مکان‌یابی تسهیلات انتقال پسماند با ملاحظات زیست‌محیطی و اجتماعی، مطالعه موردی: شهر تهران

آرمین جبارزاده[۱]، فرزانه دربانیان[۲*]، هانیه ظهورفاضلی[۳]، کامران سرمدی[۴]

دانشگاه علم و صنعت ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۲۸

چکیده

از مسائل مهم در مدیریت پسماند، کمینه‌سازی هزینه خدمات و اثرات سوء بر محیط‌زیست و اجتماع است. در این راستا، مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال و مراکز دفن پسماند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطالعه حاضر به‌منزله پژوهش کاربردی با استفاده از رویکرد تحلیل سلسله مراتبی در تصمیم‌گیری چندمعیاره و با در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی در چهار سطح منفعت، فرصت، هزینه و ریسک برای مکان‌های پیشنهادی و بهره‌گیری از نتایج آن در مدل‌سازی چندهدفه به ارائه چارچوب نوینی در شناسایی مکان بهینه دفن و ایستگاه‌های انتقال پسماند پرداخته است. مدل پیشنهادی، دو هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل و بیشینه کردن امتیاز زیست‌محیطی و اجتماعی مکان‌های پیشنهادی منتخب را پیگیری کرده و با روش وزن‌دهی قابل حل است. این فرآیند در شهر تهران برای شناسایی مکان‌های بهینه مرکز دفن و ایستگاه انتقال پسماند جدید، اجرا و با توجه به موقعیت مکان‌های پیشنهادی، منطقه قلعه‌نو جهت مرکز دفن و منطقه مهرآباد جهت ایستگاه انتقال انتخاب شده‌اند که کارایی جمع‌آوری پسماند را بیشتر و هزینه حمل‌ونقل و مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی را کمتر نموده است.

واژه‌های کلیدی: پسماند، ملاحظات زیست‌محیطی- اجتماعی، ایستگاه انتقال، تصمیم‌گیری چندمعیاره، مدل چندهدفه.

۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم زیست‌محیطی که شهرهای بزرگ با آن مواجه هستند، مدیریت انواع پسماند است که عدم مدیریت صحیح آن، می‌تواند موجب آلودگی منابع آبی سطحی و زیرزمینی، خاک و هوا در سطح گسترده‌ای گردد. در فرآیند جمع‌آوری پسماند از منازل ابتدا به تسهیلات انتقال (هاب) فرستاده شده و سپس از این نقاط به مراکز دفن منتقل می‌شوند. تسهیلات هاب، محل تخلیه و بارگیری پسماند از خودروهای جمع‌آوری به خودروهای سنگین‌تر به‌منظور حمل به مرکز دفن می‌باشند [۲ و ۱].

ایستگاه‌های انتقال پسماند، باعث افزایش راندمان فرآیند جمع‌آوری و کاهش همه جانبه هزینه‌های حمل‌ونقل، مصرف انرژی، ترافیک کامیون‌ها و آلودگی هوا می‌گردند. مکان‌یابی تسهیلات انتقال و دفن پسماند با معیارهای مناسب به‌دلیل اثرگذاری بر چرخه طبیعی و زندگی انسانی از ضروریات طرح‌های توسعه شهری است[۳].

به‌طور معمول برای مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال سعی در کمینه‌سازی فاصله آنها از نقاط شهری و مکان‌های دفن می‌شود. این در حالی است که موارد بسیاری ازجمله وضعیت

۱- استادیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست‌الکترونیکی:arminj@iust.ac.ir

۲*- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی لجستیک و زنجیره تأمین؛ دانشگاه علم و صنعت ایران، نویسنده پاسخگو، پست‌الکترونیکی: f.darbaniyan@gmail.com، نشانی: تهران، خیابان رسالت، خیابان فرجام، دانشگاه علم و صنعت ایران، کد پستی ۱۶۸۴۶۱۳۱۳۱

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی لجستیک و زنجیره تأمین، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست‌الکترونیکی: zohourfazeli@ind.iust.ac.ir

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی لجستیک و زنجیره تأمین، دانشگاه علم و صنعت ایران، پست‌الکترونیکی: kamran.uut@gmail.com

گسل‌ها، منابع آب زیرزمینی و سطحی، محدودیت‌های نظامی، شهرسازی و قانونی، فاصله تا تسهیلات دفن و نقاط شهری تولیدکننده پسماند و غیره باید در نظر گرفته شوند تا نقاط انتخاب شده کمترین مخاطرات زیست‌محیطی و اجتماعی را در آینده داشته باشند [۴].

در مقاله حاضر به‌منظور مکان‌یابی مراکز دفن و تسهیلات انتقال پسماند، علاوه بر عامل هزینه، ملاحظات زیست‌محیطی و اجتماعی نیز در مدل‌سازی ریاضی در نظر گرفته شده است. بدین منظور با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به هر ایستگاه انتقال، وزنی بر اساس میزان توجه به معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی در سطوح چهارگانه منفعت، فرصت، هزینه و ریسک داده شده و در نتیجه مسئله فوق به بهینه‌سازی چند هدفه تبدیل شده است. در این مسئله هدف اول کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل برای انتقال پسماندها به تسهیلات انتقال و مراکز دفن است و هدف دوم به بیشینه‌سازی مجموع وزن‌های حاصله بر اساس معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی برای تسهیلات انتقال انتخاب شده از بین نقاط بالقوه پرداخته است. در مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال، عدم قطعیت در پارامترهای مسئله، از قبیل میزان تولید پسماند در فصول مختلف سال بسیار محتمل است. در مسائل بهینه‌سازی احتمالی، احتمال رخداد هر سناریو قابل اندازه‌گیری است. بر این اساس در این مقاله دو سناریو قابل طرح است. در سناریو اول میزان پسماند تولیدی که باید از نقاط شهری جمع‌آوری و منتقل شود، متوسط است و دارای میانگین یکسان در بیشتر روزهای سال می‌باشد، در حالی که در سناریو دوم شرایط ویژه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن میزان پسماند تولیدی به دلایلی همچون قرار گرفتن در روزهای خاصی از سال مانند اعیاد بیشتر است. در نظر گرفتن عدم قطعیت، مسئله را به شرایط واقعی نزدیک‌تر می‌کند. می‌توان مشاهده نمود که هزینه مسئله با استفاده از مدل پیشنهادی به ازای رخداد سناریوها کمتر از پیکره‌بندی اولیه است [۱۸].

جهت بررسی کاربرد واقعی این پژوهش، شهر تهران در نظر گرفته شده است که در آن سرانه تولید پسماندهای خانگی و شهری به بیش از ۷۰۰۰ تن می‌رسد. پسماندهای جمع‌آوری گردیده از مناطق ۲۲ گانه شهری به تسهیلات انتقال منتقل و پس از ثبت اطلاعات مربوط به نوع بار، پیمانکار، تاریخ و زمان در خودروهای سنگین‌تر بارگیری و به مراکز دفن حمل می‌گردند. مکان‌یابی غیراصولی محل فعلی برخی ایستگاه‌های انتقال، موجب آلودگی شدید آب و خاک، تخریب چشم‌اندازها و مقاومت‌های اجتماعی شده است. بدون شک با گذشت زمان و افزایش جمعیت، جوامع به‌منظور پاسخ‌گویی نیازها به سمت احداث مراکز دفن و تسهیلات انتقال جدید سوق پیدا می‌کنند.

در این پژوهش هر یک از مناطق ۲۲ گانه شهر تهران به‌عنوان یک نقطه جمع‌آوری پسماند در نظر گرفته شده است. همچنین برای مکان‌یابی تسهیلات انتقال و دفن، مناطقی با استانداردهای لازم به‌عنوان نقاط بالقوه معرفی شده‌اند. بدین منظور، سه منطقه خزانه، جوادیه و مهرآباد به‌عنوان نقاط بالقوه برای تسهیلات انتقال و دو منطقه اندیشه و قلعه‌نو نقاط بالقوه برای مراکز دفن توسط کارشناسان و خبرگان این حوزه معرفی شده‌اند. سپس، به هر یک از نقاط وزنی بر اساس معیارهای زیست‌محیطی- اجتماعی داده شده و مکان‌های بهینه تسهیلات انتقال و دفن از بین نقاط بالقوه موجود با هدف کاهش هزینه و آسیب‌های زیست‌محیطی- اجتماعی انتخاب شده است. مکان‌یابی تسهیلات مرتبط با پسماند تاکنون بیشتر به کمک محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی و ترکیب آن با روش‌های تصمیم‌گیری مختلف انجام شده است و مشخصه‌ای که پژوهش حاضر را از بقیه متمایز می‌سازد، مدل‌سازی ریاضی مسئله با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی و اجتماعی در کنار بعد اقتصادی در مکان‌یابی تسهیلات انتقال پسماند است.

۱-۱- مرور ادبیات

نقاط هاب تسهیلات ویژه‌ای هستند که در بسیاری از سیستم‌های توزیع به‌عنوان نقاط تعویض، انتقال و طبقه‌بندی به کار رفته است. در بررسی ادبیات و مقالات منتشر شده این موضوع می‌توان کاربردهای متفاوتی را برای این نقاط مشاهده کرد. از پرکاربردترین حوزه‌های مطالعه مربوط به هاب می‌توان به فرودگاه و شرکت‌های هوایی اشاره کرد. برای مثال آلدر[1] و همکاران در سال ۲۰۰۵، ۲۱ فرودگاه در خاورمیانه را برای سیستم‌های تحویل بار مورد مطالعه قرار دادند[۹]. همچنین، یانگ[2] در سال ۲۰۰۹ ترافیکمسافرهای هوایی در تایوان و

1 - Alder
2 - Yung

چین را مورد مطالعه قرار داد. سایر پژوهشگران مانند کوستا[1] و همکاران در سال ۲۰۰۹، لین[2] در سال ۲۰۱۰، کریمی و همکاران در سال ۲۰۱۰ و غیره، هر یک به مسائل مختلفی مانند هاب‌های فرودگاه‌ها وحمل‌ونقل هوایی پرداخته‌اند[۷، ۱۲ و ۱۴]. از دیگر موارد کاربرد هاب‌ها که در ادبیات به آنها اشاره شده است می‌توان به خدمات اورژانسی، تحویل پستی و سیستم‌های تحویل سریع، لجستیک و مدیریت زنجیره تأمین، خدمات ارتباطی و شبکه‌های تحویل پیام و سیستم‌های حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی و چندگانه اشاره کرد [۶ و ۵].

از کاربردهای دیگر نقاط هاب می‌توان به ایستگاه‌های انتقال پسماند اشاره کرد. ایزلت[3] در سال ۲۰۰۷ تلاش کرده است که به مکان‌یابی مراکز دفن پسماند و ایستگاه‌های انتقال با هدف کمینه‌کردن هزینه‌های حمل بپردازد. در مقاله فوق، فقط به کمینه کردن هزینه پرداخته شده‌است، درحالی‌که با توجه به ماهیت مسئله جمع‌آوری، انتقال و دفن پسماند که آلودگی‌های زیست‌محیطی و مقاومت‌های اجتماعی جدی را در پی دارد، در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی مربوط در این مسائل ضروری به نظر می‌رسد [۲۱ و ۱۷].

در ادبیات چند مقاله، مانند کوربت[4] و کلیندورفر[5] (۲۰۰۱)، کلیندورفر و همکاران در سال ۲۰۰۵ بر مدیریت عملیات پایدار، اسریواستاوا[6] (۲۰۰۷) و سارکیست[7] و همکاران (۲۰۱۱) بر مدیریت زنجیره تأمین سبز، اسبیحی[8] و ایگلس (۲۰۱۰) بر بهینه‌سازی ترکیبی و لجستیک سبز و در سال‌های اخیر دکر[9] و همکاران (۲۰۱۲) مروری در طراحی شبکه لجستیک سبز انجام شده که جامع‌تر، به روزتر و با جزئیات بیشتر به شبکه حمل‌ونقل پرداخته است. با توجه به جنبه‌های حمل‌ونقل مکینان[10] و وودبرن[11] (۱۹۹۶)، پیسیک[12] و مکینان (۲۰۱۰) مطالعاتی را بر فاکتورهای مربوط به نشر دی‌اکسیدکربن در حمل‌ونقل جاده‌ای با یک چارچوب توسعه یافته و با پنج نوع فاکتور، مختصر، ساختاری، تجاری، عملیاتی و وظیفه‌ای و فاکتورهای بیرونی انجام داده است[۲۲ و ۲۰].

تاکنون فقط دو مقاله در زمینه مکان‌یابی سبز نقاط هاب ارائه شده است. در این دو مقاله که هر دو در سال ۲۰۱۴ توسط آقای محمدی و همکاران انجام گرفته‌اند، سعی شده است علاوه بر هدف کمینه کردن هزینه‌های حمل‌ونقل، کاهش میزان نشر گازهای گلخانه‌ای توسط وسایل نقلیه و همچنین میزان آلودگی صوتی حاصل از این وسایل در هاب‌ها نیز به مسئله اضافه شود [۲۵ و ۲۴]. در این مقالات تنها عامل تولید آلودگی زیست‌محیطی در هاب‌ها، گازهای گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. در مقاله پیش‌رو، از آنجا که به‌طور خاص به انتقال و دفن پسماند پرداخته شده، مسائلی از قبیل محافظت از تنوع زیستی، آمایش زمین، کاهش آلودگی (صوتی، دیداری، شنیداری)، سلامت افراد منطقه، مقاومت‌های اجتماعی و همچنین آلاینده‌های حاصل از پسماند و غیره به‌عنوان فاکتورهای زیست‌محیطی-اجتماعی در مدل‌سازی مسئله لحاظ شده است.

۲- روش تحقیق

انتخاب مکان بهینه تسهیلات انتقال و دفن یکی از مهم‌ترین پیامدهای بخش‌های مدیریت پسماند است که نیازمند تصمیم‌گیری با چندین معیار است. روش کار بدین صورت است که به‌منظور تعیین مکان بهینه، گزینه‌ها شامل نقاط بالقوه با معیارهای زیست‌محیطی و اجتماعی ارزیابی می‌شوند و امتیازی کسب می‌کنند که از آن در مدل‌سازی مسئله استفاده می‌شود. در واقع، هدف این است که با انتخاب تعداد مشخصی از تسهیلات انتقال از بین نقاط بالقوه که هر یک امتیازهای مربوط به خود را گرفته‌اند، بیشترین امتیاز محیطی اجتماعی حاصل شود. سپس مسئله چندهدفه، با هدف کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل برای انتقال پسماندها به تسهیلات انتقال و دفن و هدف بیشینه کردن امتیاز زیست‌محیطی و اجتماعی تسهیلات منتخب از نقاط بالقوه مدل‌سازی شده و نقاط بهینه تعیین می‌گردند.

1- Costa
2- Lin
3- Eiselt
4- Corbett
5- Kleindorfer
6- Serivastava
7- Sarkist
8- Sbihi
9- Deker
10- Makinan
11- Woodbern
12- Pisik

۲-۱- تصمیم‌گیری چندمعیاره جهت تعیین امتیاز زیست‌محیطی و اجتماعی مراکز

امکان مقایسه درست بین گزینه‌ها با انتخاب شاخص‌های مناسب در ارزیابی هر موضوع به تصمیم‌گیرنده‌ها داده می‌شود. زمانی که چندین شاخص برای ارزیابی لحاظ گردد، کار ارزیابی پیچیده می‌شود و مقایسه از حالت ساده تحلیلی خارج شده و به ابزار تحلیل عملی نیاز خواهد بود. تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه، جهت فائق آمدن بر مشکلاتی که نیاز به تصمیم‌گیری در برابر حجم زیادی از اطلاعات پیچیده دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از گسترده‌ترین ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی است [۲۷ و ۲۶].

در این مقاله، ابتدا گزینه‌ها یعنی نقاط بالقوه معرفی شده و سپس معیارهای مکان‌یابی که حاصل پژوهش‌های علمی گذشته و نظر کارشناسان خبره مربوطه می‌باشند، در چهار دسته اصلی منفعت، فرصت، هزینه و ریسک شناسایی شده‌اند. سرانجام، بهترین گزینه‌ها بر اساس روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی رتبه‌بندی می‌شوند و به هر نقطه بالقوه جهت احداث هاب امتیازی تعلق می‌گیرد. فلوچارت روش پیشنهادی برای مکان‌یابی بهینه تسهیلات هاب پسماند با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۲- مدل‌سازی ریاضی چندهدفه

در مسئله مورد نظر، مجموعه‌ای از مشتریان وجود دارند که هر روزه پسماند تولید می‌کنند. همان‌طور که واضح است، در دنیای واقعی میزان پسماند تولیدی در ایام خاص سال مانند فصول گرم و سرد و یا ماه آخر سال متفاوت است و در نتیجه سناریوهای مختلفی برای تولید پسماند وجود دارد. از این‌رو در مدل‌سازی مسئله، رویکرد سناریویی در نظر گرفته شده‌است که هر سناریو با احتمال مشخصی که از تجربیات قابل مشاهده است، اتفاق می‌افتد. به این ترتیب، پسماند تولیدی در سناریوهای مختلف از دو طریق به محل دفن پسماند جهت پردازش، بازیافت و دفن منتقل می‌شود. در روش اول پسماندهای جمع‌آوری شده از مناطق مختلف شهر به‌طور مستقیم به مراکز دفن ارسال می‌شوند؛ اما به‌دلیل بعد مسافت و مسائل حمل‌ونقل، منطقی است که ایستگاه‌های مختلفی در مناطق شهری وجود داشته باشند، به‌طوری که پسماندهای جمع‌آوری شده ابتدا به این ایستگاه‌های انتقال (هاب) که برای هرکدام از آنها ظرفیت مشخصی در نظر گرفته شده فرستاده شده و پس از تخلیه و بارگیری از آنجا به مرکز دفن اصلی منتقل شوند.

هدف اصلی اکثر مدل‌های ریاضی کمینه‌کردن هزینه‌ها است، اما در واقعیت دستیابی به اهداف گوناگون دیگری نیز در کنار اهداف اقتصادی حائز اهمیت هستند. در نتیجه مدل‌سازی‌های چند هدفه رواج یافته است. در مقاله حاضر، هدف اول به کمینه‌کردن هزینه‌های انتقال پسماند به محل دفن به‌طور مستقیم و یا به‌طور غیرمستقیم با بهره‌گیری از هاب می‌پردازد و هدف دوم مربوط به بیشینه‌سازی امتیازهای زیست‌محیطی و اجتماعی است، به‌طوری‌که با رویکرد سلسله مراتبی و معیارهایی که در جدول (۲) آمده است، نقاط بالقوه جهت احداث هاب امتیازدهی شده و در واقع انتخاب حاصل حتی الامکان مشکلات زیست‌محیطی و اجتماعی کمتری ایجاد می‌کند.

مفروضات

مفروضات این مسئله به شرح زیر می‌باشند.

۱- تعداد مراکز دفن و هاب‌هایی که باید مکان‌یابی شوند، مشخص است.

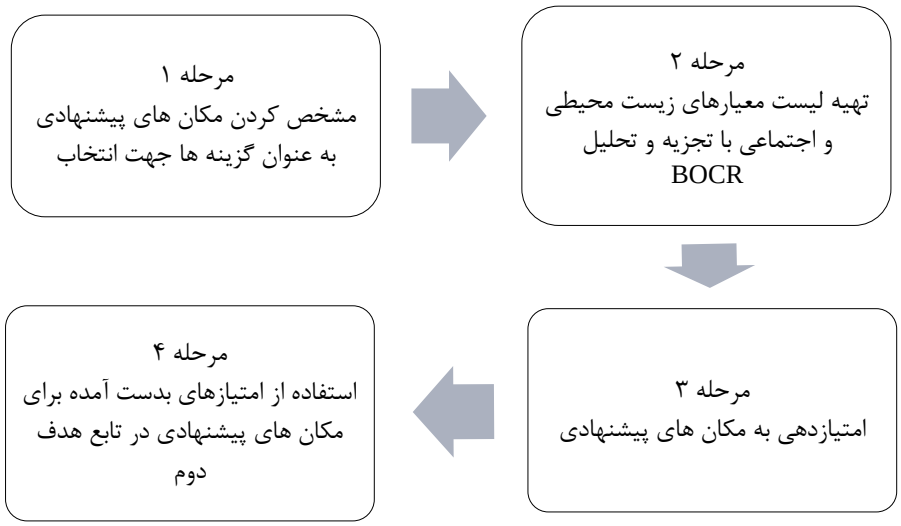
۲- درصدی از پسماندهای تولیدی هر مشتری به‌طور مستقیم و درصدی از طریق تسهیلات انتقال به مراکز دفن ارسال می‌شوند.

۳- هر ایستگاه انتقال ظرفیت محدودی دارد.

۴- وزن معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی هر ایستگاه انتقال از قبل توسط کارشناسان محاسبه شده و مشخص است.

۵- تمام پسماندهای منتقل شده به تسهیلات انتقال به مراکز دفن فرستاده می‌شوند.

۶- دو سناریو محتمل مطرح شده که احتمال وقوع هر یک مشخص است. در سناریو (۱) میزان پسماند تولیدی که باید از نقاط شهری جمع‌آوری و منتقل شود، متوسط و دارای میانگین یکسان در بیشتر روزهای سال است. در سناریو (۲) شرایط خاص در نظرگرفته می‌شود که در آن میزان پسماند تولیدی به دلایلی همچون قرار گرفتن در روزهای خاص سال و اعیاد ویژه، بیشتر است.



شکل (۱): روش پیشنهادی برای مکان‌یابی بهینه هاب پسماند با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره

مجموعه‌ها

i مجموعه مشتریان

j مجموعه محل‌های دفن

k مجموعه هاب‌ها

s مجموعه سناریوها

پارامترها

d_{ij}: فاصله بین مشتری i و محل دفن j

d_{ik}: فاصله بین مشتری i و هاب k

d_{kj}: فاصله بین هاب k و محل دفن j

α: ضریب تخفیف

r: تعداد محل‌های دفن

q: تعداد ایستگاه‌های هاب

w_i^s: میزان پسماند تولیدی توسط مشتری i در سناریو s

P^s: احتمال وقوع سناریو s

B: ظرفیت مراکز انتقال

متغیرهای تصمیم

x_{ij}^s: درصدی از پسماندهای مشتری i که در سناریوی s به‌طور مستقیم به محل دفن j فرستاده می‌شود.

x_{ikj}^s: درصدی از پسماندهای مشتری i که در سناریوی s از طریق ایستگاه k به محل دفن j فرستاده می‌شود.

y_j: برابر ۱ اگر محل دفن پسماند در نقطه j مکان‌یابی شود.

Z_k: برابر ۱ اگر در محل k ایستگاه انتقال انتخاب شود.

شرح مدل

برای مسئله شرح داده شده، مدل ریاضی زیر پیشنهاد داده شده است.

$$Min \quad TTC = \sum_i \sum_j \sum_s P^s w_i^s d_{ij} X_{ij}^s + \sum_i \sum_k \sum_l \sum_s P^s w_i^s (d_{ik} + \alpha d_{kj}) X_{ikj}^s \quad (۱)$$

$$Max \quad TW = \sum_k v_k z_k \quad (۲)$$

$$st:$$

$$\sum_j y_j = r \quad (۳)$$

$$\sum_k z_k = q \quad (۴)$$

$$\sum_j (X_{ij}^s + \sum_k X_{ikj}^s) = 1 \quad \forall i, s \quad (۵)$$

$$X_{ij}^s + \sum_k X_{ikj}^s \le y_j \quad \forall i, j, s \quad (۶)$$

$$\sum_j X_{ikj}^s \le z_k \quad \forall i, k, s \quad (۷)$$

$$\sum_s \sum_j \sum_i P^s x_{ikj}^s z_k \le B \quad \forall k \quad (۸)$$

$$X_{ij}^s, X_{ikj}^s \ge 0 \quad \forall i, j, k, s \quad (۹)$$

$$y_j = \{0,1\} \quad \forall j \quad (۱۰)$$

$$z_k = \{0,1\} \quad \forall k \quad (۱۱)$$

محدودیت‌ها و توابع هدفی که در این مدل‌سازی وجود دارند به شرح زیر است:

عبارت شماره یک، تابع هدف اول مسئله است، این عبارت مجموع هزینه‌های ارسال پسماند به ایستگاه‌های انتقال و مراکز دفن را کمینه می‌کند. عبارت شماره ۲ تابع هدف دوم مسئله می‌باشد که تلاش بر بیشینه کردن مجموع وزن فاکتورهای زیست‌محیطی دارد. محدودیت شماره (۳) و (۴) مربوط به تعداد هاب‌ها و مراکز دفن است. محدودیت شماره (۵) بیان می‌کند که مجموع درصد پسماند ارسالی به محل دفن و هاب برای هر مشتری در هر سناریو برابر یک است. محدودیت (۶) فقط زمانی امکان ارسال پسماند به محل دفن j را می‌دهد که محل دفنی در مکان j تأسیس شده باشد. به‌طور مشابه محدودیت شماره (۷) نیز فقط در صورت احداث هاب در مکان k اجازه ارسال پسماند به آن را می‌دهد. محدودیت شماره (۸) محدودیت ظرفیت تسهیلات انتقال است. سایر محدودیت‌ها مثبت بودن و یا صفر و یک بودن متغیرها را تضمین می‌کنند.

۲-۳- مطالعه موردی

در حال حاضر شهر تهران با جمعیتی بالغ بر ده میلیون نفر، روزانه بیش از ۷۰۰۰ تن پسماند تولیدی دارد که نیازمند تدبیر مدیریتی مبتنی بر اصول مهندسی است. شهر تهران طبق آخرین تقسیم‌بندی شهری، به ۲۲ منطقه تقسیم شده است. اکثر پسماند شهر تهران مربوط به پسماند شهری مناطق با میانگین ۲۳۴۰۰۳۱۰۴۸ کیلوگرم است که این میزان نیز بر طبق فصول سال و ایام خاص مانند قبل از سال نو تغییر می‌یابد.

جمع‌آوری پسماند از سطح مناطق معمولاً توسط خودروهای متفاوتی انجام می‌شود. با اجرا و توسعه عملیات مکانیزاسیون خدمات شهری در سطح شهر تهران، پسماندها در مخازن مخصوص خودروهای مکانیزه جمع شده و پس از تکمیل ظرفیت به ایستگاه انتقال یا مستقیماً به مرکز دفن منتقل می‌گردد.

در شهر تهران تنها مرکز دفن پسماند، آرادکوه بوده و تعداد تسهیلات انتقال فعلی ۱۱ است که با توجه به گسترش جمعیت و نیازهای آتی، پس از بررسی‌های مربوطه و با استفاده از نظر خبرگان سه منطقه خزانه، جوادیه و مهرآباد به‌عنوان نقاط بالقوه برای تسهیلات انتقال و دو منطقه اندیشه و قلعه‌نو نقاط بالقوه دفن پیشنهاد شده‌اند. اطلاعات حاصله در مورد میزان پسماند تولیدی مشتریان مناطق ۲۲ گانه تهران بر اساس کیلوگرم در هر روز و در هر سناریو و فاصله آنها تا نقاط بالقوه برای احداث محل دفن و هاب بر حسب کیلومتر از

طریق حمل جاده‌ای در جدول (۳) قابل مشاهده است. به‌طور مشابه، اطلاعات مربوط به نقاط بالقوه برای احداث محل دفن و هاب در جدول (۱) گردآوری شده است.

۲-۴- حل مدل و تحلیل نتایج

روش حل وزن‌دهی

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، مدل پیش رو یک مدل چندهدفه است، درنتیجه برای حل این مسئله می‌توان از روش وزن‌دهی استفاده کرد. برای انجام این کار باید ابتدا توابع هدف را هم واحد نمود. از آنجا که تابع هدف دوم بدون واحد است، می‌توان تابع هدف اول را مطابق معادله (۱۲) بی واحد نمود.

$$TTC' = \frac{TTC}{1500000} \qquad (۱۲)$$

بعد از هم واحد شدن توابع هدف وزن‌دهی انجام شده و مجموع آنها نوشته می‌شود. از آنجا که در این مسئله توجه به مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی از اهمیت بیشتری برخوردار است، تابع هدف دوم وزن بیشتری را در محاسبات به خود اختصاص می‌دهد (معادله ۱۳).

$$Max \qquad Z = (0.7 \times TW) - (0.3 \times TTC') \qquad (۱۳)$$

نتایج عددی

با توجه به اهداف تحقیق، ابتدا عوامل و معیارهای مؤثر در مکان‌یابی ایستگاه‌های انتقال از طریق مطالعات کتابخانه‌ای و نظرات خبرگان شناسایی شده‌اند. جدول (۲) داده‌های مکانی جمع‌آوری شده مناطق مورد مطالعه متناسب با معیارها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): اطلاعات مربوط به نقاط بالقوه برای احداث هاب

هاب	فاصله تا محل دفن ۱ (قلعه‌نو)	فاصله تا محل دفن ۲ (اندیشه)
۱- جوادیه	۲۸,۱	۵۰,۳
۲- مهرآباد	۳۹,۳	۳۸,۳
۳- خزانه	۴۳,۲	۴۳,۸

جدول (۲): فاکتورهای BOCR و رتبه هر منطقه

BOCR	معیار	رتبه هاب ۱	رتبه هاب ۲	رتبه هاب ۳
منفعت	محافظت از تنوع زیستی	۰,۴۰	۰,۷۰	۰,۵۹
	دسترسی	۰,۹۰	۰,۸۰	۰,۵۷
	کاهش آلودگی ناشی از حمل‌ونقل	۰,۴۰	۰,۶۰	۰,۶۰
	نزدیکی به مناطق تولید پسماند	۰,۸۰	۰,۶۰	۰,۴۵
	دسترسی به نیروی کار	۰,۹۰	۰,۸۰	۰,۴۵
	دوری از مناطق مسکونی	۰,۴۰	۰,۸۰	۰,۶۸
	دوری از چاه‌های زیرزمینی	۰,۶۰	۰,۸۰	۰,۸۲
فرصت	منافع حاصل از بازیافت	۰,۸۰	۰,۸۰	۰,۶۱
	مشوق‌های دولتی	۰,۹۰	۰,۶۰	۰,۵۵
	توسعه	۰,۸۰	۰,۷۰	۰,۸۲
هزینه	استفاده از منابع	۰,۶۰	۰,۵۰	۰,۹۲
	آلودگی (صوتی، دیداری، شنیداری و غیره)	۰,۴۰	۰,۸۰	۰,۶۷
	اثر بر سلامت افراد منطقه	۰,۵۰	۰,۷۰	۰,۸۰
	مشکلات ترافیکی حاصل از احداث هاب	۰,۶۰	۰,۸۰	۰,۷۳

جدول (۲): فاکتورهای BOCR و رتبه هر منطقه

BOCR	معیار	رتبه هاب ۱	رتبه هاب ۲	رتبه هاب ۳
ریسک	آمایش زمین	۰,۷۰	۰,۶۰	۰,۷۷
	اسیدی‌سازی زمین و آلودگی آب و خاک	۰,۷۰	۰,۸۰	۰,۸۱
	گازهای حاصل از پسماند	۰,۶۰	۰,۷۰	۰,۶۳
	تصویر عمومی	۰,۶۰	۰,۸۰	۰,۷۱
	مقاومت اجتماعی	۰,۶۰	۰,۹۰	۰,۸۲
	کاربری اراضی	۰,۶۰	۰,۷۰	۰,۸۶
	جمع کل	**۰,۶۴**	**۰,۷۳**	**۰,۶۹**

جدول (۳): اطلاعات مربوط به هر منطقه

ناحیه	فاصله هر ناحیه تا هاب ۱	فاصله هر ناحیه تا هاب ۲	فاصله هر ناحیه تا هاب ۳	فاصله هر ناحیه تا محل دفن ۱	فاصله هر ناحیه تا محل دفن ۲	مقادیر پسماند در سناریو ۱	مقادیر پسماند در سناریو ۲
۱	۱۶,۵	۲۱,۹	۲۴,۲	۳۳,۵	۶۶	۲,۶۶۸,۵۹	۴,۲۶۹,۷۴
۲	۱۵,۳	۱۳,۵	۱۸,۵	۲۸,۳	۴۶	۳,۷۶۵,۹۷	۶,۰۲۵,۵۵
۳	۲۰	۱۹,۹	۲۱,۱	۳۰,۵	۶۴,۷	۱,۶۲۲,۸۶	۲,۵۹۶,۵۷
۴	۱۹,۵	۲۷	۲۵,۷	۲۹,۶	۷۵,۱	۷,۱۴۷,۳۱	۱۱,۴۳۵,۶۹
۵	۹,۴	۸,۸	۱۳,۲	۱۸,۶	۴۷,۹	۲,۹۰۲,۳۷	۴,۶۴۳,۷۹
۶	۳,۶	۹,۱	۷,۷	۱۹,۱	۵۱,۸	۱,۱۶۸,۲۹	۱,۸۶۹,۲۶
۷	۵,۷	۱۷,۱	۱۸,۶	۲۶,۶	۶۲,۱	۸۰۵,۶۸	۱,۲۸۹,۰۸
۸	۱۳,۸	۲۳,۵	۲۵,۲	۳۰,۹	۶۶,۳	۱,۰۲۶,۸۹	۱,۶۴۳,۰۳
۹	۷,۸	۰	۱۱,۸	۱۶,۵	۳۹,۹	۱۵۰,۴۴	۲۴۰,۷۰
۱۰	۳,۷	۱۱,۸	۹,۹	۱۹,۲	۴۴,۳	۵۲۶,۵۰	۸۴۲,۴۰
۱۱	۲,۸	۷,۲	۵,۳	۱۶,۷	۴۷,۷	۴۳۰,۹۸	۶۸۹,۵۷
۱۲	۴,۱	۱۱,۹	۵,۱	۱۶,۴	۵۷,۷	۸۹۲,۵۸	۱,۴۲۸,۱۲
۱۳	۸,۸	۱۴,۸	۱۷,۹	۲۲,۴	۶۴,۹	۳۹۴,۲۵	۶۳۰,۸۰
۱۴	۱۰,۲	۱۵,۸	۱۹,۲	۲۳,۹	۶۲,۱	۸۵۲,۸۴	۱,۳۶۴,۵۴
۱۵	۱۶,۶	۲۴,۲	۱۴	۱۷,۶	۵۱,۱	۲,۱۳۸,۸۶	۳,۴۲۲,۱۷
۱۶	۱۰,۳	۲۱,۶	۰	۱۳,۷	۶۱,۳	۴۴۳,۳۱	۷۰۹,۲۹
۱۷	۸	۹	۴,۱	۱۱,۵	۵۷,۳	۳۲۱,۷۰	۵۱۴,۷۲
۱۸	۱۳,۳	۹,۵	۱۳,۱	۱۱,۳	۴۲,۱	۶۶۱,۷۷	۱,۰۵۸,۸۳
۱۹	۱۲,۷	۱۰,۴	۷	۸,۱	۴۶,۶	۳۷۰,۹۲	۵۹۳,۴۷
۲۰	۱۷,۱	۲۰,۶	۱۱,۳	۱۳,۹	۵۴,۸	۱,۲۹۶,۷۸	۲,۰۷۴,۸۴
۲۱	۱۵,۴	۹,۲	۱۴,۱	۲۴,۶	۳۱,۴	۳۴۰,۵۹	۵۴۴,۹۵
۲۲	۲۶,۹	۲۲,۵	۲۲,۱	۳۶,۷	۲۴,۹	۱۹۲,۳۸	۳۰۷,۸۱

کدنویسی مدل فوق در نرم‌افزار GAMS صورت گرفته است. پس از حل مدل، از بین نقاط دفن بالقوه نقطه شماره ۱ (قلعه‌نو) و از میان سه کاندید بالقوه برای احداث تسهیلات انتقال نقطه شماره ۲ (مهرآباد) به‌عنوان نقاط بهینه انتخاب شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود اینکه فاصله هاب ۱ (جوادیه) و هاب ۳ (خزانه) تا مناطق ۲۲ گانه کمتر بود، مدل، هاب ۲ (مهرآباد) را به‌عنوان جواب بهینه پیدا کرد. دلیل این مسئله این است که وزن فاکتورهای محیطی و اجتماعی هاب ۲ بیشتر است و در تابع هدف وزن‌دار شده، وزن بیشتری به تابع هدف دوم داده است. در نتیجه حداکثر کردن فاکتورهای محیطی در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد و با توجه به شرایط مناطق، نتیجه حاصل مورد تأیید می‌باشد.

این تحقیق با شناسایی عوامل مؤثر در تعیین مکان مناسب ایستگاه‌های انتقال پسماند، مدیران و برنامه‌ریزان شهری را در شناسایی و انتخاب مکان‌های مستعد استقرار این ایستگاه‌ها یاری می‌رساند. نکته مهم در این تحقیق اهمیت دقت در تعیین وزن‌های مربوط به هر یک از معیارهاست که نقش مهمی در نتایج کار دارد.

۳- نتیجه و جمع‌بندی

امروزه، توسعه مناطق شهری و افزایش بی‌رویه جمعیت، در کنار تولید انواع پسماند شهری، توجه به انتقال این مواد را از محیط زندگی انسان ضروری کرده است. انتخاب مکان مناسب تسهیلات انتقال و دفن پسماند، کارایی فرآیند جمع‌آوری را بیشتر کرده و موجب کاهش هزینه حمل‌ونقل و اثرات سوء زیست‌محیطی و اجتماعی می‌شود.

در این مقاله به مکان‌یابی تسهیلات انتقال و دفن پسماند پرداخته شده است. ایستگاه‌های انتقال، مراکزی شبیه هاب هستند که باعث کاهش هزینه‌های حمل پسماند به مناطق دفن می‌شوند. در این مقاله که به‌طور خاص به مطالعه شهر تهران پرداخته است، فرض شده که پسماندهای شهری به مرکز مناطق ۲۲ گانه تهران فرستاده می‌شوند. سپس با توجه به وزن پسماند و فاصله، درصدی از پسماندها به‌طور مستقیم به مراکز دفن فرستاده شده و مابقی ابتدا به تسهیلات انتقال ارسال می‌گردند و پس از تخلیه و بارگیری به مراکز دفن حمل می‌شوند. سه نقطه بالقوه برای هاب و دو نقطه بالقوه جهت مرکز دفن پیشنهاد شده است. در رویکرد جدید مدل برای مکان‌یابی نقاط هاب و مراکز دفن علاوه بر هدف کمینه کردن هزینه‌ها، تابع هدف دیگری نیز برای بیشینه کردن فاکتورهای زیست‌محیطی و اجتماعی تعریف شده است.

همچنین برای هر یک از نقاط انتقال بالقوه معیارهای اجتماعی و زیست‌محیطی با استفاده از سطوح چهارگانه منفعت، فرصت، هزینه و ریسک تعیین شده و رتبه‌بندی با رویکرد سلسله مراتبی صورت گرفته است.

برای حل این مدل چند هدفه از وزن‌دهی توابع هدف استفاده شده است که اولویت بیشتری را به تابع هدف دوم یعنی نتایج حاصل از حل مدل ایستگاه شماره (۲) را ایستگاه انتقال منتخب، مرکز دفن شماره ۱ را مراکز دفن منتخب نشان می‌دهند و با وجود اینکه هاب ۱ و ۳ به مناطق مختلف شهری و مراکز دفن بالقوه نزدیک‌تر است، مدل هاب ۲ را به‌عنوان ایستگاه انتقال بهینه انتخاب می‌کند، زیرا این نقطه وزن بیشتری برای فاکتورهای زیست‌محیطی و اجتماعی دارد. در نتیجه منطقه مهرآباد به‌عنوان هاب بهینه و منطقه قلعه‌نو به‌عنوان نقطه دفن بهینه انتخاب می‌شود. پیشنهادات زیر جهت انجام مطالعات آتی ارائه گردیده است.

مراکز دفن پسماند همانند تسهیلات انتقال، مسائل زیست‌محیطی ویژه خود را دارند. تولید شیرابه در اثر تجزیه پسماند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی در مراکز دفن مطرح شده است و مهم‌ترین اثر زیست‌محیطی آن، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی است. از این‌رو بررسی آلودگی آب در اثر مجاورت با محل دفن پسماند از مسائل مهم زیست‌محیطی به شمار می‌رود. لذا ضروری است تا پیش‌بینی انتقال و حرکت آلاینده‌ها در محل دفن به لایه‌های زیرین در تصمیم‌گیری‌های مربوط لحاظ شود.

تولید پسماند بدون بازیافت مواد و انرژی موجب از دست دادن منابع طبیعی می‌شود و استحصال انرژی علاوه بر تأمین انرژی، مشکلات محیطی ناشی از تولید پسماند را کاهش می‌دهد. لذا مطالعه میزان انرژی تولیدی از سوزاندن پسماندهای شهری، تحلیل تولید انرژی از شیرابه محل دفن و میزان انرژی تولیدی در سناریوهای مختلف با توجه به میزان پسماندهای بازیافتی و سوزانده شده باید مورد بررسی قرار گیرد.

۴- منابع

[1] A.F. Guneri, M. C .***"A fuzzy ANP approach to shipyard location selection"*** .Expert Systems with Applications.۷۹۹۹–۷۹۹۲ , 2009.

[2] Arai, Takano ***and ."A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport"***. Journal of Marine Science and Technology, 2009.

[3] Aversa, Botter, Haralambides. ***"A mixed integer programming model on the location of a hub port in the East Coast of South***

America". Maritime Economics and Logistics, 2005.

[4] Baird. ***"Optimizing the container transshipment hub location in northern Europe"***. Journal of Transport Geography, 2006.

[5] Berman, Drezner, and Wesolowsky ."***The transfer point location problem"*** .European Journal of Operational Research, 2007.

[6] Bollapragada, Li, and Rao***."Budget-constrained, capacitated hub location to maximize expected demand coverage in fixed-wireless telecommunication networks"*** . INFORMS Journal on Computing, 2006.

[7] Campbell ."***Hub location for time definite transportation"*** .Computers and Operation Research, 2009.

[8] Campbell et al ."***Hub location problems"***. Springer, 2002.

[9] Aversa, Botter, Haralambides ."***A mixed integer programming model on the location of a hub port in the East Coast of South America"*** .Maritime Economics and Logistics, 2005.

[10] Campbell,Ernst,and Krishnamoorthy ."***Hub location problems"***. Springer, 2005.

[11] Carello et al ."***Solving the hub location problem in telecommunications network design: A local search approach"***, 2004.

[12] Cetiner et al ."***Hubbing and routing in postal delivery system"*** .Annals of Operations Research, 2010.

[13] Chen, and Lin ."***An integral constrained generalized hub-and-spoke network design problem"***. Transportation Research, 2008.

[14] Chou ."***Application of FMCDM model to selecting the hub location in the marine transportation: A case study in southeastern Asia"*** .Mathematical and Computer Modeling, 2010.

[15] Costa, Lohmann, and Oliveira ."***A model to identify airport hubs and their importance to tourism in Brazil"*** .Research in Transportation Economics, 2010.

[16] Cunha and Silva ."***A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil"*** .European Journal of operation research, 2007.

[17] Eiselt, H ."***Locating landfills—Optimization vs. reality"*** .European Journal of Operational Research.۱۰۴۹–۱۰۴۰ ,, 2007.

[18] Gelareh and Pisinger ."***Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies"*** .Transportation Research, 2011.

[19] Gu ¨lfem Tuzkaya, S. O ."***An analytic network process approach for locating undesirable facilities"*** .Journal of Environmental Management.۹۸۳–۹۷۰ , 2008.

[20] Hsu, P.-F ."***Applying the ANP Model for Selecting the Optimal Location for an International Business Office Center in China"*** .Asia Pacific Management Review-۲۷ , .۴۱ 2010.

[21] Ishfaq and Sox ."***Intermodal logistics: The interplay of financial,operational and service issues"*** .Transportation Research, 2010.

[22] Ishfaq and Sox ."***Design of intermodal logistics networks with hub delays"*** .European Journal of Operational Research, 2012.

[23] Karimi and Bashiri ."***Hub covering location problems with different coverage types"*** . Scientia Iranica, 2011.

[24] M. Mohammadi, S. T.-M ."***Sustainable hub location under mixed uncertainty"*** . Transportation Research Part E.۱۱۵–۸۹ , 2014.

[25] Mehrdad Mohammadi, R. T.-M ."***multi-objective invasive weed optimization for stochastic green hub location routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries"***, 2014.

[26] Menou, Benallou, Lahdelma, and Salminen . ***"Decision support for centralizing cargo at a Moroccan airport hub using stochastic multi criteria acceptability analysis"*** .European Journal of Operational Research, 2010.

[27] Nickel, Gelareh and ."***A benders decomposition for hub location problems arising in public transport"*** .Operations Research Proceedings, 2007.