طراحی شبکه حمل و نقل پسماندهای صنعتی خطرناک با در نظر گرفتن ریسک وابسته به زمان

مقاله علمی – پژوهشی

سحر حبیب زاده بیژنی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
هادی صاحبی*، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: hadi_sahebi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹– پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵
صفحه ۳۹۲-۳۷۹

چکیده

پیشرفت فناوری دلیل افزایش پسماند خطرناک صنعتی در کل جهان است. مدیریت پسماندهای خطرناک به دلیل خطری که بر محیط زیست و زندگی انسان تحمیل می‌کند، مسئله مهمی است. این خطر می‌تواند نتیجه استقرار نامطلوب امکانات و همچنین مسیریابی غیربهینه زباله‌های خطرناک باشد. مطالعه حاضر یک مدل ریاضی دو هدفه را در زمینه مدیریت پسماندهای خطرناک صنعتی گسترش می‌دهد که تصمیمات یکپارچه دو سطح را یعنی مکان یابی و مسیریابی وسایل نقلیه را پوشش می‌دهد. تجزیه و تحلیل این تصمیمات به طور همزمان نه تنها می تواند به مؤثرترین ساختار در شبکه مدیریت پسماند منجر شود، بلکه ممکن است خطر بالقوه مدیریت پسماندهای خطرناک را نیز کاهش دهد. یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح مختلط برای این مسئله فرموله شده است، که به راحتی به یک MILP تبدیل می‌شود. در مدل ریاضی سه معیار در نظر گرفته شده است: ۱) به حداقل رساندن هزینه کل که شامل کل هزینه حمل و نقل پسماندهای خطرناک، جریمه زودکرد یا دیرکرد و هزینه تأسیس تسهیلات، ۲) به حداقل رساندن ریسک حمل و نقل مربوط به جمعیتی که در مسیرهای حمل و نقل پسماندهای خطرناک قرار دارند و ۳) به حداقل رساندن خطر برای جمعیتی که اطراف تسهیلاتی که پسماندهای خطرناک در آن جمع‌آوری شدند زندگی می‌کنند. از DEA برای انتخاب مکانهایی با اولویت بالا در CPLEX استفاده می شود. برای حل مسئله از الگوریتم شبیه سازی تبرید در مطالعه موردی تهران استفاده شده است. یافته‌های ما کارآیی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند زیرا قادر است در یک زمان محاسباتی نسبتاً معقول، یک راه حل با کیفیت بالا پیدا کند.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم شبیه سازی تبرید، پسماندهای صنعتی خطرناک، ریسک، مسیریابی وسایل نقلیه، مکانیابی

۱-مقدمه

یکی از اصلی‌ترین و مهم‌ترین دغدغه‌های مدیریت شهری، مدیریت کارآمد پسماندهای تولیدی آن شهر می‌باشد. این مدیریت می‌بایستی با شیوه‌ای اصولی و با رعایت مسائل زیست‌محیطی انجام شود. همان‌طور که می‌دانیم پسماندهای تولیدی یک شهر انواع مختلفی دارند و به همین دلیل تاثیراتی که هر کدام از انواع پسماندها بر محیط‌زیست دارند کاملاً متفاوت می‌باشد. در صورتی که این پسماندها به درستی و با توجه به ماهیتشان مدیریت شوند می‌توان انتظار داشت که کم‌ترین آسیب را به محیط‌زیست اطرافشان وارد کنند. سیستم‌های مدیریت پسماند در نقاط مختلف جهان دارای

ساختارهای گوناگونی هستند اما به طور کلی این سیستم شامل تولید، جمع‌آوری، تفکیک، بازیافت، پردازش (احیا)[1] و دفع پسماندها می‌باشد. همان‌طور که می‌دانیم پسماندهای گوناگون به شیوه‌های مختلفی جمع‌آوری می‌شوند و سپس با توجه به ماهیتشان به مقصدهای متفاوتی فرستاده می‌شوند. برخی پسماندهای دیگر به دلیل ماهیت متفاوت و بعضاً خطرناکی که دارند، نیازمند پردازش مناسب و در نهایت انهدام کامل می‌باشند. مدیریت تمامی این فعالیت‌ها به شیوه‌ای اصولی و مناسب، مدیریت پسماندهای شهری نامیده می‌شود.

تحقیق پیش‌رو به صورت تخصصی، مدیریت پسماندهای خطرناک را مد نظر دارد. علت این امر خطرهای ناشی از حمل‌ونقل و عملیات انجام شده بر روی این دسته از پسماندها می‌باشد. هم‌چنین شرایط مدیریت پسماندهای خطرناک علی‌الخصوص پسماندهای صنعتی در کشور ایران وضعیت نامناسبی دارد. از جمله پرسش‌هایی که در حوزه‌ی پسماندهای خطرناک به وجود می‌آید، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

-آیا امکان تردد در پنجره‌های زمانی کم ترافیک تر برای حمل پسماندهای خطرناک وجود دارد؟

-مسیریابی پسماندهای خطرناک چگونه باشد تا ریسک و هزینه‌های حمل‌ونقل این دسته از پسماندها به حداقل مقدار خود برسد؟

-مسیریابی چگونه باشد تا حتی الامکان در وسایل نقلیه در مسیرهای تحت پوشش حرکت کنند؟

سوالات مطرح شده و بسیاری از سوالات دیگر از جمله مواردی هستند که سعی شده در پژوهش حاضر به آن‌ها پاسخ داده شود. پژوهش حاضر بررسی یک شبکه‌ی پسماند خطرناک می‌باشد که دارای تعدادی گره‌های تولید پسماندهای خطرناک، تعدادی مراکز نیروهای امدادی و همچنین تعدادی تسهیلات یکپارچه به منظور بازیافت، امحاء و انهدام پسماندهای خطرناک می‌باشد. نکته‌ای که این پژوهش را از سایر پژوهش‌های موجود متمایز می‌کند مسیریابی متفاوت شبکه‌ی پسماندهای خطرناک می‌باشد. به این ترتیب که در این پژوهش کامیون های حمل پسماند با استفاده از جریمه، ملزم به تردد در مسیرهای کم ترافیک تر در پنجره های زمانی مختلف می‌شوند. هم‌چنین تاکید به رفت و آمد در مسیرهای تحت پوشش مراکز امدادی، زمان‌بندی جمع‌آوری پسماندها و در نهایت استفاده از یک الگوریتم ابتکاری نیمه دقیق برای رسیدن به جواب هایی نزدیک به بهینه از دیگر نکات برجسته‌ی این پژوهش می‌باشد. در ابتدا به مطالعه ادبیات این حوزه پرداخته خواهد شد. پس از شناخت سیستم‌های نوین مدیریت پسماندهای صنعتی تلاش شده اطلاعات دقیقی از شیوه‌ی مدیریت پسماندهای خطرناک در کشور به دست آورد و شبکه‌ی متناسب با وضعیت پسماندها را طراحی نمود. در مرحله بعد، با استفاده از این اطلاعات و روش‌های مدل‌سازی، سعی در طراحی یک شبکه مناسب برای مدیریت پسماندهای خطرناک خواهیم داشت. بدین ترتیب که با استفاده از تجزیه و تحلیل ریاضی و نرم‌افزارهای بهینه‌سازی برای رسیدن به بهترین شبکه‌ی ممکن برای حمل پسماندهای خطرناک صنعتی تلاش خواهد شد و در نهایت با پیاده‌سازی این مدل بر روی یک نمونه شبه واقعی که اطلاعات آن گردآوری گردیده است، کاربرد مدل ارائه شده نشان داده خواهد شد.

۲- پیشینه تحقیق

به منظور آشنایی هرچه بیشتر با تحقیق حاضر، در این بخش، ادبیات موجود در دو حوزه مختلف بررسی خواهند شد.

۲-۱- مسائل طراحی شبکه با در نظر گرفتن تسهیلات امدادی

سال‌های اخیر، تسلیمی، باتا و ون (Taslimi, Batta and Kwon, 2017) یک مسئله‌ی دوسطحی که در آن، یک رابطه رهبر-پیرو بین صاحبان قدرت و حمل‌کنندگان پسماندهای خطرناک وجود دارد ارائه دادند. در مقاله‌ی آن‌ها، دولت بهترین مکان برای تیم‌های امداد پسماندهای خطرناک را پیدا می‌کند و سپس، سعی در ایجاد مسیرهای بیشتر برای حمل‌کنندگان می‌کند. عطایی، صادقیان و حامدی یک مدل ریاضی جهت مکانیابی پایگاه‌های توزیع خون به‌همراه مسیریابی خودروهای حمل در شرایط زلزله ارائه کرده‌اند. اهداف در نظر گرفته شده شامل کمینه کردن کمبود خون، بیشینه کردن رضایت‌مندی افراد آسیب‌دیده و کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل و مکانیابی می‌باشد. حالت عدم قطعیت سناریویی به‌همراه، ریسک اختلال و رضایت افراد آسیب‌دیده در نظر گرفتند. در پژوهشی دیگر، آنها هم‌چنین در سال ۲۰۲۰، یک مدل یکپارچه برای تعیین و کنترل میزان موجودی مراکز توزیع، مکانیابی مراکز توزیع برای قبل از بحران، بررسی جریان مجروحین

، اجساد، بیخانمان ها و اقلام امدادی در شبکه و تخصیص وسائل نقلیه برای این جریان بعد از بحران ارائه داده‌اند.

۲-۲- مسائل مکان‌یابی و مسیریابی پسماندهای خطرناک

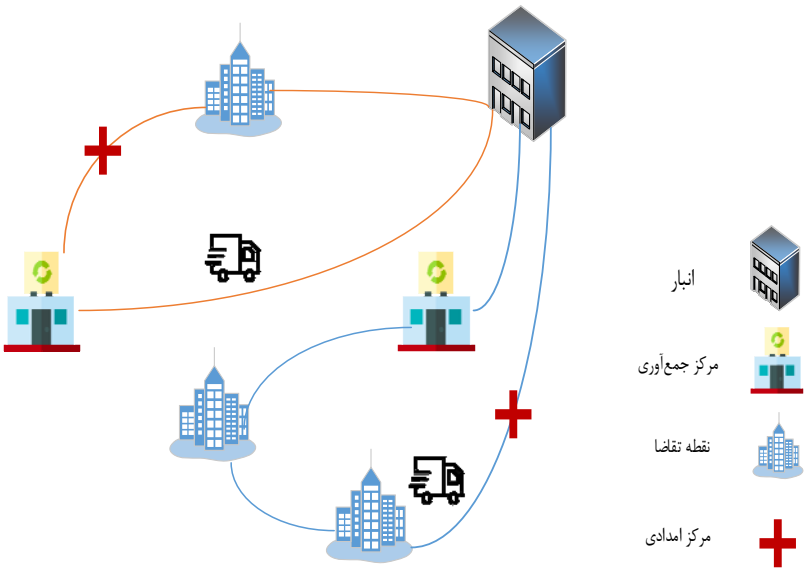
بیشتر ادبیات موجود بر روی سفرهای مستقیم تمرکز کرده‌اند، که در آن‌ها، حمل‌کنندگان در یک جهت از یک لایه به دیگری سفر خواهد کرد. اولین بار که برنامه‌ریزی سفری[۳] مطرح شد در پژوهش ژائو و ورتر(Zhao and Verter, 2015) بود. این برنامه‌ریزی بدان صورت است که یک وسیله حمل‌ونقل می‌تواند سفرش را در همان تسهیل جمع‌آوری شروع کند و به پایان برساند. در سال‌های اخیر، ژائو و ژو (Zhao and Zhu, 2016) یک مدل چندهدفه و چند انباره‌ی مسیریابی وسائل نقلیه را مطرح کردند که در آن ریسک و هزینه‌های کلی حداقل شدند مادامی که سفرهای بازگشتی بین مراکز جمع‌آوری و مراکز بازیافت نیز در نظر گرفته شدند. در همان سال، ییلماز،;کارا و یتیس (Yilmaz, Kara, and Yetis,2017) یک مدل مسیریابی-مکان‌یابی چند هدفه‌ی عدد صحیح مختلط ارائه دادند که هدفش حداقل کردن هزینه‌ی حمل‌ونقل و ریسک‌های موجود برای سیستم‌های کلان مدیریت پسماند بود. ربانی و همکارانش (Rabbani, et. al. 2018) مدلی ارائه کردند که در آن، محدودیت‌های مربوط به سازگاری بین انواع پسماندها و همچنین تلفیق تصمیمات مسیریابی در مدل وجود داشت. آیدمیر کاراداگ (Aydemirkaradag, 2018) یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط مبتنی بر سود برای مسئله‌ی مکان‌یابی- مسیریابی پسماندهای خطرناک ارائه کرد. مدلی که وی ارائه کرد در رابطه با مکان و تعداد مراکز بازیافت، سوزاندن، استریل کردن، انبار موقت و انهدام تصمیم‌گیری می‌کند. یک سال بعد، در پژوهشی دیگر ربانی، حیدری و یزدان پرست (Rabbani, Heidari and Yazdanparast, 2019) یک مدل چندهدفه‌ای ارائه کردند که در آن عدم قطعیت سیستم مدیریت پسماند در نظر گرفته شده بود. همان‌طور که از مرور ادبیات انجام شده در بخش پیش می‌توان فهمید، ادبیات غنی‌ای در حوزه‌ی حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک وجود دارد. برخی از این مقالات تنها به طراحی یک شبکه‌ی حمل پسماندهای خطرناک بسنده کرده‌اند، برخی دیگر در حوزه‌ی مکان‌یابی و مسیریابی این شبکه فعالیت کرده‌اند و هم‌چنین برخی نیز به بررسی چگونگی عملکرد تیم‌های امدادی پسماندهای خطرناک در شرایط وقوع حادثه پرداخته‌اند.

در پژوهش حاضر، هدف بررسی یک شبکه‌ی پسماند خطرناک می‌باشد که دارای تعدادی گره‌های تولید پسماندهای خطرناک، تعدادی مراکز نیروهای امدادی و هم‌چنین تعدادی تسهیلات یکپارچه به منظور بازیافت، احیا و انهدام پسماندهای خطرناک می‌باشد. هم‌چنین از اهداف این پژوهش، مسیریابی وسایل نقلیه بین مراکز تولید پسماند و تسهیلات یکپارچه و مکانیابی برای احداث تسهیلات می‌باشد به طوریکه هزینه کل و ریسک به حداقل برسد. در حوزه‌ی پسماندهای خطرناک، پژوهشی که موضوع فعالیت تیم‌های امدادی یک مسیر در نظر گرفته باشد وجود ندارد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که تسهیلات امدادی در کاهش ریسک موجود در حمل پسماندهای خطرناک تاثیر بسزایی دارند. به این ترتیب که اگر مسیری تحت پوشش یک تسهیل امدادی قرار گرفته باشد، در صورت بروز حادثه می‌توان به سرعت تیم‌های امدادی مربوطه را به محل حادثه اعزام کرد و از عواقب جبران‌ناپذیر حوادث پسماندهای خطرناک جلوگیری کرد.

۳- تعریف مساله

یک مسئله مکان‌یابی-مسیریابی پسماندهای خطرناک با در نظرگیری ریسک ناشی از حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک ارائه می‌شود. در شبکه مورد مطالعه مجموعه‌ای از مراکز جمعیتی به عنوان نقاط تولید پسماند (نقاط تقاضا) وجود دارند. به علاوه، مجموعه‌ای از نقاط به عنوان مکان‌های بالقوه برای احداث تسهیلات جمع‌آوری پسماندهای خطرناک در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، تعدادی وسایل نقلیه برای جمع‌آوری پسماندها از مراکز تولید وجود دارند. هر وسیله نقلیه سفر خود را از انبار شروع کرده و با توجه به ظرفیت خود به تعدادی از تقاط تقاضا مراجعه کرده و پسماندهای آن‌ها را جمع‌آوری می‌کند. پس از آن برای تخلیه بار خود به یکی از مراکز جمع‌آوری پسماند مراجعه می‌کند و در نهایت به نقطه شروع (انبار) بازمی‌گردد. مدل ریاضی پیشنهادی بر مسئله مکان‌یابی-مسیریابی پسماندهای خطرناک با در نظرگیری ریسک ناشی از حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک تمرکز دارد. تابع هدف اول به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های مربوط به مکان‌یابی تسهیلات و مسیریابی وسایل نقلیه و هدف از تابع هدف دوم کمینه‌سازی ریسک ناشی از حمل‌ونقل پسماندهای خطرناک است. اهداف اصلی مسئله مورد مطالعه تعیین: ۱) مقدار بار حمل شده توسط

وسایل نقلیه ۲) مسیر بهینه وسایل نقلیه ۳) زمان ورود وسایل نقلیه به مسیرها ٤) مکان بهینه برای احداث مراکز جمع‌آوری پسماند می‌باشند. شکل ۱ ساختار کلی مسئله مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. ساختار شماتیک مسئله

در این بخش، مفروضات در نظرگرفته شده برای توسعه مدل مکان‌یابی-مسیریابی پسماندهای خطرناک تشریح می‌گردد.

-در هر پنجره زمانی، پسماندهای خطرناک تولیدشده در هر مرکز تولید پسماند یا قابل بازیافت هستند یا برای دفع آماده می‌شوند.

-بین هر مرکز تولید g و مرکز تسهیلات یکپارچه f فقط یک مسیر وجود دارد.

-اگر پسماندهای تولیدشده در یک مرکز تولید به دلیل ممنوعیت‌های مسیر، محدودیت ترافیک در خطوط، محدودیت ظرفیت تسهیلات و پوشش ضعیف مراکز اورژانس در صورت بروز حوادث یا مشکلات ظرفیت، به هیچ تسهیلی منتقل نشوند، می‌توان این پسماندها را در مرکز تولید نگه داشت و پنجره‌های زمانی بعدی منتقل نمود.

-میانگین زمان لازم برای یک گره اضطراری به‌منظور رسیدن به محل تصادف خطرناک، از محاسبه میانگین زمان رسیدن تیم‌های اضطرار به محل‌های تصادف مختلف در هر جاده به دست می‌آید.

-سه پنجره زمانی برای ۲٤ ساعت (یک روز) تعریف شده‌اند که طول هر یک از آن‌ها ۸ ساعت است.

-برای محدود کردن مکان‌های بالقوه به منظور احداث مراکز تسهیل یکپارچه، از روش تحلیل پوششی داده‌های وزن مشترک[٤] استفاده‌شده است. به‌این‌ترتیب کارایی مکان‌های منتخب برای احداث تسهیلات به‌طور فراوانی افزایش می‌یابد. دلایل عمده‌ای که باعث انتخاب این روش شده‌اند به شرح زیر هستند.

-در روش تحلیل پوششی داده‌های وزن مشترک، ما از یک وزن برای مقایسه همه مکان‌های بالقوه برای یافتن مراکز تسهیل یکپارچه استفاده می‌کنیم. بنابراین، از این طریق تمام مکان‌های بالقوه در یک وضعیت یکسان و منصفانه می‌گیرند تا با یکدیگر مقایسه شوند. اما در روش تحلیل پوششی داده‌های کلاسیک، کارایی هر DMU بر اساس وزن معین آن محاسبه می‌شود و DMU های مختلف دارای وزن‌های مختلفی هستند.

-در مقایسه با روش تحلیل پوششی داده‌های کلاسیک، روش وزن مشترک بسیار ساده است، همانطور که در تحلیل پوششی داده‌های کلاسیک برای محاسبه وزن DMU های مختلف نیاز

هســت تا برای هر DMU یک مدل نوشــته و اجرا شــود. اما روش تحلیل پوششی داده‌های وزن مشترک تنها یک مدل نوشته می‌شــود و برای به دست آوردن وزن مشترک، مدل طراحی‌شده اجرا خواهد شــد. پس از آن، فقط باید کارایی هر DMU را با استفاده از فرمول‌های ساده محاسبه کرد.

-مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصــمیم مورد استفاده برای فرمول‌بندی مسـئله مورد مطالعه در نظر گرفته شده به شرح زیر هستند.

جدول ۱. معرفی مجموعه‌ها

مجموعه‌ها	
N	مجموعه مراکز تولید و جمع‌آوری پسماندها با اندیس i و j
F	مجموعه مراکز جمع‌آوری پسماندها با اندیس f $(F \subset N)$
G	مجموعه مراکز تولید پسماندها با اندیس i و j $(G \subset N)$
S	مجموعه انبارها با اندیس i و j $(S \subset N)$
K	مجموعه وسایل نقلیه با اندیس k
T	مجموعه دوره‌های زمانی با اندیس t
E	مجموعه مراکز اضطراری با اندیس e

جدول ۲. معرفی پارامترها

پارامترها	
$cost_k$	هزینه ثابت هر بار استفاده از وسیله نقلیه k
G_i	میزان پسماند تولیدشده توسط مرکز تولید i ام
tt_j	زمان لازم برای سفر بین دو نقطه i و j
L_t	حد پایین دوره زمانی t
U_t	حد بالا دوره زمانی t
MC_k	ظرفیت کامیون k
Cap_j	ظرفیت مرکز جمع‌آوری j
θ	هزینه زودکرد
α	هزینه دیرکرد
PR_f	تعداد افرادی که نزدیک مسیر f زندگی می‌کنند
PR_{ij}	تعداد افرادی که نزدیک مسیر $i \in G$ به $j \in G$ زندگی می‌کنند
TC_{ij}	هزینه انتقال یک واحد پسماند خطرناک از i به j
AT_{eij}	مدت زمانی که طول می‌کشد تا مرکز اضطراری e از i به j برود
M	عدد بزرگ

جدول۳. معرفی متغیرها

متغیرها	
V_{ikt}	مقدار بار وسیله نقلیه k بعد از بارگیری در نقطه i در دوره t
U_{ikt}	مقدار بار وسیله نقلیه k قبل از تخلیه در نقطه i در دوره t
Y_{ijkt}	متغیر باینری، برابراست با یک اگر کامیون k در دوره زمانی t از i به j برود، در غیر این صورت برابر است با صفر
X_i	متغیر باینری، برابراست با یک اگر مرکز جمع‌آوری تاسیس شود، در غیر این صورت برابر است با صفر
ET_{ijkt}	زمان ورود کامیون k به مسیر i به j اگر در دوره زمانی t از i به j برود
ω_{tij}	میزان زودکرد در دوره t در مسیر i به j
β_{tij}	میزان دیرکرد در دوره t در مسیر i به j

با توجه به مفروضات مذکور، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی‌شده، مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی-مسیریابی پسماندهای خطرناک به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$Min\ Z_1 = \sum_{i\in G}\sum_{\substack{j\in G\cup F\\ j\neq i}}\sum_k\sum_t TC_{ij}\times V_{ikt} + \sum_{i\in F} FC_i \times X_i + \sum_{i\in G\cup F}\sum_{\substack{j\in G\cup F\\ j\neq i}}\sum_k\sum_t\left(\omega_{tij}\times\theta\right)+\left(\beta_{tij}\times\alpha\right) + \sum_i\sum_{i\neq j}\sum_k\sum_t cost_k \times Y_{ijkt} \quad (۱)$$

$$Min\ Z_2 = \sum_{i\in G}\sum_{j\in F}\sum_k\sum_t PR_{ij}\times V_{ikt} + \sum_{i\in F} PF_i \times X_i \quad (۲)$$

با توجه به:

$$AT_{eij}\times Y_{ijkt} \le MT,\ \ \forall e,\ i\in G,\ j\in G\cup F,\ i\neq j,\ k,\ t \quad (۳)$$

$$\beta_{tij} \ge ET_{ijkt} - U_t,\ \ \forall i\in G,\ j\in G\cup F,\ i\neq j,\ k,\ t \quad (۴)$$

$$\omega_{tij} \ge (L_t\times Y_{ijkt}) - ET_{ijkt},\ \forall i\in G,\ j\in G\cup F,\ i\neq j,\ k,\ t \quad (۵)$$

$$V_{ikt} \le MC_k,\ \ \forall\ i,\ k,\ t \quad (۶)$$

$$\sum_{j\in G,\, j\neq i} Y_{ijkt} \leq 1,\ \forall i \in S,\ k,\ t \tag{۷}$$

$$\sum_{j\in G,\, j\neq i} \sum_{k} Y_{ijkt} \geq 1\ ,\ \forall i \in S,\ t \tag{۸}$$

$$\sum_{j\in G\cup F,\, j\neq i} Y_{ijkt} = \sum_{j\in S\cup G,\, j\neq i} Y_{jikt}\ ,\ \forall i \in G,\ k,\ t \tag{۹}$$

$$\sum_{j\in S,\, j\neq i} Y_{ijkt} = \sum_{j\in G,\, j\neq i} Y_{jikt}\ ,\ \forall i \in F,\ k,\ t \tag{۱۰}$$

$$\sum_{j\in G,\, j\neq i} \sum_{k} Y_{jikt} \leq X_i\ ,\ \forall i \in F,\ t \tag{۱۱}$$

$$\sum_{j\in S} \sum_{k} Y_{ijkt} \leq X_i\ ,\ \forall i \in F,\ t \tag{۱۲}$$

$$\sum_{i\in G\cup S,\, j\neq i} \sum_{k} Y_{ijkt} = 1\ , \forall j \in G,\ k,\ t \tag{۱۳}$$

$$V_{jkt} \geq V_{ikt} + G_j - M \times (1 - Y_{ijkt}),\ \forall j \in G,\ k,\ t \tag{۱۴}$$

$$U_{jkt} \geq V_{ikt} \times Y_{ijkt}, \forall i \in G,\ j \in F,\ k,\ t \tag{۱۵}$$

$$\sum_{t} \sum_{k} U_{jkt} \leq Cap_j\ , \forall j \in F \tag{۱۶}$$

$$ET_{ijkt} + tt_{ij} \leq ET_{jlkt} + M\big(2 - Y_{ijkt} - Y_{jlkt}\big), \tag{۱۷}$$

$$\forall i \neq j,\ j \neq l,\ i \neq l,\ j \in G \cup F$$

$$ET_{ijkt} = 0, \forall i \in G,\ i \in S \tag{۱۸}$$

$$X_i,\ Y_{ijkt} \in \{0,1\}, \forall\, i \neq j,\ k,\ t \tag{۱۹}$$

$$U_{ikt},\ V_{ikt},\ ET_{ijkt},\ \beta_{tij},\ \omega_{tij},\ \forall\, i \neq j,\ k,\ t \tag{۲۰}$$

تابع هدف (۱) مسئله مورد مطالعه به دنبال کمینه‌سازی هزینه‌های مورد انتظار است. بخش اول این تابع مربوط به هزینه‌های حمل‌ونقل است. قسمت دوم این تابع مربوط به هزینه مکان‌یابی تسهیلات به توجه به مکان‌های بالقوه است. قسمت سوم هزینه تخطی از پنجره زمانی را نشان می‌دهد که توسط سازوکار جریمه فرمول‌بندی شده است. در نهایت، قسمت چهارم تابع مذکور هزینه ثابت استفاده از وسایل نقلیه در مسیرهای مختلف را نشان می‌دهد. تابع هدف (۲) میزان ریسک ناشی از حمل و عملکرد مقادیر مختلف پسماندهای خطرناک را کمینه می‌کند. قسمت اول این تابع میزان ریسک ناشی از حمل پسماندهای خطرناک روی مسیر (i,j) در پنجره زمانی t را محاسبه می‌کند. قسمت دوم این تابع مربوط به میزان

ریسک ناشی از مکان‌یابی تسهیلات یکپارچه با در نظرگیری تعداد افرادی که نزدیک این مراکز زندگی می‌کنند، است.

در مدل فوق محدودیت (۳) بیان می‌کند که اگر میانگین زمان برای تیم اضطراری e برای رسیدن به محل حادثه که در مسیر (i,j) رخ داده است، بیشتر از بیشنه زمان مجاز تعیین‌شده باشد، هیچ تیم اضطراری نباید به محل حادثه e ارسال شود و این حادثه باید توسط مرکز اضطراری دیگری که نزدیک‌تر است، پوشش داده شود. محدودیت (٤) و (٥) به ترتیب میزان دیرکرد و زودکرد در هر مسیر در هر دوره را محاسبه می‌کنند. محدودیت (٦) تضمین می‌کند که میزان بار حمل شده بین دو نقطه از ظرفیت وسیله نقلیه حمل‌کننده تجاوز نکند. محدودیت (۷) موجب می‌شود که در صورت انتخاب یک وسیله نقلیه، آن وسیله از نقطه شروع به یکی از نقاط بارگیری اعزام شود. محدودیت (۸) تضمین می‌کند حداقل یک کامیون در هر دوره انتخاب شود. محدودیت (۹) و (۱۰) موجب می‌شود که تعداد یال ورودی به یک نقطه بارگیری و یا نقطه تخلیه، برابر تعداد یال خروجی شود. محدودیت (۱۱) و (۱۲) موجب می‌شود، در صورت احداث مراکز پسماند، وسایل نقلیه برای تخلیه به آنجا اعزام شوند و در نهایت به نقطه شروع بازگردند. محدودیت‌های (۱۳) تضمین می‌کند که در هردوره دقیقا یک کامیون به هر مراکز تولید وارد شود. محدودیت (١٤) مقدار بار وسایل نقلیه بعد از بارگیری در مراکز تولید در هر دوره را محاسبه می کند. محدودیت (۱۵) مقدار باری که وسایل نقلیه در مراکز پسماند در هر دوره تخلیه می‌کنند را نشان می‌دهد. محدودیت (١٦)تضمین می‌کند در طول زمان برنامه‌ریزی مجموع پسماندهای جمع‌آوری شده از ظرفیت مرکز تجاوز نکند.محدودیت (۱۷) زمان ورود به مسیر (i,j) برای کامیونی که آن را طی می کند را محاسبه می‌کند. براساس محدودیت (۱۸) زمان حرکت کامیونها از انبار برابر صفر درنظرگرفته شده است. روابط (۱۹) و (۲۰) متغیرهای مسئله را تعریف می‌کنند.

٤- روش حل

در این پژوهش، روش اپسیلون محدودیت تقویت‌شده[5] برای تک‌هدفه کردن مسئله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

٤-۱- رویکرد حل ابتکاری

مدل ریاضی ارائه شده NP-hard است. همچنین، مسئله مورد مطالعه درباره ظرفیت تسهیلات در هر دوره زمانی تصمیماتی اتخاذ می‌کند که این امر می‌تواند به پیچیدگی مسئله بیافزاید. بنابراین، نرم‌افزارهای تجاری قادر به حل این مدل برای مسائل با ابعاد بزرگ نیستند. ازین رو، یک روش ابتکاری که مبتنی بر رویکرد ثابت-بهینه‌سازی[6] و شبیه‌سازی تبرید[7] است، برای حل مسئله در ابعاد بزرگ معرفی شده است. رویکرد حل مسئله از دو فاز اصلی تشکیل شده است. در فاز اول، پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید تنظیم می‌شوند و پس از آن جواب اولیه به عنوان ورودی الگوریتم ساخته می‌شود. در فاز دوم، مراحل اصلی شبیه‌سازی تبرید اجرا خواهند شد. همچنین، در این فاز از چندین روش برای انتخاب عملگرهای تولید همسایگی استفاده می‌شود. جواب تولید شده به CPLEX منتقل شده تا تابع برازش و سایر متغیرها بهینه شود. جواب نهایی به الگوریتم منتقل میشود. نحوه نمایش جواب مسئله و تولید جواب اولیه و جزییات بیشتر در مورد روش پیشنهادی در ادامه آورده شده است.

٤-۱-۱-الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

فرم کلی الگوریتم به صورت زیراست:

۱- جواب اولیه i را از مجموعه جواب‌های امکان‌پذیرانتخاب کنید $(i \in s)$

۲- درجه حرارت اولیه T_0را انتخاب کنید به طوریکه $T_0 \succ 0$

۳- فرایند کاهش درجه حرارت را انتخاب کنید.

٤- تابع مربوط به تعداد تعویض‌ها در هردرجه را انتخاب کنید.

٥- شمارنده مربوط به تغییر درجه حرارت را مساوی صفر قرار دهید $(t = 0)$

٦- حلقه زیررا تکرار کنید (فرایند انجماد).

۷-شمارنده مربوط به تعداد تعویض‌ها، در هردرجه حرارت را مساوی صفر قرار دهید $(n = 0)$

۸-حلقه زیررا تکرار کنید. فرایند برقراری تعادل (در هردرجه حرارت)

۹-جواب j را در همسایگی جواب i ایجاد کنید.

۱۰-مقدار $df = f(j) - f(i)$ را محاسبه کنید.

۱۱- اگر $df \prec 0$، جواب را بپذیرید. $(i = j)$

۱۲–در غیر این صورت عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب کنید $(x \in U(0,1))$

۱۳–اگر $x \prec p$ باشد آن‌گاه، $i = j$

۱۴– $n = n+1$

۱۵–تا برقراری رابطه $n = N(t)$ حلقه را تکرار کنید.

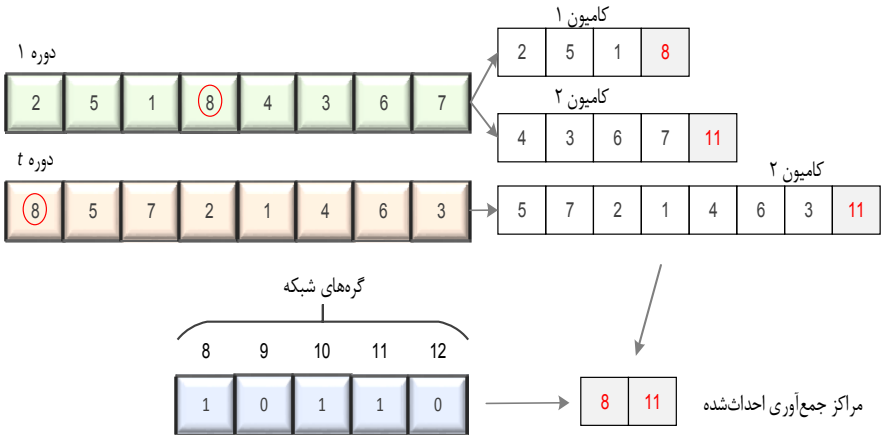
۱۶– $t = t+1$

۱۷– درجه حرارت جدید را محاسبه نمایید $(t = T(t))$

۱۸– تا برقراری شرط توقف، حلقه را تکرار کنید.

٤-١-٢- نحوه ارائه جواب

مدل ارائه شده متشکل از ٦ دسته متغیر تصمیم مستقل بوده که در تعیین خروجی مسئله استفاده خواهند شد. تنها متغیرهای مرتبط با مسیریابی وسایل نقلیه و مکان‌یابی مراکز جمع‌آوری در نمایش جواب مسئله آورده شده و سایر متغیرها که درباره زمان ورود و بار حمل‌شده توسط کامیون‌ها تصمیم می‌گیرند، از حل روش‌های دقیق که از حل‌کننده CPLEX استفاده می‌شود، به دست خواهند آمد. فرآیند تبدیل راه حل طراحی‌شده به مقادیر متغیرهای تصمیم (دیکد کردن راه حل) بدین صورت است که ابتدا در هر دوره مسیر مربط به هر وسیله نقلیه تعیین می‌شود. پس از آن، با توجه به اینکه وسایل نقلیه پس از جمع‌آوری پسماندها از نقاط تولید پسماند باید به یکی از مراکز جمع‌آوری پسماند بروند و بارهای خود را تخلیه کنند، از طریق ساختار طراحی‌شده برای مسئله مکان‌یابی یکی از مراکز جمع‌آوری که مقدار ۱ را گرفته است، به طور تصادفی انتخاب شده و وسیله نقلیه مورد نظر برای تخلیه بار به این مرکز مراجعه می‌کند. پس از تکمیل مقادیر متغیر تصمیم مربوط به مسئله مسیریابی، آن مراکز جمع‌آوری پسماندی که در این مسئله مورد استفاده قرار گرفته‌اند به عنوان مقادیر متغیر نصمیم مسئله مکان‌یابی در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۲) فرآیند دیکد کردن مثال ارائه‌شده را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در دوره زمانی اول هردو کامیون فعال بوده و که کامیون اول مسیر ۲، ۵ و ۱ و کامیون دوم مسیر ٤، ۳، ٦ و ۷ را برای جمع‌آوری پسماندها می‌پیماید. پس عمل جمع‌آوری این دو کامیون به ترتیب به مرکز جمع‌آوری پسماند ۸ و ۱۱ برای تخلیه بار مراجعه می‌کنند. در دوره زمانی t کامیون شماره ۱ هیچ گونه فعالیتی را ندارد و تمامی پسماندها توسط کامیون ۲ جمع‌آوری و در مرکز جمع‌آوری پسماند ۱۱ تخلیه می‌شوند. بدیت ترتیب از میان مراکز در دسترس (۸، ۱۰ و ۱۱) که توسط ساختار مربوط به مسئله مکان‌یابی تعیین شده‌اند، مراکز ۸ و ۱۱ برای احداث انتخاب می‌شوند.



شکل ۲. فرآیند دیکد کردن راه حل طراحی‌شده

یافته‌ها

ابتدا، پارامترهای الگوریتم پیشنهادی با روش تاگوچی[8] به منظور بهبود کیفیت راه‌حل تنظیم می‌شوند. سپس، عملکرد الگوریتم پیشنهادی را برای مجموعه‌ای از نمونه‌های مسئله تصادفی با اندازه کوچک و بزرگ ارزیابی می‌کنیم. سوم، مدل درنظر گرفته شده را در یک مورد شبه واقعی بررسی می‌کنیم. در آخر تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مدل ارائه می‌دهیم. لازم به ذکر است که تمامی محاسبات بر روی کامپیوتری با پردازشگر Cori7 CPU 2.20 GHz و ۸ گیگابایت RAM پیاده شده است.

تنظیم پارامتر

فقط روش‌های جستجو و نمایش راه حل بر عملکرد الگوریتم پیشنهادی تأثیر نمی‌گذارد، بلکه تنظیم پارامتر برای یافتن راه حل خوب و همگرایی مهم است.به منظور تنظیم پارامترهای یک الگوریتم تصادفی، طراحی استوار پارامترها ضروری است. در اینجا، برای بهبود کیفیت راه‌حل پیشنهادی و نتایج حاصل از آن، از روش تاگوچی برای تنظیم پارامترها استفاده شده است. آزمایش‌ها با سه مقدار مختلف برای هر پارامتر انجام شده‌است. دمای اولیه و ضریب کاهش دما و تعداد تکرار در هر دما و حداکثر تکرار به عنوان پارامترهای این روش در نظر گرفته شده‌اند. برای مسئله ها با ابعاد کوچک و بزرگ، سه سطح از پارامترها ارائه شده است. سطح این پارامترها در جدول (۱) ارائه شده‌است. سپس طراحی آزمایشات با استفاده از روش تاگوچی انجام می‌شود و برای تحقق بهبودنتایج حاصل از الگوریتم، بهترین سطح هر پارامتر تعیین می‌شود. ابتدا هر آزمایش را ۳ بار تکرار می‌کنیم تا تاثیر تصادفی بودن کم شود. این آزمایش‌ها را برای یک مسئله کوچک با ۲ کامیون، ۲ دوره، ۵ مرکز تولید و ۸ مکان بالقوه برای تاسیس که در ۳ مکان اول از لحاظ اولویت امکان تاسیس تسهیلات برای جمع آوری پسماندها وجود دارد

جدول ٤. مقادیر پارامترها در سطوح مختلف

سطح	پارامترها			
	دمای اولیه	حداکثر تکرار	تعداد تکرار در هر دما	ضریب کاهش دما
۱	۸۰۰	۵۰	۵	۰,۸
۲	۹۰۰	۱۰۰	۱۰	۰,۹
۳	۱۰۰۰	۱۵۰	۲۰	۰,۹۹

مسائل نمونه

تعدادی از مسائل نمونه تصادفی را برای ارزیابی عملکرد الگوریتم ایجاد شده‌است. این مسائل نمونه به دو گروه طبقه بندی می‌شوند. گروه اول شامل هشت مسئله کوچک ۸-۱ است و گروه دوم شامل هشت مسئله بزرگ ۱۶-۹ است. مجموعه‌ای از مراکز تولید پسماند و تعداد وسایل نقلیه در هر دوره برای هر مسئله فرض می‌شود. برای نشان دادن اعتبارسنجی روش حل در مسائل با ابعادکوچک ابتدا CPLEX را اجرا کردیم تا به جواب بهینه برسد. سپس تعداد تکرار را برای الگوریتم یک مقدار ثابت ۵۰ در نظر گرفتیم و الگوریتم را اجرا می‌کنیم.

با توجه به مقادیر تابع هدف الگوریتم پیشنهادی و CPLEX مقدار RE[9] با توجه به فرمول زیر محاسبه شده است.

خطای محاسبه شده الگوریتم پیشنهادی از رابطه (۲۱) به‌دست آورده می‌شود.

$$RE = \frac{O.F. - O.F.^*}{O.F.^*} \times 100 \quad (۲۱)$$

که در آن:

$O.F.$: بهترین مقدار تابع هدف پیدا شده توسط الگوریتم.

$O.F.^*$: مقدار بهینه تابع هدف در CPLEX

همانطور که مشاهده می‌شود مقدار اندک RE نمایانگر کارآمدی مدل در ابعاد کوچک با توجه به زمان اجرای کمتر نسبت به زمان اجرای CPLEX است

جدول ۵. نتایج حل مسائل آزماینده CPLEX و روش حل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد کوچک

تکرار					حل مدل				RE
					CPU time		O.F.		
	t	k	G	F	CPLEX	SA	CPLEX	SA	
۱	۱	۲	۵	۷	۲۵٤	۹۹	۲۰۱۱۲	۲۰۱۱۲	۰
۲	۲	۳	۸	۱۰	۳۸۷	۲۲٤	٤٥۲۷٥	٤٦٥۷٤	٪۲,۹
۳	۲	٤	۱۰	۱۰	٤٥٤	۲۸٤	٥۱۲٤۱	٥۲۷٤٥	٪۲,۹
٤	۱	۳	۸	۹	۳۱۱	۱٤٥	۲٦۷٥۷	۲٦۷٥۷	۰
٥	۲	۲	۷	۸	۳٥۹	۱٤۲	٤٦۱۲۰	٤٦۱۲۰	۰
٦	۱	٤	۱۰	۸	۳٤٥	۱٦٤	۳۰۲٥۳	۳۰٥٤۷	٪۰,۹
۷	۲	٤	۹	۹	٤٦۳	۲٦۰	٤۸۹۷۱	٤۹۲٥٤	٪۰,٥
۸	۲	۳	۷	۱۰	۳۸٤	۲۳۲	٤۳۲٥۷	٤۳۸۹۷	٪۱,٤
میانگین								٪۱,۰۷	

جدول ٦. نتایج حل مسائل آزماینده CPLEX و روش حل پیشنهادی برای مسائل با ابعاد بزرگ

تکرار					حل مدل					RE
					CPU time		O.F.			
	t	k	G	F	CPLEX	SA	CPLEX	SA	L.B.	
									۱۳۰۱٥٤	٪۳,۳
۹	۳	٥	۱٤	۱٥	۳٦۰۰	٤۷۸	۲۲۳٤۷۸	۱۳٤٥۷۸		
۱۰	٤	٦	۱٥	۲٥	۳٦۰۰	۷۲٦	۲۷۸۱۲۹	۱٥۳٥۸۷	۱٥۱۸۷۹	٪۱,۱
۱۱	۳	٦	۱٥	۲۰	۳٦۰۰	٤۹۷	۲٤۸۹۷۰	۱٤۲٦۹۷	۱۳۸۷٥۱	٪۲,۸
۱۲	٥	۷	۲۰	۲٤	۳٦۰۰	۹۸۷	–	۲٤۷٥۷۲	–	–
۱۳	٤	٥	۱۸	۱٥	۳٦۰۰	۸٦۸	۳٤٥٤٦۳	۱۷۲۱٤۰	۱۷۱٦٥۸	٪۰,۲
۱٤	٥	٦	۱٥	۱۸	۳٦۰۰	۹۲٤	۲۸٥٤٦۳	۲۰۷٤٦۷	۲۰٤۱٥۹	٪۱,٦
۱٥	۳	۷	۲۰	۲۳	۳٦۰۰	٥۰۲	–	۱۷٦٥۸۹	–	–
۱٦	٤	۷	۱۹	۱۹	۳٦۰۰	۷۹۸	–	۲۰٤٥٦٤	–	–
میانگین										٪۱,۷٦

۵- نتیجه‌گیری

مساله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی یکی از موضوعات بسیار پرکاربرد در این حوزه محسوب می‌شود. از آنجایی که یکی از پر هزینه‌ترین قسمت در فرآیند مدیریت پسماند، حمل و نقل و جمع‌آوری پسماندها می باشد، لازم است که به طور علمی کوتا هترین مسیر حرکت جمع آوری پسماندها را که دارای بیشترین پوشش نرخ جمع آوری در مناطق تحت پوشش است محاسبه گردد. در این مقاله به مکان یابی مراکز جمع‌آوری پسماندها و مسیریابی وسایل نقلیه برای جمع‌آوری آنها از مراکز تولید با درنظر گرفتن پنجره زمانی پرداخته شده است. در ابتدای این مقاله، مسئله پژوهش و اهداف و سوالات آورده‌شد. سپس به مطالعه ادبیات موضوع پرداخته‌شد و نشان داده شد که یک شبکه‌ی حمل‌ونقل پسماندهای خطرناکی را که شامل مراکز احیا، بازیافت و انهدام به همراه تیم‌های امدادی باشد را بررسی نکرده‌اند. در این تحقیق برای بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده، ۱۶ مسئله نمونه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد الگوریتم با اختلاف ناچیز در مقدار تابع هدف، زمان حل کوتاهتری دارد. این پژوهش را می‌توان از چند جنبه توسعه داد: ۱- تغییر در برخی از مفروضات مسئله و یا افزودن فرض‌های جدید. برای مثال با توجه به در نظر گرفتن پنجره زمانی می‌توان بجای پرداخت هزینه در ازای عبور از مسیر، منع تردد درنظر گرفت. ۲- استفاده از سایر روش‌ها برای حل مدل پیشنهادی و مقایسه نتایج با نتایج حاصل از روش حل این مطالعه، ۳- با توجه به اینکه این موضوع به نوعی می‌تواند شامل ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی شود می‌توان به سمت مفهوم پایداری این تحقیق را سوق داد و ٤- حل مسئله به صورت مسئله چندهدفه.

٦- پی‌نوشت‌ها

1- Treatment
2- Bi – Level
3- Road Trip
4- Common Weight DEA
5- Augmented Ɛ Constraint Method
6- Fix-And-Optimize Approach
7- Simulated Annealing
8- Taghuchi
9- Relative Error
10- Lower Bound

۷- مراجع

-عطائی، اسفندیار، صادقیان، رامین، حامدی، مریم (۱۳۹۸). ارایه یک مدل چندهدفه جهت مکانیابی مراکز توزیع و مسیریابی خودروهای توزیع خون در شرایط بحران. *پژوهشنامه حمل و نقل*، (٤)١٦، ١٤٧-١٦٤.

-عطائی، اسفندیار، صادقیان، رامین، حامدی، مریم (۱۳۹۹). ارایه یک مدل چندهدفه یکپارچه برای مکان‌یابی- مسیریابی و موجودی تسهیلات امدادی با در نظر گرفتن چندوجهی حمل و نقل و تور پوششی. *پژوهشنامه حمل و نقل*،(۲)۱۷، ۴۹-٦٦.

-Aydemir-Karadag, A. (2018). A profit-oriented mathematical model for hazardous waste locating-routing problem. *Journal of Cleaner Production*, *202*, 213-225.

-Rabbani, M., Heidari, R., Farrokhi-Asl, H., & Rahimi, N. (2018). Using metaheuristic algorithms to solve a multi-objective industrial hazardous waste location-routing problem considering incompatible waste types. *Journal of Cleaner Production*, *170*, 227-241.

under population and environmental impact considerations. *Journal of Environmental Management*, 203, 720-731.

-Zhao, J., & Verter, V. (2015). A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers & Operations Research*,*62*, 157-168.

-Zhao, J., & Zhu, F. (2016). A multi-depot vehicle-routing model for the explosive waste recycling. *International Journal of Production Research*, *54*(2), 550-563.

-Rabbani, M., Heidari, R., & Yazdanparast, R. (2019). A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*,*272*(3), 945-961.

-Taslimi, M., Batta, R., & Kwon, C. (2017). A comprehensive modeling framework for hazmat network design, hazmat response team location, and equity of risk. *Computers & Operations Research*, *79*, 119-130.

Yilmaz, O., Kara, B. Y., & Yetis, U. (2017). Hazardous waste management system design

Dangerous Industrial Waste Transportation Network Design Considering Time-Dependent Risk

Sahar Habibzadeh Bijani, M.Sc., Grad., Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Hadi Sahebi, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

E-mail: hadi_sahebi@iust.ac.ir

Received: June 2024- Accepted: September 2024

ABSTRACT

Technology progress is a cause of industrial hazardous wastes increasing in the whole world. Management of hazardous waste is a significant issue due to the imposed risk on environment and human life. This risk can be a result of location of undesirable facilities and also routing hazardous waste. Industrial hazardous waste management involves the collection, transportation, recycling and disposal of industrial hazardous materials that pose risk to their surroundings. The present study extends a bi-objective mathematical model in the context of industrial hazardous waste management, which covers the integrated decisions of two levels with locating and vehicle routing. Analyzing these decisions simultaneously not only may lead to the most effective structure in the waste management network, but also may reduce the potential risk of managing the hazardous waste. The problem is formulated as a bi-objective Mixed-Integer Nonlinear Programming (MINLP) model, which can be easily converted into a MILP one. In the mathematical model, three criteria are considered: minimizing total cost, which includes total transportation cost of hazardous, earliness and tardiness penalties and fixed cost of establishing centers; minimizing total transportation risk related to the population exposure along transportation routes of hazardous materials and minimizing total risk for the population around treatment and disposal centers. A DEA is applied to select the locations with high priority in CPLEX. A simulated annealing algorithm combined with an MILP solver is proposed as the solution approach. For validation of the presented method, instances with various sizes are solved. The results of the GA in small size instances, has a small deviation from the optimal fitness values. Finally, a real case study is provided to demonstrate the applicability of the model in real-world environment. Sensitivity analysis is performed to show the effect of earliness and tardiness penalty on the objective function.

Keywords: Vehicle Routing Problem, Location, Industrial Hazardous Wastes, Waste Management, Risk