fo}}{(Tmax/NumWin)}\right)\right] + 1 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H \tag{42}$$

$$InTime_{fp} = YF_{fop} \times \left(ExTime_{fo} + MoTime_{fop}\right) \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o,p \in H \tag{43}$$

$$In\theta_{fp} = \left[\left(\frac{InTime_{fp}}{(Tmax/NumWin)}\right)\right] + 1 \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall p \in H \tag{44}$$

$$MoTime_{fop} = YF_{fop} \times PtoP_{op} \times TG_f \times \sum_{a \in K}\left(PtoA_{oa} \times (1 + MTraf_{at})\right) \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o,p \in H\ ;\ \forall t \in T, t = Ex\theta_{fo} \tag{45}$$

$$TardF_{fo} = In\theta_{fo} - Throw_o \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H\ , In\theta_{fo} > Throw_o\ , FServe_{fo} = 1 \tag{46}$$

$$EarlF_{fo} = Throw_o - In\theta_{fo} \qquad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H\ , In\theta_{fo} < Throw_o\ , FServe_{fo} = 1 \tag{47}$$

$$InTimeS_{sa} = TStartS_{sa} \qquad \forall a \in K\ ;\ \forall s \in S\ , SStart_{so} = 1\ , PtoA_{oa} = 1 \tag{48}$$

$$\sum_{o \in H} SStart_{so} \leq 1 \qquad \forall s \in S \tag{49}$$

$$ExTimeS_{sa} = InTimeS_{sa} + SerTS_{sa} \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a \in K \tag{50}$$

$$ExTimeS_{sa} \leq Tmax \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a \in K \tag{51}$$

$$Ex\delta_{sa} = \left[\left(\frac{ExTimeS_{sa}}{(Tmax/NumWin)}\right)\right] + 1 \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a \in K \tag{52}$$

$$InTimeS_{sb} = YS_{abs} \times ExTimeS_{sa} \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a,b \in K \tag{53}$$

$$In\delta_{sb} = \left[\left(\frac{InTimeS_{sb}}{(Tmax/NumWin)}\right)\right] + 1 \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall b \in K \tag{54}$$

$$Aneig_{ab} - YS_{abs} \geq 0 \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a,b \in K \tag{55}$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1 \tag{56}$$

$$\beta_1 + \beta_2 = 1 \tag{57}$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1 \tag{58}$$

$$\gamma_1 + \gamma_2 = 1 \tag{59}$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1 \tag{60}$$

$$LoTimeS_s = \left(\left(1 - min\left(\sum_{f\in F} YMS_{sf}, 1\right)\right) \times \sum_{a\in K}(SServe_{sa} \times SerTS_{sa})\right) + \left(\sum_{f\in F}\sum_{o\in H}(YMS_{sf} \times SerTF_{fo}) + \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}\sum_{p\in H}(YMS_{sf} \times MoTime_{fop})\right) \quad \forall s \in S \tag{61}$$

$$LoTimeD_d = \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}(YD_{df} \times SerTF_{fo}) + \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}\sum_{p\in H}(YD_{df} \times MoTime_{fop}) \quad \forall d \in D \tag{62}$$

$$GCR = \frac{GC}{TG} \tag{63}$$

$$TG = \sum_{i\in I} NB_i + \sum_{a\in K}(AA_a \times Sbag) \tag{64}$$

$$GC = \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}\sum_{w\in W}\left(FServe_{fo} \times X_{ow} \times \left(\sum_{i\in I}(NB_i \times BtoP_{io} \times (1 - TB_i))\right)\right) + \sum_{f\in F}\sum_{s\in S}\sum_{a\in K}\sum_{o\in H}\left(FServe_{fo} \times \left(1 - \sum_{w\in W} X_{ow}\right) \times \left(\left(1 - min\left(max\left((In\theta_{fo} - Throw_o + 1), 0\right), 1\right)\right) \times \left(\sum_{i\in I}(NB_i \times BtoP_{io})\right) + \left(1 - \left(min\left(max\left((In\delta_{sa} - In\theta_{fo} + 1), 0\right), 1\right)\right)\right) \times (AA_a \times PtoA_{oa} \times Sbag)\right)\right) \tag{65}$$

$$NCR = \frac{\sum_{f\in F}\sum_{o\in H}(FServe_{fo})}{P} \tag{66}$$

$$ASR = \frac{\sum_{s\in S}\sum_{a\in K}(SServe_{sa})}{K} \tag{67}$$

$$SD = \sum_{s\in S}\sum_{a\in K}(LA_a \times SServe_{sa}) \tag{68}$$

$$TDis = \sum_{f\in F}\sum_{o\in H}\sum_{p\in H}(YF_{fop} \times PtoP_{op}) \tag{69}$$

$$NFCap = 1 - \left(\frac{GC}{\sum_{f\in F} FCap_f}\right) \tag{70}$$

$$UCap_f = \sum_{o\in H}\sum_{w\in W}\left(FServe_{fo} \times X_{ow} \times \left(\sum_{i\in I}(NB_i \times BtoP_{io} \times (1 - TB_i))\right)\right) + \sum_{s\in S}\sum_{a\in K}\sum_{o\in H}\left(FServe_{fo} \times \left(1 - \sum_{w\in W} X_{ow}\right) \times \left(\left(1 - \min\left(\max\left((In\theta_{fo} - Throw_o + 1), 0\right), 1\right)\right) \times \left(\sum_{i\in I}(NB_i \times BtoP_{io})\right) + \left(1 - \left(\min\left(\max\left((In\delta_{sa} - In\theta_{fo} + 1), 0\right), 1\right)\right)\right) \times (AA_a \times PtoA_{oa} \times Sbag)\right)\right) \quad \forall f \in F \tag{71}$$

(72)

$$SerTF_{fo} = \Bigg(\Bigg(\Big(min\Big(max\Big(\big(In\theta_{fo} - Throw_o + 1 \big), 0 \Big), 1 \Big) \Big) \times \Bigg(\Bigg(\Bigg(FServe_{fo} \times (1 - \sum_{w \in W} X_{ow}) \times \Bigg(\Bigg(\Big(\frac{\sum_{i \in I} (NB_i \times BtoP_{io})}{NSW_f \times Nmg} \Big) + \Bigg(\Big(\frac{AA_a \times Sbag}{NSW_f \times Nmg} \Big) \times \Big(1 - \Big(min\Big(max\Big(\big(In\delta_{sa} - In\theta_{fo} + 1 \big), 0 \Big), 1 \Big) \times min\big(max\big((In\delta_{sa} - Throw_o + 1), 0 \big), 1 \big) \Big) \Big) \Big) \times TGrasp \Bigg) \Bigg) \Bigg) + \Bigg(\Bigg(FServe_{fo} \times \Big(\frac{\sum_{i \in I} (NB_i \times BtoP_{io} \times TB_i)}{NSW_f \times Nmg} \Big) \times (2 \times Ave_o \times TWalk) \Big) \times \Big(min\Big(max\Big(\big(In\delta_{sa} - In\theta_{fo} + 1 \big), 0 \Big), 1 \Big) \times min\big(max\big((In\delta_{sa} - Throw_o + 1), 0 \big), 1 \big) \Big) \Bigg) \Bigg) \Bigg) + \Big(\sum_{w \in W} \big(FServe_{fo} \times X_{ow} \times NX_{ow} \times RWtime_W \big) \Big) \Bigg) \quad \forall f \in F\ ;\ \forall o \in H\ ;\ \forall a \in K\ ;\ \forall s \in S\ , PtoA_{oa} = 1$$

(73)

$$WDegOf_{pt} = \left(\frac{100}{\left(1 + \left(\left(\frac{(100 - IntSpo)}{IntSpo} \right) \times e^{-(RSpo \times t)} \right) \right)} \right) \quad \forall p \in H; \forall t \in T, t = TardF_{fp}; \forall f \in F, FServe_{fp} = 1$$

(74)

$$AveWDegOf = \left(\frac{\sum_{p \in H} \sum_{t \in T} WDegOf_{pt}}{\sum_{p \in H} \sum_{f \in F} FServe_{pt}} \right) \quad t = TardF_{fp}\ , FServe_{fp} = 1$$

(75)

$$WDegTo_{pt} = \left(\frac{100}{\left(1 + \left(\left(\frac{(100 - IntSpo)}{IntSpo} \right) \times e^{-(RSpo \times t)} \right) \right)} \right) \quad \forall p \in H; \forall t \in T, t = Ex\theta_{fp}; \forall f \in F, FStop_{fp} = 1$$

(76)

$$AveWDegTo = \left(\frac{\sum_{p \in H} \sum_{t \in T} WDegTo_{pt}}{\sum_{p \in H} \sum_{f \in F} FServe_{pt}} \right) \quad t = Ex\theta_{fp}\ , FStop_{fp} = 1$$

(77)

$$TardS_{sa} = In\delta_{sa} - Throw_o \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a \in K\ , In\delta_{sa} > Throw_o\ , SServe_{sa} = 1\ , PtoA_{oa} = 1$$

(78)

$$EarlS_{sa} = Throw_o - In\delta_{sa} \qquad \forall s \in S\ ;\ \forall a \in K\ , In\delta_{sa} < Throw_o\ , SServe_{sa} = 1\ , PtoA_{oa} = 1$$

$$SerTS_{sa} = SServe_{sa} \times (1 + NTraf_{at}) \times \left(\left(\frac{AA_a}{TSweep_s} \right) + \left((AA_a \times Sbag) \times TPack \right) + \left(\left(\sum_{o \in H} \left(\left(1 - \sum_{w \in W} X_{ow} \right) \times PtoA_{oa} \times \left(1 - \sum_{f \in F} FServe_{fo} \right) \right) \right) \times \left(\left(\left(\left(\frac{(AA_a \times Sbag)}{Nmg} \right) + \left(\left(\frac{\sum_{i \in I} (NB_i \times BtoP_{io})}{Nmg} \right) \times \left(min\left(max\left((In\delta_{sa} - Throw_o + 1), 0 \right), 1 \right) \right) \right) \right) \times TGrasp \right) + \left(\left(\frac{(AA_a \times Sbag) + \sum_{i \in I} (NB_i \times BtoP_{io} \times TB_i)}{Tuck} \right) \times (2 \times Ave_o \times TWalk) \times \left(min\left(max\left((In\delta_{sa} - Throw_o + 1), 0 \right), 1 \right) \right) \right) \right) \right) \quad \forall s \in S \; ; \; \forall a \in K \; ; \; \forall t \in T, t = In\delta_{sa} \tag{79}$$

شرح روابط مدل

در مدل ریاضی مطروحه، روابط ۱ تا ٦ معرف توابع هدف مدل می‌باشند و به‌ترتیب بیانگر حداقل‌سازی هزینه‌ها، حداکثرسازی کارایی جمع‌آوری زباله، حداکثرسازی کیفیت تسهیلات انباشت مکان‌یابی شده، حداکثرسازی اولویت‌های زمانی و منطقه‌ای در جمع‌آوری زباله‌ها و جاروب مناطق، حداقل‌سازی فسادپذیری زباله در اثر تاخیر در جمع‌آوری و انتقال به ایستگاه بازیافت، حداقل‌سازی ظرفیت خالی ناوگان و تاخیرها در جمع‌آوری زباله‌ها می‌باشند.

روابط ۷ و ۸ ایجاب می‌کند که هر گره و هر منطقه تنها یک‌بار سرویس شوند. رابطه ۹، بیان می‌کند که هر پاکبان تنها به یک ناوگان موتوری تخصیص می‌یابد. رابطه ۱۰، تضمین می‌کند که تعداد پاکبان‌های تخصیص‌یافته از حد مجاز بیشتر نباشد. رابطه ۱۱، حداقل پاکبان مورد نیاز برای هر ناوگان موتوری را مطرح می‌کند. رابطه ۱۲، تضمین می‌کند که هر پاکبان یا به ناوگان موتوری تخصیص می‌یابد یا به منطقه. در رابطه ۱۳، هر راننده تنها به یک ناوگان موتوری تخصیص می‌یابد. در رابطه ١٤، تعداد رانندگان تخصیص‌یافته از حد مجاز نباید بیشتر باشد. در رابطه ۱۵، تخصیص راننده و پاکبان به ناوگان موتوری منوط به حرکت ناوگان موتوری است. رابطه ١٦، شروع تور پاکبان غیرموتوری را همان منطقه مربوط به گره شروع معرفی می‌کند. رابطه ۱۷، ظرفیت تسهیلات انباشت زباله را مبتنی‌بر مقدار زباله برآوردی در هر گره و منطقه مربوطه می‌کند تا از اتلاف در منابع جلوگیری شود. روابط ۱۷ و ۱۸، زمان کار را برای پاکبان‌ها و رانندگان محدود به حداکثر زمان دردسترس می‌کند. در رابطه ۲۱، ضریب آستانه ظرفیت ناوگان موتوری معرفی می‌شود. رابطه ۲۲، ارتباط بین حرکت و سرویس‌دهی ناوگان موتوری را تضمین می‌کند.

در روابط ۲۲ و ۲۳، برای هر ناوگان موتوری حداکثر یک گره شروع و پایان لحاظ می‌گردد. در رابطه ۲۵، پایان تور پس از شروع آن را برای ناوگان موتوری لحاظ می‌کند. در رابطه ٢٦، یک گره نمی‌تواند

هم‌زمان نقطه شروع و پایان تور باشد. روابط ۲۶ و ۲۷، سرویس‌دهی در گره‌های شروع و پایان تور تضمین می‌کند. روابط ۲۸ و ۲۹، پیوستگی مسیر ناوگان موتوری را در هر گره از تور تضمین می‌کند. رابطه ۳۱، ممنوعیت تردد ناوگان موتوری در مناطق خاص را بیان می‌کند. رابطه ۳۲، تضمین می‌کند که از هیچ گرهی به گره شروع تور نباید ورودی صورت بگیرد. رابطه ۳۳ نیز به طور مشابه تضمین می‌کند که از گره پایان به هیچ گرهی نباید خروجی صورت بگیرد. رابطه ۳٤ بیانگر این است که از گره شروع حتما باید خروج انجام شود و به طریق مشابه، رابطه ۳۵ نیز تضمین می‌کند که حتما باید به گره پایان ورود صورت بپذیرد. روابط ۳٦ و ۳۷ تضمین می‌کنند هر ناوگان موتوری تنها یک بار وارد هر گره شده و تنها یک بار از هر گره خارج شود. رابطه ۳۸، زمان ورود ناوگان موتوری به گره شروع را بیان می‌کند و در رابطه ۳۹، زمان خروج ناوگان موتوری از یک گره محاسبه می‌شود. با رابطه ٤۰، هر گره حداکثر یک نوع تسهیل انباشت زباله می‌تواند داشته باشد. طبق رابطه ٤۱، زمان خروج ناوگان موتوری از یک گره نباید از حداکثر زمان مجاز بیشتر باشد. رابطه ٤۲، پنجره زمانی خروج ناوگان موتوری را محاسبه می‌کند. در رابطه ٤۳، زمان ورود ناوگان موتوری به گره بعدی حساب می‌شود و رابطه ٤٤، پنجره زمانی ورود ناوگان موتوری را مشخص می‌کند. مدت زمان جابجایی ناوگان موتوری در رابطه ٤۵ محاسبه می‌شود. از رابطه ٤٦، تاخیر ناوگان موتوری در سرویس‌دهی به گره شمارش می‌شود. مطابق رابطه ٤۷، زودتر از موقع رسیدن ناوگان موتوری در سرویس‌دهی به گره محاسبه می‌شود. در رابطه ٤۸، زمان ورود پاکبان غیرموتوری به منطقه شروع فعالیتش معرفی می‌شود. براساس رابطه ٤۹، هر پاکبان غیرموتوری حداکثر یک گره شروع خواهد داشت. از رابطه ۵۰، زمان خروج پاکبان غیرموتوری از منطقه محاسبه می‌شود. بنابر رابطه ۵۱، تضمین می‌شود که زمان خروج پاکبان غیرموتوری از یک منطقه از حداکثر زمان مجاز بیشتر نباشد. با رابطه ۵۲، پنجره زمانی خروج پاکبان غیرموتوری شمرده می‌شود و زمان ورود پاکبان غیرموتوری به منطقه بعدی در رابطه ۵۳ محاسبه می‌گردد. در رابطه ۵٤، پنجره زمانی ورود پاکبان غیرموتوری به یک منطقه را می‌توان یافت. هر پاکبان غیرموتوری امکان ارتباط مستقیم بین مناطق را از رابطه ۵۵ متوجه خواهد شد.

روابط ۵٦ تا ۷۹ به‌منظور ساده‌سازی و روان‌سازی خواندن مدل تعریف گردیده‌اند. به‌طوری‌که روابط ۵٦ تا ٦۰ ضرایب نرمال‌سازی در توابع هدف هستند و میزان تاثیر هر کدام از زیربخش‌های هر یک از توابع هدف را در رابطه مربوطه نشان می‌دهد. در روابط ٦۱ و ٦۲، زمان کارکرد هر پاکبان و هر راننده مطابق برنامه‌ریزی مدل محاسبه می‌شود. نرخ عملکرد جمع‌آوری زباله در رابطه ٦۳ معین می‌گردد. کل زباله تولیدی و کل زباله جمع‌آوری شده در روابط ٦٤ و ٦۵ مشخص می‌شود. نرخ پوشش گرهی و منطقه‌ای نیز در روابط ٦٦ و ٦۷ حساب می‌گردد. حداقل مسافت طی‌شده توسط پاکبان‌های غیرموتوری در رابطه ٦۸ و حداقل مسافت طی‌شده توسط ناوگان‌های موتوری در رابطه ٦۹ سنجیده می‌شود.

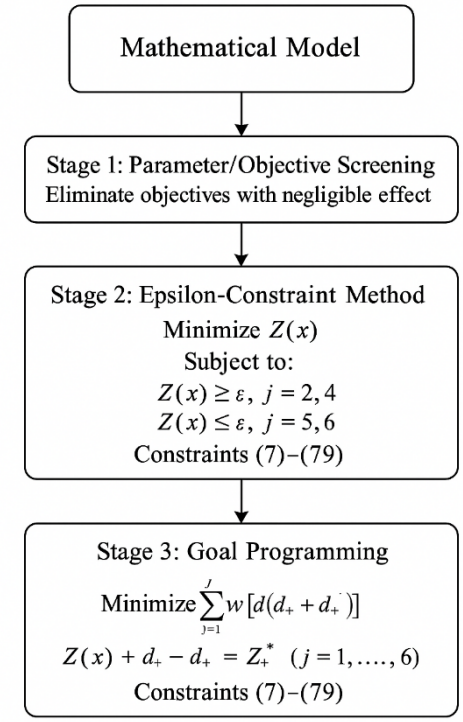
در رابطه ۷۰، میزان ظرفیت خالی ناوگان‌های موتوری و در رابطه ۷۱، ظرفیت استفاده‌شده هر ناوگان موتوری ملاحظه می‌شود. رابطه ۷۲ نیز زمان سرویس‌دهی یک ناوگان موتوری در یک گره را به تصویر می‌کشد. میزان فساد برآوردی زباله‌های جمع‌آوری شده از هر گره منطبق بر تعداد پنجره زمانی تاخیر در سرویس‌دهی به آن گره در رابطه ۷۳ و همچنین میانگین فساد ایجاد شده در زباله‌های انباشت‌شده جمع‌آوری شده از هر گره منطبق بر تعداد پنجره زمانی تاخیر در سرویس‌دهی به آن گره در رابطه ۷٤ در نظر گرفته می‌شود. در رابطه ۷۵، میزان فساد برآوردی در زباله‌های جمع‌آوری‌شده در طی انتقال به ایستگاه بازیافت براساس تعداد پنجره زمانی گذشته از زمان انباشت در هر گره معرفی می‌شود و میانگین فساد ایجادی در زباله‌های جمع‌آوری‌شده در طی انتقال به ایستگاه بازیافت براساس تعداد پنجره زمانی گذشته از زمان انباشت در هر گره از رابطه ۷٦ شناخته می‌شود. از رابطه ۷۷، تاخیر پاکبان غیرموتوری در سرویس‌دهی به هر منطقه شناسایی می‌گردد. در رابطه ۷۸ نیز، زودتر از موقع رسیدن پاکبان غیرموتوری در سرویس‌دهی به هر منطقه تشخیص داده می‌شود و در نهایت، رابطه ۷۹، معرف زمان سرویس‌دهی پاکبان غیرموتوری در هر منطقه خواهد بود.

روش حل

با توجه به ماهیت چندهدفه و ساختار غیرخطی عددصحیح مدل ریاضی پیشنهادی، یک چارچوب سه‌مرحله‌ای برای حل مدل ارائه شده است. در مرحله اول با استفاده از غربالگری و تحلیل حساسیت، اهداف اساسی شناسایی شده تا از پیچیدگی محاسباتی روش اپسیلون–محدودیت در مراحل بعدی کاسته شود. در مرحله دوم، برای تولید جبهه پارتو از راه تبدیل اهداف باقیمانده به محدودیت‌های کنترل‌شده، روش اپسیلون–محدودیت به کار گرفته می‌شود و در مرحله آخر با بهره‌گیری از برنامه‌ریزی آرمانی و وزن‌دهی متناسب به اهداف منتخب، نقطه بهینه جبهه پارتو با حداقل‌سازی انحراف از مقادیر آرمانی منتج از مرحله دوم حاصل

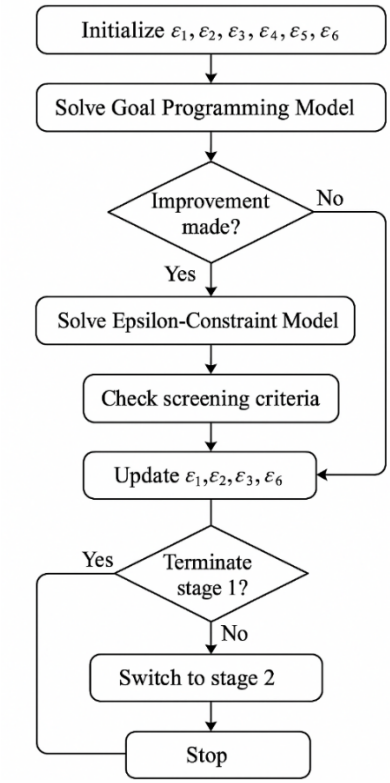
می‌شود. این رویکرد ترکیبی، هم کارایی محاسباتی را حفظ می‌کند و هم کیفیت راه‌حل‌های چندهدفه را تضمین می‌نماید.

در شکل‌های ۲ و ۳، دیاگرام فرآیند روش حل و فلوچارت روش حل مدل به تصویر کشیده شده است. این الگوریتم در ابتدا یک مقدار اولیه ϵ را برای هر یک از توابع هدف، در محدوده قابل دستیابی آن تابع هدف، تعیین نموده و با لحاظ آن به‌عنوان مقادیر آرمانی اولیه، تابع هدف آرمانی اولیه را ساخته و حل می‌نماید.

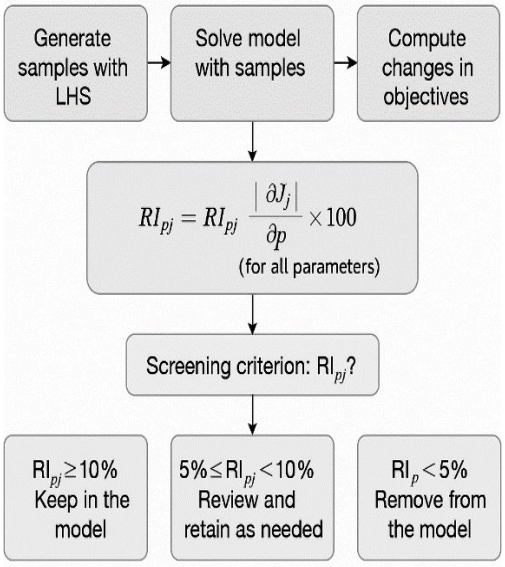


شکل۲. فرآیند روش حل

چنانچه با همین مقادیر ϵ یک راه حل با کم‌ترین انحراف از مقادیر آرمانی حاصل شود، با انتخاب یکی از توابع هدف به‌عنوان تابع اصلی و تبدیل مابقی اهداف به محدودیت، مدل را به روش اپسیلون–محدودیت حل نموده و به‌این ترتیب یک نقطه از جبهه پارتو تولید می‌شود. در ادامه برای کاهش پیچیدگی مسئله و تمرکز بر مؤثرترین عوامل نوبت به بررسی معیار غربالگری پارامترها و اهداف غیرحساس و کم‌اثر مدل براساس شاخص اثر نسبی است (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۳). به‌طوری‌که اگر مقدار شاخص اثر نسبی یک پارامتر و یا یک تابع هدف خیلی کمتر از بقیه پارامترها و یا توابع هدف باشد، می‌توان در گام بعدی الگوریتم از آن موقتا صرف‌نظر کرد تا سرعت حل مدل در مراحل بعدی بیشتر شود (شکل٤). پس از گام غربالگری، با بروزرسانی مقادیر ϵ نسبت به سنجش تابع هدف آرمانی اقدام نموده و چنانچه شرط توقف تعداد تکرار یا مقادیر مطلوب برای همه اهداف حاصل نشد، نسبت به تکرار گام‌های بالا اقدام می‌شود و در غیر این‌صورت، مدل را به روش اپسیلون–محدودیت برای تولید جبهه کامل پارتو حل نموده و در نهایت با توجه به این‌که در مرحله نهایی، جبهه پارتوی معنادارتر و با کیفیت‌تری در روش اپسیلون–محدودیت حاصل گردید، خروجی تابع هدف آرمانی در مرحله نهایی، راه‌حل خوب‌تر و متعادل‌تری خواهد بود.



شکل۳. فلوچارت روش حل مدل



شکل٤. گام‌های مرحله غربالگری

نتایج عددی

در این بخش یک مثال عددی با ابعاد ۵ معبر، ۱۰ گره، ۱ ناوگان موتوری مکانیزه، ۱ ناوگان موتوری غیرمکانیزه، ۵ پاکبان، ۲۵شهروند و۳ پنجره زمانی، درنرم‌افزار Lingo.9 کدنویسی شده و در کامپیوتری با مشخصات Core(TM) i5-6200U CPU @ 2.30GHz 2.40 GHz و Ram 8.00 GB و Windows 10 Enterprise حل گردید.

برخی از پارامترهای مهم مثال عددی مورد بررسی در این پژوهش در ادامه آمده است. پارامترهای جغرافیایی شامل طول معابر (مقادیر تصادفی بین ۲ تا ۵ کیلومتر)، سطح معابر (مقادیر تصادفی بین ۱ تا ۳ کیلومتر مربع) و فاصله بین گره‌ها (ماتریس۱۰×۱۰ با مقادیر تصادفی ۰/۲ تا ۰/۷۵ کیلومتر).

پارامترهای زباله و شهروندان شامل میانگین زباله تولیدی شهروندان (مقادیر تصادفی ۱ تا ٤ بسته) و وجود سطل زباله دم درب (٦۰درصد شهروندان دارای سطل= مقدار ۱)، (٤۰درصد بدون سطل= مقدار ۰)). پارامترهای زمانی شامل پنجره‌های زمانی (توزیع تصادفی بین ۱ تا ۳ (صبح، ظهر، عصر))، حداکثر زمان کار (۱۲ ساعت، معادل ۳ پنجره ٤ ساعته).

پارامترهای ناوگان و پاکبان شامل هزینه ناوگان (مکانیزه ۱۰۰ و غیرمکانیزه ۵۰ واحد پولی/کیلومتر)، ظرفیت ناوگان (مکانیزه ۳۰ و غیرمکانیزه ۲۰ بسته زباله) و کارایی پاکبان (مقادیر تصادفی ۰/۱ تا ۰/۳ ساعت/کیلومتر مربع).

پارامترهای زیست‌محیطی شامل نرخ فسادپذیری (۰/۲ یعنی ۲۰درصد افزایش فساد به ازای هر پنجره تأخیر) و اولویت پاکسازی معابر (مقادیر تصادفی ۱ تا ۵ (۵ بالاترین اولویت)).

غربالگری اهداف، با استفاده از تحلیل حساسیت چند پارامتری انجام شد و اهداف Z1، Z2 و Z3 به‌ترتیب با شاخص اثر نسبی ۰/۳۲، ۰/۲۸ و ۰/۲۵ به‌عنوان اهداف کلیدی به‌ترتیب حداقل‌سازی هزینه‌ها (Z1) با بیشترین تأثیر بر تصمیم‌گیری، حداکثرسازی کارایی جمع‌آوری (Z2) با ارتباط مستقیم با پوشش خدمت‌رسانی و حداقل‌سازی فسادپذیری (Z5) با اهمیت زیست‌محیطی، رتبه‌بندی شدند. سایر اهداف به‌دلیل شاخص اثر نسبی کمتر از ۰/۱۵ برای ادامه گام‌ها از مدل کنار گذاشته شدند. تولید جبهه پارتو در روش اپسیلون-محدودیت با درنظر گرفتن تابع اصلی Min Z1 (هزینه) و اهداف ثانویه Z2 و Z5 به‌عنوان محدودیت برای این سه تابع هدف کلیدی صورت پذیرفت. به‌طوری‌که حداقل ۸۰٪ پوشش جمع‌آوری ($Z2 \geq 80\%$) و حداکثر ۱۵٪ فسادپذیری ($Z5 \leq 15\%$) به‌عنوان مقادیر اولیه ϵ تنظیم گردیدند. در ادامه فلوچارت روش حل مدل، با بروزرسانی مقادیر ϵ برای توابع هدف کلیدی، مقادیر آرمانی مدل در گام نهایی برای توابع به‌ترتیب ۱۱۰۰ به‌عنوان حداقل هزینه ممکن، ۹۰درصد به‌عنوان حداکثر کارایی و ۱۰درصد به‌عنوان حداقل فساد، محاسبه شدند. با استفاده از روش وزن‌دهی، مقادیر ۰/۵ برای تابع هزینه، ۰/۳ برای تابع کارایی و ۰/۲ برای تابع فسادپذیری به‌عنوان اوزان تابع هدف آرمانی لحاظ شده و در نهایت با حل تابع هدف موزون آرمانی، مقادیر توابع هدف کلیدی این مدل به‌ترتیب ۱۱۷۵ برای تابع هزینه، ۸۷ درصد برای تابع کارایی و ۱۱ درصد برای تابع فسادپذیری، با کمترین انحراف از مقادیر آرمانی مرحله آخر به‌عنوان راه حل بهینه تعیین گردیدند.

به‌این ترتیب، برخی از نتایجی که با حل مدل پیشنهادی با رویکرد سه مرحله‌ای پیشنهادی در قالب یک مثال عددی، حاصل شد به قرار زیر است.

- ناوگان f1 (مکانیزه) به معابر با اولویت بالا (a1, a3) تخصیص یافت.
- پاکبان s3 به‌دلیل کاهش تاخیر در جمع زباله به معابر با اولویت بالا (a1, a3) تخصیص یافت.
- ناوگان f2 (غیرمکانیزه) به معابر با اولویت پایین (a4, a5) تخصیص یافت.
- پاکبان s1, s2 به معابر کم‌اولویت (a4, a5) برای جاروب دستی اختصاص داده شدند.
- ناوگان f1 در پنجره صبح (t=1) فعال شد تا از فساد زباله‌های تر جلوگیری کند.
- تخصیص پاکبان و ناوگان غیرمکانیزه به معابر با اولویت پایین به‌دلیل کم کردن آلودگی بصری کل می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حل مدل نشان داد که رویکرد ترکیبی پیشنهادی توانسته است ضمن کاهش ۵۰درصدی پیچیدگی و زمان حل مدل، به بهبود هم‌زمان اهداف کلیدی سیستم مدیریت پسماند این پژوهش منجر شود. در حالت بهینه، مدل توانست هزینه‌های عملیاتی را به ۱۱۷۵ واحد پولی کاهش دهد که نشان‌دهنده ۱۲درصد صرفه‌جویی نسبت به حالت پایه است. از سوی دیگر، نرخ جمع‌آوری زباله به ۸۷درصد رسید که بهبود ۱۵درصدی را نسبت به شرایط فعلی نشان می‌دهد. در اهداف زیست‌محیطی نیز مدل موفق شد میزان فسادپذیری

پسماند را تا ۳۵درصد کاهش دهد که تأثیر مستقیمی بر کاهش آلایندگی‌های ناشی از شیرابه و افزایش ارزش بازیافت زباله خواهد داشت. این نتایج با یافته‌های پژوهش‌های مشابه در حوزه بهینه‌سازی سیستم‌های جمع‌آوری پسماند هم‌خوانی دارد.

همچنین، تحلیل جزئیات تخصیص منابع نشان داد که ناوگان مکانیزه به معابر a1 و a3 که دارای اولویت بالاتر و ترافیک کمتر بودند، اختصاص یافت. این تخصیص بهینه موجب کاهش ۲۲درصدی در مسافت طی‌شده و در نتیجه کاهش مصرف سوخت و آلایندگی شد. نتایج همچنین حاکی از آن بود که توزیع پاکبان‌ها در مناطق کم‌اولویت‌تر (a4 و a5) توانست کارایی کلی سیستم را بدون افزایش هزینه‌ها بهبود بخشد. بررسی حساسیت پارامترها نشان داد که تغییرات در هزینه ناوگان و زمان‌بندی جمع‌آوری تأثیر معناداری بر توازن بین اهداف مختلف مدل دارد، به‌طوری‌که افزایش ۱۰درصدی در هزینه ناوگان منجر به کاهش ۵ درصدی در میزان فساد پسماند شد.با وجود عملکرد قوی مدل در قیاس با پژوهش‌های پیشین، مدل حاضر فرض تک‌دوره‌ای بودن را دارد و در افق چنددوره‌ای نیاز به تعدیل خواهد داشت. لذا پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی، مدل به‌صورت چنددوره‌ای توسعه یافته و اثرات فصلی بر فرآیند جمع‌آوری زباله بررسی شود. همچنین، تاثیر زباله‌گردها و ترکیب‌های متنوع زباله نیز می‌تواند واقع‌بینانه‌تر کردن مدل را تسهیل نماید.

٦-مراجع

-انصاری نسب، مسلم و بیدمال، نجمه (۱٤۰۱). شهر سبز: کنکاشی در مدیریت پسماند و بازیافت مناطق ۲۲ گانه شهر تهران، *همایش بین المللی فرصت‌های سرمایه گذاری شهر تهران*، تهران.

- جبارزاده، آرمین، ظهور فاضلی، هانیه، دریانیان، فرزانه و کامران سرمدی (۱۳۹۸). مکانیابی تسهیلات انتقال پسماند با در نظر گرفتن صف ماشین‌های جمع‌آوری و ملاحظات زیست محیطی-اجتماعی، مطالعه موردی: شهر تهران.

-آهنگری، فروغ (۱۳۹٦). نقش ایستگاهای انتقال در بخش جمع آوری و حمل و نقل پسماندهای شهری.

-بهرام‌خواه، م. دوستدار، ا. و میرپادیاف س. ی. (۱٤۰۰). بررسی شاخص‌های مؤثر بر سیستم مدیریت پسماند با رویکردی بر شیوه‌های جمع‌آوری و دفع زباله‌های شهری. *نشریه علمی رویکردهای پژوهشی نوین مدیریت و حسابداری*، ۵(۱۸)، ۱۲۵-۱۳٤.

-تقوی فرد، محمدتقی، موسوی، سیداسماعیل و حیدر، مجتبی و مجتهدی، سیدمحمدحسین (۱۳۸٦). ارائه یک مدل جدید چند هدفه فازی به منظور مکان یابی تسهیلات نامطلوب،*پنجمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع*، تهران.

-حجازی، سیداسداله، کرمی، فریبا و حبیب زاده، سایه (۱٤۰۳). ارزیابی مناطق مناسب برای توسعه فیزیکی در شهر ماکو با استفاده از روش تصمیم‌گیری الکتره – فازی در محیط Arc Gis، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۳۳(۱۲۹)، ۱۳۸-۱۲۱.

doi.10.22131/sepehr.2023.1995613.2966

-رحماندوست، افروز، حافظ الکتب، اشکان، رحمانی پرچیکلایی، بیژن و عزیزی، امیر (۱٤۰۲). طراحی مدل ریاضی چندهدفه استوار مبتنی بر پایداری برای مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری. *مدیریت صنعتی*، ۱۵(٤),٦۸۰۷۰۹.

doi.10.22059/imj.2023.350291.1007997

-رفیعی، رضا، سلمان ماهینی، عبدالرسول، و خراسانی، نعمت اله (۱۳۸۸). ارزیابی محیط زیستی چرخه حیات سامانه مدیریت پسماند شهری (مطالعه موردی: شهر مشهد). علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱٦((ویژه نامه ۲))، ۲۲۰-۲۰۸.

-سیدحسینی، سیدمحمد، کهفی اردکانی، عاطفه، و توکلی مقدم، رضا. (۱۳۹٦). مسائل مکان یابی - مسیریابی: مروری بر مفاهیم، مدل‌ها، روش‌های حل، کاربردها و شکاف های تحقیقاتی. نشریه مهندسی صنایع (دانشکده فنی دانشگاه تهران)، ۵۱(۲)، ۲۵۰-۲۲۳.

-شاهبندرزاده، حمید و کبگانی، محمدحسین (۱٤۰۳). کاربرد رویکرد استوار فازی به منظور مکانیابی - مسیریابی تسهیلات جمع‌آوری پسماندهای شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۵(۳), ۳۸٤۳-۳۸۲۱.

doi.10.22119/jte.2022.366683.2626

-شاهبندرزاده، حمید و کبگانی، محمدحسین (۱٤۰۳). کاربرد رویکرد استوار فازی به منظور مکانیابی - مسیریابی تسهیلات جمع آوری پسماندهای شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک.

-شهپری ثانی، داود و ترابی، فاطمه (۱٤۰٤). گذار شهری و عوامل مؤثر بر پویایی آن در آسیا. *تداوم و تغییر اجتماعی*، ٤(۱), ٦٦-٤٤.

doi.10.22034/jscc.2025.22082.1158

-شهرداری تهران. (۱۳۹۶). سالنامه آماری شهرداری تهران. سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران.

-عیسائی، محمد تقی (۱۳۸۹). بهبود برنامه‌ریزی جمع‌آوری پسماندهای شهری در ابعاد واقعی) مطالعه موردی: شهر تهران. مهندسی صنایع و مدیریت، ۲۶(۲)، ۱۰۶-۹۹.

-غلامپور ارباستان، هومن و رضایی، مسعود (۱۴۰۳). هوشمندسازی مدیریت پسماندهای عادی در کشور. (۱۹۷۲۶). *ماهنامه گزارش‌های کارشناسی مرکز پژوهش های مجلس شورای اسلامی*، ۳۲(۲)، ۱۹۷۲۶.

doi.10.22034/report.2024.16832.1749

- نیسانی سامانی، نجمه، باقری، کیوان، جلوخانی نیارکی، محمدرضا (۱۳۹۸). مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری با ظرفیت محدود نامتقارن و پنجره زمانی، *نشریه علوم و فنون نقشه برداری*، ۹(۳)، ۹۵-۸۵.

-نصیری‌جان‌آقا، محمدرضا (۱۴۰۲). بکارگیری مساله مسیریابی وسایل نقلیه در مکان یابی قرارگیری سطل زباله شهری، *دوازدهمین کنفرانس بین المللی مهندسی صنایع، بهره وری و کیفیت*.

-نوری سپهر، محمد، حاجی، محمدعلی علیرضا، عرب اسماعیلی، امیر، اسکندری، جواد، رودباری، علی اکبر و زارع زاده، الناز (۲۰۲۱). طراحی و امکان‌سنجی فنی - اقتصادی سیستم جمع‌آوری زیرزمینی پسماندهای خانگی در شهر کرج. *مجله دانش و تندرستی در علوم پایه پزشکی*، ۱۶(۱)، ۱۲-۲.

doi.org/10.22100/jkh.v16i1.2614

-Abbasi, E., Khosravani, F., Choobchian, S., & Jalili Ghazizade, M. (2023). A comprehensive study on criteria of sustainable urban waste management system: using content analysis. *Scientific Reports,* 13(1), 22526. **doi.org/10.1038/s41598-023-49187-x**

-Adamu, M. O., Idowu, G., & Okagbue, H. (2022). Developing a Waste Collection Vehicle Routing Model for a University Environment, [Preprint].

-Asefi, H., & Lim, S. (2017). A novel multi-dimensional modeling approach to integrated municipal solid waste management. *Journal of cleaner production,* 166, 1131-1143. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.061**

-Ayati, A., Naji, H. R., Hashemi, M. M., & Saffar, M. (2025, February). Optimizing location allocation in urban management: A brief review. In 2025 29th International Computer Conference, Computer Society of Iran (CSICC), *IEEE.* 1-7. **doi.org/10.48550/arXiv.2412.06032**

-Babaee Tirkolaee, E., Abbasian, P., Soltani, M., & Ghaffarian, S. A. (2019). Developing an applied algorithm for multi-trip vehicle routing problem with time windows in urban waste collection: A case study. Waste Management & Research, 37(1_suppl), 4-13. **doi.org/10.1177/0734242X18807001**

-bagheri, K. Neisani Samani, N. jelokhani, M. toomanian, A. and Hajibabai, L. (2021). Estimation of Waste Collection Vehicles' Travel Time Using Spatial-Temporal Artificial Neural Networks Algorithms (Case Study: Tehran City). *Geographical Urban Planning Research (GUPR),* 9(1), 75-92. **doi.10.22059/jurbangeo.2020.305274.1328**

-Bihun, R., & Lytvyn, V. (2022). Optimization of garbage removal within a territorial community. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 1(3), 115. **doi.10.15587/1729-4061.2022.252001**

-Caramia, M., & Pizzari, E. (2022). Clustering, location, and allocation in two stage supply chain for waste management: A fractional programming approach. *Computers & Industrial Engineering,* 169, 108297. **doi.org/10.1016/j.cie.2022.108297**

-Erdem, M. (2022). Optimisation of sustainable urban recycling waste collection and routing with heterogeneous electric vehicles. *Sustainable Cities and Society,* 80, 103785. **doi.org/10.1016/j.scs.2022.103785**

-Hajiaghaei-Keshteli, M., Salehi-Amiri, A., Akbapour, N., Gajpal, Y., & Jabbarzadeh, A. (2022). Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 157, 112031. **doi.org/10.1016/j.rser.2021.112031**

-Hess, C., Dragomir, A. G., Doerner, K. F., & Vigo, D. (2024). Waste collection routing: a survey on problems and methods. *Central European Journal of Operations Research,* 32(2), 399-434. **doi.org/10.1007/s10100-023-00892-y**

-Komilis, D. P. (2008). Conceptual modeling to optimize the haul and transfer of municipal solid waste. *Waste management,* 28(11), 2355-2365. **doi.org/10.1016/j.wasman.2007.11.004**

-Rathore, P., Sarmah, S.P., & Singh, A. (2019). Location–allocation of bins in urban solid waste management: a case study of Bilaspur city, India. *Environment, Development and Sustainability,* 22, 3309-3331. **doi.org/10.1016/j.cie.2020.106525**

-Rattanawai, N., Arunyanart, S., & Pathumnakul, S. (2024). Optimizing municipal solid waste collection vehicle routing with a priority on infectious waste in a mountainous city landscape context. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* 24, 101066. **doi.org/10.1016/j.trip.2024.101066**

-Sadjadi, S. J., Habibi, F., Asadi, E., & Barzinpour, F. (2017). A multi-objective robust optimization model for site-selection and capacity allocation of municipal solid waste facilities: A case study in Tehran. J*ournal of cleaner production,* 166, 816-834. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.063**

-Shahbazi, A., Moeinaddini, M., Abdoli, M. A., Hosseinzadeh, M., Jaafarzadeh, N., & Sinha, R. (2023). Environmental Damage of Different Waste Treatment Scenarios by Considering Avoided Emissions Based on System Dynamics Modeling. *Sustainability*, *15*(23), 16158. **doi.org/10.3390/su15231615**

-Shang, C., Ma, L., Liu, Y., & Sun, S. (2022). The sorted-waste capacitated location routing problem with queuing time: A cross-entropy and simulated-annealing-based hyper-heuristic algorithm. *Expert Systems with Applications,* 201, 117077. **doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117077**

-Shawky, W., Azab, A., & Kassem, S. (2022, June). Solving the Open Route Capacitated Periodic Vehicle Routing Problem with Time Windows to Service Microgrids Powered by Uncertain Renewable Generation. *In International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Vol. 85819, V002T06A001. American Society of Mechanical Engineers. **doi.org/10.1115/MSEC2022-81991**

-Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V., & Carvalho, M. G. (2009). Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste Management* (New York, N.Y.), 29(3), 1176–1185. **doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.013**

-Tirkolaee, E. B., Goli, A., Gütmen, S., Weber, G. W., & Szwedzka, K. (2023). A novel model for sustainable waste collection arc routing problem: Pareto-based algorithms. *Annals of Operations Research,* 324(1), 189-214. **doi.org/10.1007/s10479-021-04486-2**

-Liu, L., & Liao, W. (2021). Optimization and profit distribution in a two-echelon collaborative waste collection routing problem from economic and environmental perspective. *Waste Management,* 120, 400-414. **doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.045**

-Liu, X., Chen, Y.-L., Por, L. Y., & Ku, C. S. (2023). A Systematic Literature Review of Vehicle Routing Problems with Time Windows. Sustainability, 15(15), 12004. **doi.org/10.3390/su151512004**

-Malmir, T., & Tojo, Y. (2016). Municipal solid waste management in Tehran: Changes during the last 5 years. Waste Management & Research, 34(5), 449–456. **doi.org/10.1177/0734242X16632056**

-Marks, D. H., & Liebman, J. C. (1971). Location models: solid waste collection example. Journal of the Urban Planning and Development Division, 97(1), 15-30. **doi.org/10.1061/JUPDAJ.0000136**

-Mihai, F. C., & Grozavu, A. (2019). Role of waste collection efficiency in providing a cleaner rural environment. *Sustainability,* 11(23), 6855. **doi.org/10.3390/su11236855**

-Moazzeni, S., Tavana, M., & Darmian, S. M. (2022). A dynamic location-arc routing optimization model for electric waste collection vehicles. *Journal of Cleaner Production,* 364, 132571. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132571**

-Paily, P. P. (2006). Optimal siting of solid waste transfer stations for minimizing haul costs. In Joint *International conference on Computing and Decision making in Civil and Building Engineering,* Montreal, Canada (June 14-16).

-Pakravan, P. and Behnamian, J. (2019). Undesirable Facility Location under Uncertainty: Modeling and Algorithm. *Research in Production and Operations Management,* 10(1), 1-23. **doi.org/10.22108/jpom.2018.102029.1017**

-Palar, P. S., & Renganathan, A. (2024). Reliability-oriented Sensitivity Analysis using Shapley Additive Explanations and Polynomial Chaos Expansion. In AIAA SCITECH 2024 Forum, 0789-0790. **doi.org/10.2514/6.2024-0789**

-Rahmanifar, G., Mohammadi, M., Sherafat, A., Hajiaghaei-Keshteli, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2023). Heuristic approaches to address vehicle routing problem in the Iot-based waste management system. Expert Systems with Applications, 220, 119708. **doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119708**

-Wu, L. (2022). Multiobjective Multidepot Capacitated Arc Routing Optimization Based on Hybrid Algorithm. *Journal of Advanced Transportation,* 2022(1), 1846681. **doi.org/10.1155/2022/1846681**

-Zabihian-Bisheh, A., Pourrezaie-Khaligh, P., Farrokhi-Asl, H., WT Lim, S. F., Rabbani, M., & Khamechian, M. (2022). Multi-depot green capacitated location routing problem considering uncertainty and in-facility queuing. *Cleaner Waste Systems,* 2, 100011. **doi.org/10.1016/j.clwas.2022.100011**

-Zabihian-Bisheh, A., Vandchali, H. R., Kayvanfar, V., & Werner, F. (2024). A sustainable multi-objective model for the hazardous waste location-routing problem: A real case study. *Sustainable Operations and Computers,* 5, 1-14. **doi.org/10.1016/j.susoc.2023.11.001**

-Zhang, D., Shi, L., Shi, Y., Gao, Y., & Wang, Q. (2025). Reconcile autonomous garbage truck and workload for multiple-period waste pickup schedule considering service frequency for industry 5.0. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 200,* 104171. **doi.org/10.1016/j.tre.2025.104171**

-Tirkolaee, E. B., Mahdavi, I., & Esfahani, M. M. S. (2018). A robust periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection considering drivers and crew's working time. Waste Management, 76, 138-146. **doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.015**

-United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2010). Collection of municipal solid waste in developing countries. UNON, *Publishing Services Section.*

-Wang, Y., Zhe, J., Wang, X., Fan, J., Wang, Z., & Wang, H. (2022). Collaborative multicenter reverse logistics network design with dynamic customer demands. Expert Systems with Applications, 206, 117926. **doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117926**

-Wei, C., Wøhlk, S., & Che, A. (2024). A multi-level capacitated arc routing problem with intermediate facilities in waste collection. Computers & Operations Research, 167, 106671. **doi.org/10.1016/j.cor.2024.106671.**

-Wright, N., Subedi, D., Pantha, S., Acharya, K. P., & Nel, L. H. (2021). The Role of Waste Management in Control of Rabies: A Neglected Issue. Viruses, 13(2), 225-226. **doi.org/10.3390/v13020225**

An Integrated Lean Optimization Model of Collection and Sweeping of Urban Wastes Using Limited Capacity Heterogeneous Fleet Allocation in Different Time Windows

Milad Rahimi, M.Sc., Grad., Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.
Javad Rezaian, *Associate Professor, Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.*
Iraj Mahdavi, Professor, Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Mazandaran, Iran.

E-mail: j.rezaeian@ustmb.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT
Efficient management of urban waste collection has emerged as a critical challenge for metropolitan areas due to rapid population growth and increasing waste generation rates. The significant proportion of collection costs within total waste management expenses, combined with spatial and temporal constraints and environmental risks associated with inefficient waste collection, highlights the urgent need for innovative and effective systems. This study introduces an integrated mixed-integer nonlinear programming model designed to optimize the location of waste accumulation centers, the routing of a heterogeneous fleet—including motorized vehicles (mechanized and non-mechanized) and non-motorized workers—and resource allocation, all under limited fleet capacity and restricted time availability. The model incorporates service time windows, prioritization of street sweeping, and aims to achieve multiple objectives: minimizing operational costs, reducing delays, mitigating waste decay, enhancing service coverage, and improving lean efficiency indicators. The proposed model is solved using two optimization approaches, namely epsilon-constraint and goal programming. Numerical results demonstrate significant improvements, including a 12% reduction in operational costs, a 17% increase in waste collection efficiency, and a 35% decrease in waste decay due to collection delays. Consequently, the model provides a robust and comprehensive framework for decision-making in urban waste management systems, addressing economic, environmental, social, and lean performance goals.

Keywords: Multi-Objective Optimization, Time Windows, Lean Municipal Waste Collection, Location-Vehicle Routing Problem, Heterogeneous Fleet