مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند شهری با ظرفیت محدود نامتقارن و پنجره زمانی

کیوان باقری[۱]، نجمه نیسانی سامانی*[۲]، محمدرضا جلوخانی نیارکی[۲]

[۱]دانشجوی دکتری GIS و سنجش‌ازدور - دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
k.bagheri@ut.ac.ir

[۲]دانشیار دانشکده جغرافیا - دانشگاه تهران
{nneysani, mrjelokhani}@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۷، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۸)

چکیده

موضوع جمع‌آوری پسماند یک چالش بزرگ برای جوامع مدرن می‌باشد طوری که حدود ۸۰٪ از کل هزینه مدیریت پسماند را شامل می‌شود. بنابراین برنامه‌ریزی صحیح جمع‌آوری پسماند جهت به‌کارگیری اصولی منابع، می‌تواند از ایجاد هزینه‌های اضافی جلوگیری نماید و موجب بالا رفتن اثربخشی و درنهایت بهره‌وری مدیریت پسماند گردد. هدف از این تحقیق، یافتن مسیری‌های مناسب جمع‌آوری پسماند شهری با استفاده از داده‌های مکان‌مبنا طوری‌که زمان مجموع سفرهای وسایل نقلیه کمینه کردن شود. از طرفی محدودیت‌های حداکثر زمان مسافرت، حداکثر کل فاصله‌ی طی شده، حداکثر تعداد سطل زباله بررسی شده رعایت شود. در این تحقیق از تلفیق مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود. سناریوهای تحقیق بر پایه یک ناوگان ثابت غیریکنواخت با تعداد ثابتی از هر نوع ماشین با هزینه و ظرفیت‌های محدود و متفاوت می‌باشد. مسئله سازگار شده تحقیق با توجه به ویژگی‌های جمع‌آوری پسماند، مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت‌دار نا متقارن و پنجره زمانی[۲] (ACVRPTW) می‌باشد. در ادامه به منظور اجرای یک نمونه کاربردی از مسئله مورد نظر برروی مسئله جمع‌آوری پسماند در یک پایلوت از شهر تهران موردبررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج حاصل از رویکرد پیشنهادی با واقعیت مقایسه شده و نشان از کاهش ۱۴ و ۲۴ درصدی زمان مسافرت و زمان کل مسافرت می‌دهد. در واقع با استفاده از این روش می توان شبکه‌ای طراحی کرد که به کمک آن کاهش قابل توجهی در هزینه های جمع‌آوری پسماند داشته باشد به عبارت دیگر الگوریتم پیشنهادی توانسته است یک تناسب منطقی بین تعداد سطل‌های زباله مورد بررسی، حجم پسماند جمع‌آوری شده، مسافت پیموده شده و مدت زمان سرویس دهی هر وسلیه نقلیه برقرار کند . لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی در ۵ دقیقه اجرا شده است.

واژگان کلیدی: مسیریابی، پسماندهای شهری، داده‌های مکان‌مبنا، ACVRPTW

---

* نویسنده رابط

۲ Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem with Backhauls and with Time Windows

۱- مقدمه

موضوع جمع‌آوری پسماند یک چالش بزرگ برای جوامع مدرن می‌باشد [۱]. با توجه به اجتناب‌ناپذیر بودن تولید پسماند توسط انسان در هر زمان، توجه به ساماندهی آن وظیفه‌ای ملی و بااهمیت است. در این خصوص باید علاوه بر آموزش و فرهنگ‌سازی در جهت کاهش و تفکیک پسماندها و در کنار آن چگونگی جمع‌آوری حجم عظیم آن، که حدود ۸۰٪ از کل هزینه مدیریت پسماند را شامل می‌شود توجه ویژه شود. بنابراین برنامه‌ریزی صحیح جهت به‌کارگیری اصولی منابع، می‌تواند از ایجاد هزینه‌های اضافی جلوگیری نماید و موجب بالا رفتن اثربخشی و درنهایت بهره‌وری مدیریت پسماند گردد [۲].

جمع‌آوری پسماند بخشی از فرایند تخلیه از پسماند حمل برگشتی[۱] (مواد زائد جامد و اجناس قابل بازیافت) است که از مجموعه نقاط (سطل‌های زباله) جمع‌آوری و به مراکز دفع (یک کارخانه بازیافت، یک مرکز بازیابی انرژی و یا محل‌های دفن پسماند) منتقل می‌شود. در چنین مسائلی، مراکز دفع معمولاً فقط یک مقصد می‌باشد؛ که این‌یک مسئله لجستیک معکوس[۲] (RLP) می‌باشد، به‌عبارت‌دیگر از تعدادی نقاط (سطل‌های زباله) جمع‌آوری و فقط یک نقطه تحویل داده شود (در مقابل تحویل از یک نقطه به چند مقصد جز مسائل لجستیک پیشرو[۳] (FLP) می‌باشد). به‌طورمعمول، سیستم جمع‌آوری پسماند که شامل جمع‌آوری و حمل‌ونقل می باشد هزینه‌های عملیاتی بسیار بالایی را دارد. در این رابطه کارهای زیادی انجام‌شده است که برخی از محققان برای مسیریابی بر پایه کوتاه‌ترین فاصله تلاش کرده‌اند [۱۸-۳]. دیگر محققان در پیدا کردن محل مناسب برای اسکان سطل، کیسه و یا جعبه‌های جمع‌آوری پسماند تمرکز کردند [۱۲و ۲۵-۱۹] و مطالعاتی دیگر در به حداقل رساندن تعداد وسایل نقلیه جمع‌آوری موردنیاز برای سیستم برداشت تمرکز داشتند [۲۷و۲۶]. جمع‌آوری پسماند می‌تواند به‌عنوان یک مسئله مسیریابی وسایل نقلیه[۴] (VRP) در نظر گرفته شود [۲۸]. مسئله VRP عبارت است از "تعیین مسیر بهینه توسط M[۵] وسایل نقلیه که در حال ارائه خدمات به n[۶] مشتری می‌باشند" [۲۹].

در تحقیقات بالا به برخی کارهایی در زمینه جمع‌آوری پسماند انجام شده بود، اشاره شد [۲۵-۳]. ولی در ادبیات VRP، مطالعات انجام‌شده کمتر به بعد مکانی داده‌ها توجه شده است و فرضیات مسئله با دنیای واقعی و یا کاربردی فاصله ی زیادی دارد. در واقع تحقیقات کمی در این زمینه وجود دارد درصورتی‌که نشان داده‌اند استفاده از داده‌های مکان‌مبنا در مسائلی مانند مسائل مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند، برای رسیدن به نتیجه بهتر مفید می باشد [۱۷ و۳۰]. زیرا توجه به داده‌های مکانی می‌توانند جزئیات بیشتری از پارامترهای تاثیرگذار واقعی در این نوع مسائل را نشان دهد که از طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی[۷] (GIS) بدست می آیند [۳۱]. در ادامه تحقیقاتی که از VRP و GIS استفاده کرده اند به صورت مختصر بررسی می‌شود.

Shieh و همکاران رویکرد سیستماتیک را برای حل مسئله VRP و ارائه خدمات برای صنعت بنتو[۸] انجام دادند. آن‌ها از GIS برای یافتن مکان‌های مشتری استفاده کردند و درنهایت، آن‌ها از کوتاه‌ترین مسیر را با کمترین فاصله مسافرت پیدا کنند [۳۲].

کریچین[۹] در سال ۲۰۱۴ در تحقیقی GIS و VRP را به‌منظور جمع‌آوری کالا ادغام کرد و تأکید کرد که چون VRP یک بعد مکانی دارد پس لازم است که با GIS تلفیق شود. نتایج مطالعه به‌خوبی نشان می‌دهد که انگیزه استفاده از چنین سیستم حمایت از تصمیم‌گیری مکانی است که اجازه می‌دهد تا مدیریت مسئله از جمع‌آوری داده‌ها به تجسم سناریوهای شبیه‌سازی احتمالی را به شیوه‌ای واقعی‌تر نشان دهد [۳۳].

در تحقیقی که در سال ۲۰۱۵ انجام شد، نتایج آن به این صورت بود که GIS با استفاده از تحلیل شبکه کوتاه‌ترین مسیر را از طریق خطوط معابر بر اساس طول هندسی به کاربران معرفی می‌کند. علاوه بر این در GIS به کاربران این امکان داده می‌شود مدل داده‌ای ایجاد شود که

---

۱ In charge of taking-back wastes
۲ Reverse Logistics Problem
۳ Forward Logistics Problem
٤ Vehicle Routing Problem

۵ تعداد وسایل نقلیه در ابتدا در یک مرکز (انبار)
۶ تعداد مشتریان (گره)
۷ Geographic Information System
۸ Bento Industry(فروشگاه عرضه و تحویل غذا به مشتریان)
۹ Krichen

وزنی را به بخش‌های خطوط (معابر)[1] اختصاص دهد درواقع بجای کوتاه‌ترین مسیر بهینه‌ترین مسیر انتخاب شود چون ممکن است کوتاه‌ترین مسیر بهینه‌ترین مسیر نباشد و برعکس. این وزن ممکن است بر اساس پارامتر ترافیک یا دیگر پارامترها باشد. خاصیت مذکور باعث می شود بتوان از پنجره زمانی[2] هم استفاده کرد مثلاً دنبال سریع‌ترین مسیر بود [۳۴]. در همان سال از GIS برای پیدا کردن سریع‌ترین مسیر تحویل به مشتری استفاده شد در واقع مسیر بهینه مسیری بود که در کمترین زمان ممکن طی شود [۳۵].

در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۱۶ به‌منظور بهینه کردن مسیر مناسب استفاده شد. این سیستم بر اساس GIS است و اهداف شامل کاهش هزینه توزیع، افزایش بهره‌وری، رضایت مشتریان و بهبود کیفیت خدمات بود [۳۶].

در سال ۲۰۱۷ مسیریابی وسیله نقلیه با استفاده از GIS بررسی شد. در این تحقیق هدف عرضه محصولات با طول عمر کوتاه به مشتریان بود. GIS برای تعیین موقعیت (مکان) مشتریان استفاده می‌شد. سپس ماتریس هزینه مبدا- مقصد[3] (OD) برای اختصاص هر مقصد مشتری به کمترین هزینه ذخیره‌شده از آن استفاده شد. درنهایت از تحلیل‌گر شبکه برای حل مسئله مسیریابی خودرو استفاده کرد تا مسیر نهایی را برای هر وسیله نقلیه ایجاد کند[۳۷].

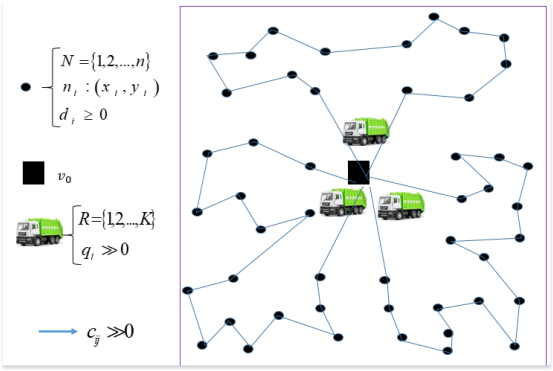
در این تحقیق هدف یافتن بهترین مسیر با توجه به زمان جمع‌آوری پسماند شهری و با استفاده از اصول VRP و GIS می‌باشد که محدودیت‌های ظرفیت وسیله نقلیه جمع‌آوری، حداکثر مسافت طی شده در هر رفت‌وبرگشت برای وسیله نقلیه، حداکثر تعداد سطل زباله‌ای که هر وسیله نقلیه می‌تواند بررسی کند، حداکثر زمان رفت‌وبرگشت وسیله نقلیه، محدودیت های معابر مانند یک/دو طرفه بودن معابر و همچنین زون هایی که به وسایل نقلیه تخصیص داده را بررسی کند. در واقع در ادبیات تحقیق مسئله ای که همه ی موارد ذکر شده را در نظر گرفته باشد به این شکل وجود ندارد.

در بخش اول همان‌طور که دیده شد به لزوم بررسی مسئله VRP و GIS به منظور جمع‌آوری پسماند پرداخته شد. در ادامه و در بخش ۲ برروی محدودیت‌ها و فرضیات مسئله پیشنهادی ACVRPTW بحث می‌شود. در بخش ۳ به بررسی روش تحقیق پیشنهادی پرداخته می‌شود، بخش ۴ پیاده‌سازی و ارزیابی ACVRPTW می‌باشد و بخش ۵ شامل بحث و نتیجه گیری می باشد.

۲- مبانی نظری و محدودیت‌ها و فرضیات مسئله پیشنهادی ACVRPTW

در این قسمت ابتدا در مورد VRP، انواع آن و پارامترهای مؤثر بر آن بحث می‌شود. در ادامه VRP را به‌صورت خاص روی مسئله جمع‌آوری پسماند شهری[4] (WCVRP) بررسی می‌شود.

مسائل مسیریابی وسایل نقلیه شامل مشتری‌ها و تقاضا آنها، وسایل نقلیه، شبکه معابر و انبار می‌باشد. هرکدام از این عناصر ممکن است ویژگی‌های متفاوتی داشته باشند که این ویژگی‌ها منجر به تشکیل انواع خاصی از مسائل VRP با پیچیدگی‌های مختلفی می‌شوند (شکل ۱). ویژگی‌های مشتری شامل تعداد، نحوه توزیع و میزان تقاضا آن می‌باشد که میزان تقاضا ممکن است ثابت یا تصادفی باشد. تعداد، ظرفیت، یکنواخت و غیریکنواخت بودن ناوگان، شبکه معابر (در گراف یال یا کمان) و تعداد انبار (نقطه شروع و پایان حرکت وسایل نقلیه) که دارای ظرفیت محدود یا نامحدود می‌باشد. پنجره‌ی زمانی، بازه زمانی است که برای بازدید و خدمات‌دهی به مشتریان (که شامل تحویل و برداشت به صورت هم‌زمان و یا به صورت غیرهم‌زمان کالا و غیره) می‌باشد.



شکل ۱- عناصر VRP و ویژگی‌های آن

محدودیت‌ها و شرایط مختلفی می‌تواند بر هر یک از این اجزای اصلی تحمیل شود که هر یک از آن‌ها منجر به

[1] line (street) segments
[2] Time Windows
[3] Origin Destination
[4] Waste Collection Vehicle Routing Problem

ایجاد نوع خاصی از مسائل مسیریابی وسایل نقلیه می‌شود. همان‌طور که انتظار می‌رود با توجه به تعداد زیاد این محدودیت‌ها و حالات، مسائل مسیریابی وسایل نقلیه انواع مختلفی داشته و بسیار گوناگون هستند. در ادامه دسته بندی ارائه شده توسط بوراک[1] و همکاران در سال (۲۰۰۹) در جدول ۱ آورده شده است [۳۸].

جدول ۱- انواع دسته‌بندی ارائه‌شده VRP توسط بوراک

شاخص	انواعVRP		
تعداد وسایل نقلیه	دقیقاً وسیله	حداکثر وسیله	نامحدود
نوع پنجره زمانی	مشتریان	جاده‌ها	انبارها
ساختار پنجره زمانی	نرم	سخت	آمیخته
مکان مشتریان	راس ها	یال‌ها	
ظرفیت وسایل	محدود	نامحدود	
نوع وسیله نقلیه	یکنواخت	غیر یکنواخت	
نوع تقاضا	جمع‌آوری	تحویل	جمع‌آوری و تحویل
تفکیک بار	با تفکیک بار	بدون تفکیک بار	
هزینه	وابسته به زمان سفر	وابسته به مسافت	وابسته به‌وسیله
تعداد تسهیلات	یک تسهیل	چند تسهیل	
نوع مدل	ایستا	پویا	
روش حل	ابتکاری	فرا ابتکاری	

در ادامه به معرفی چند تا از مهم‌ترین آن‌ها با توجه به مسئله جمع‌آوری زباله پرداخته می‌شود: اگر در VRP وسایل نقلیه دارای محدودیت ظرفیت و از پیش تعیین‌شده بوده طوری‌که و بارگیری وسیله بیش‌تر از آن حد مشخص مجاز نباشد مسئله تبدیل به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود[2] (CVRP) می‌شود. در این‌گونه مسائل، معمولاً متناظر با هر کمان یک هزینه غیرمنفی در نظر گرفته می‌شود که این هزینه نشان‌دهنده هزینه سفر از یک رأس به رأس دیگر می‌باشد. به ماتریسی که از مجموع تمامی این هزینه‌ها تشکیل می‌یابد ماتریس هزینه‌ها گفته می‌شود. حال اگر این ماتریس هزینه‌ها متقارن باشد (هزینه‌ها رفت از یک رأس به رأس دیگر با هزینه‌های برگشت آن برابر باشد) با یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار متقارن[3] (SCVRP) روبرو خواهیم بود و درصورتی‌که این ماتریس هزینه‌ها نامتقارن باشد حاصل کار یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت‌دار نامتقارن[4] (ACVRP) خواهد بود. طبیعی است که در چنین حالتی، کمان‌ها در حالت نامتقارن جهت‌دار بوده و در حالت متقارن جهت‌دار نخواهند بود[۲۸].

در مدل‌های پایه مسئله مسیریابی وسایل نقلیه محدودیتی در ارتباط با زمان‌های ملاقات مشتریان و تحویل کالا وجود ندارد. به‌عبارت‌دیگر در این مسائل امکان سرویس‌دهی به مشتریان در تمامی زمان‌ها وجود دارد. در برخی موارد زمان سرویس‌دهی برای مشتریان اهمیت پیدا می‌کند که به آن مسئله مسیریابی وسایل نقلیه همراه با پنجره زمانی[5] (VRPTW) می‌گویند. به‌عنوان‌مثال، فروشندگان روزنامه تمایل دارند تا کالای خود را هر چه سریع‌تر در ابتدای روز تحویل بگیرند. درواقع این نوع مسئله مسیریابی یکی از حالت‌های توسعه‌یافته مسئله CVRP است که در آن زمان ملاقات مشتری توسط وسایل نقلیه نیز از اهمیت خاصی برخوردار است [۳۹].

با شناخت دقیق مسئله موردنظر یعنی مسیریابی ماشین‌های جمع‌آوری مخازن پسماند، به همراه تعیین تعداد ماشین‌ها، می‌توان به جایگاه این نوع مسئله در مجموعه مسائل VRP پی برد.

مخازن پسماند می‌بایست طی یک‌زمانی خاص توسط ماشین با ظرفیت‌های متنوع، تخلیه شوند. یعنی ماشین‌ها موظف هستند در زمان مجاز به مخازن تخلیه پسماند مراجعه نمایند، درنتیجه زمان سرویس‌دهی برای ناوگان محدود می‌باشد. در واقع زمان تخلیه سطل زباله‌ها مهم بوده است پس مدل پیشنهادی نوعی VRPTW می‌باشد. همچنین ناوگان غیریکنواخت[6] می‌باشد. یعنی یک ناوگان ثابت غیریکنواخت با تعداد ثابتی از هر نوع ماشین، با هزینه و ظرفیت‌های متفاوت و محدود برای هر یک وجود دارد. درنتیجه مسئله نوعی از مسائل CVRPTW می‌باشد. هر یک از ماشین‌های

[1] Burak
[2] Capacitated Vehicle Routing Problem
[3] Symmetric Capacitated Vehicle Routing Problem
[4] Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem
[5] Waste Collection Vehicle Routing Problem With Time Windows
[6] Heterogeneous

مستقر در ناوگان موظف هستند از یک ایستگاه ابتدایی شروع به حرکت کرده و به جمع‌آوری پسماندی سطل زباله در طول مسیر حرکت بپردازند و پس از به حداکثر رسیدن ظرفیت خود به ایستگاه ابتدایی برگردند. این مسئله CVRPTW، حالت‌های خاص حذف ظرفیت ماشین از مسئله VRP مانند (VRPTW، TSP[1] و...) و حذف محدودیت زمان (CVRP) را نیز پوشش می‌دهد. از طرفی دیگر چون مسئله ما یک مسئله واقعی و داده‌ها در محیط GIS آماده می‌شوند گراف جهت‌دار می باشد پس مسئله موجود نامتقارن هم می باشد و ACVRP را پوشش می‌دهد. در واقع مسئله تبدیل به مسئله-ی ACVRPTW می‌شود.

مسئله می‌تواند به‌صورت زیر تعریف شود. فرض می‌کنیم که G(D,A) یک گراف کامل است که D={0,1,2,…,I,…,N} مجموعه سطل زباله (گره) می‌باشد و $A = \{(i, j) \mid i, j \in D, i \neq j\}$ مجموعه کمان‌ها است. گره شماره ۰، معرف ایستگاه میانی تخلیه پسماند می‌باشد.

مفروضات مسئله به این شرح می‌باشد

۱. زمان در دسترس محدود است (زمان سفر برای هر وسیله نقلیه نباید از زمان کل در دسترس تجاوز کند).

۲. تعداد سطل زباله هر پست- ناحیه- منطقه (تعداد گره در شبکه راه) موجود و ظرفیت هر یک مشخص است.

۳. میانگین زمان سرویس برای هر سطل زباله (گره یا مشتری) مشخص است.

۴. ظرفیت هر نوع ماشین جمع‌آوری پسماند مشخص و ثابت است و هزینه برای هر نوع مقداری ثابت است.

۵. مسیرهای مجاز یک طرفه، دوطرفه یا ورود ممنوع (زیرمجموعه‌ای از مسیرهای شبکه راه‌ها) موجود است.

۶. تعداد ماشین‌های جمع‌آوری پسماند در دسترس مشخص است.

۷. فواصل سطل زباله‌ها و محل تخلیه پسماند (ایستگاه) مشخص می‌باشد.

۸. هر سطل زباله فقط توسط یک ماشین سرویس‌دهی می‌شود.

۹. هر ماشین شروع و پایان مسیرش از انبار (گره شماره ۰) است.

۱۰. مجموع تقاضا برای هر ماشین نباید از ظرفیتش تجاوز کند.

۱۱. شرایط ترافیک راه‌ها و سرعت مجاز با توجه به شرایط و زمان جمع‌آوری متفاوت می‌باشد.

۱۲. هزینه هر واحد زمانی کارکرد از هر نوع ماشین مشخص است.

۱۳. میانگین زمان جهت تخلیه در ایستگاه و حداکثر نمودن ظرفیت خالی جهت سرویس مجدد، مشخص می‌باشد.

۱۴. ناوگان غیریکنواخت بوده و ۳ نوع ماشین کوچک (سبک) و بزرگ (سنگین) و متوسط (نیمه سنگین) در ناوگان مستقر هستند که هزینه برای هر نوع ثابت است.

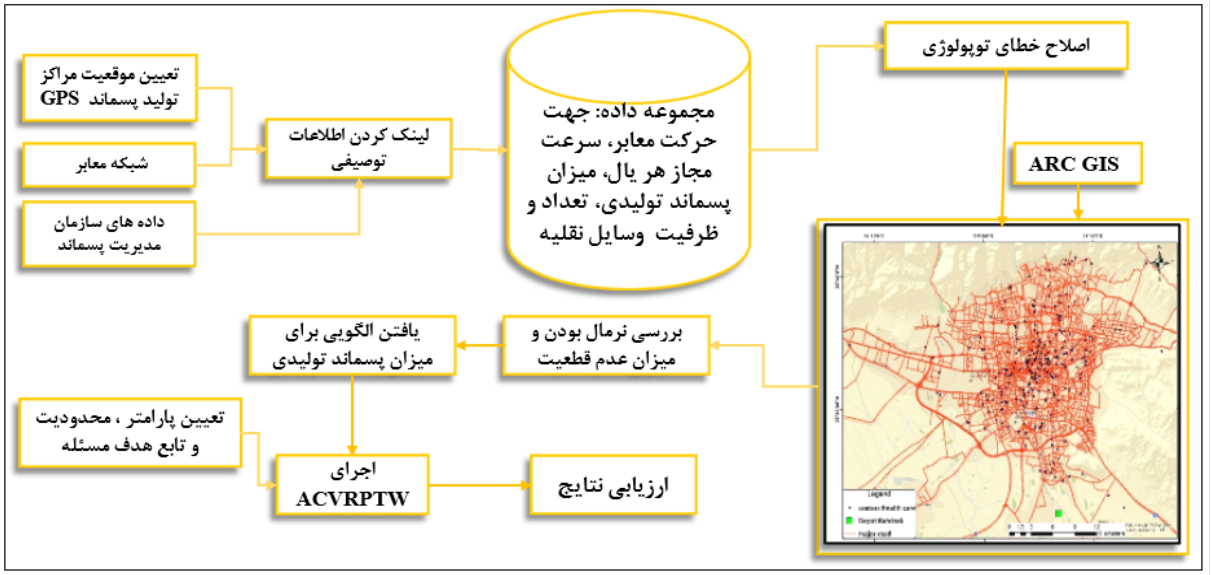
۱۵. در طول زمان در دسترس، کلیه مخازن می‌بایست تخلیه شوند.

۳- روش تحقیق پیشنهادی

روند اجرایی روش تحقیق در شکل ۲ مشخص‌شده است. ابتدا اخذ و آماده سازی داده که شامل تعیین موقعیت سطل‌های زباله و میانگین میزان زباله تولیدی روزانه آنها می باشد همچنین داده‌ها و سیاست‌های سازمان پسماند که شامل تعداد و نوع وسیله نقلیه همراه با مشخصه های ظرفیت و میزان مصرف سوخت آنها می-باشد. در ادامه داده های توصیفی به داده مکانی لینک شده که شامل محدودیت‌ها و ویژگی‌های معابر هم می-شود. در ادامه کل داده‌ها وارد یک ژئودیتابیس متمرکز می‌شود. مرحله‌ی بعدی اصلاح خطای توپولوژی می باشد. بعد از مرحله آماده سازی داده عدم قطعیت مقدار زباله تولیدی هر سطل زباله محاسبه می‌شود. با استفاده از این داده های به یک الگوی مقدار زباله تولیدی هر سطل زباله دست خواهیم یافت.

مرحله بعدی اجرای مسیریابی می‌باشد در واقع همان VRP را به‌صورت خاص با محدودیت‌ها، پارامترها و تابع هدف ACVRPTW اجرا می‌شود. در ادامه با اجرای الگوریتم پیشنهادی، مسیرهای پیشنهادی برای هر وسیله نقلیه استخراج و نمایش داده می‌شود و مرحله آخر ارزیابی نتایج می‌باشد.

[1] Travelling Salesman Problem



شکل ۲- روند اجرایی روش تحقیق

۳-۱- ایجاد مجموعه داده[۱] شبکه و تخمین زمان سفر

مجموعه داده‌های شبکه‌ای، مجموعه‌ای از عناصر شبکه‌ای به‌هم‌پیوسته لبه‌ها[۲]، اتصالات[۳] و پیچ‌ها[۴] است که یک گراف جهت‌دار[۵] (یک طرفه یا دو طرفه بودن معابر) را مدل‌سازی می‌کند. شایع‌ترین کاربرد آن، مدل‌سازی شبکه‌های جاده‌ای است. نرم‌افزار ArcGIS بحث‌های مربوط به ایجاد مجموعه داده شبکه و توپولوژی آنها را پشتیبانی می‌کند.

تخمین زمان سفر در لبه‌ها، یک اندازه‌گیری مؤثر از وضعیت ترافیک خیابان‌ها است که یک امری ضروری در مسافرت و سازمان‌های حمل‌ونقل، به‌ویژه در شرایط اضطراری می‌باشد [۴]. در این تحقیق برای محاسبه زمان سفر در لبه‌ها از رابطه (۱) معرفی‌شده توسط [۴]. استفاده شد.

$$T_k = \frac{L_k}{V_e}\left[1+1.96\left(\frac{V_k^{\,2} L_k - \Delta t_k \beta \mu N_k^{\,2} v_k}{V_k L_k C_k}\right)^{1.59}\right] \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) T_k زمان سفر در بخش k، L_k طول بخش k، V_k حجم فعلی بخش k، N_k تعداد باند در بخش k، v_k[۷] متوسط سرعت سفر برای یک وسیله نقلیه نرمال در بخش k، C_k ظرفیت بخش k، V_e سرعت وسیله نقلیه موردنظر، β ضریب نفوذ باند خالی، μ نسبت سرعت باند خالی به میانگین زمان پیشرفت، Δt_k زمان ترخیص از بخش k. برای پارامترهای ذکرشده در رابطه (۱) یک فیلد ساخته شد و برای هر لبه (بخش)، مقدار هر پارامتر و درنهایت زمان سفر هر لبه محاسبه شد.

۴- داده و پیاده‌سازی ACVRPTW

منطقه موردمطالعه شامل بخشی از مناطق ۳ و ۶ تهران می‌باشد که در حوزه ایستگاه میانی (انبار) جمع آوری پسماند بیهقی می‌باشد (شکل ۳). ابتدا با GPS موقعیت سطل‌های زباله ثبت شده و بر روی شبکه معابر قرار داده شدند. شبکه معابر با تمام زیرشاخه‌های آن در محیط GIS با ابزار توپولوژی اصلاح شد و در ادامه داده-های ترافیکی ازجمله سرعت مجاز هر لاین، پهنای معابر، یک‌طرفه، دوطرفه و یا ممنوع ورود بودن معابر، میانگین حجم ترافیک (میانگین ترافیک ۲ ساعته) روی یال‌های شبکه معابر اعمال شد. به منظور تخمین مقدار پسماند موجود در هر سطل زباله یک بررسی ۶۰ روزه صورت گرفت که در آن به صورت روزانه (به صورت حضوری و دقیقا قبل از تخلیه سطل زباله در وسیله نقلیه اندازه گیری می شد همچنین نحوه اندازه گیری مقدار زباله به این صورت بود که چه حجمی از فضا داخل سطل زباله را

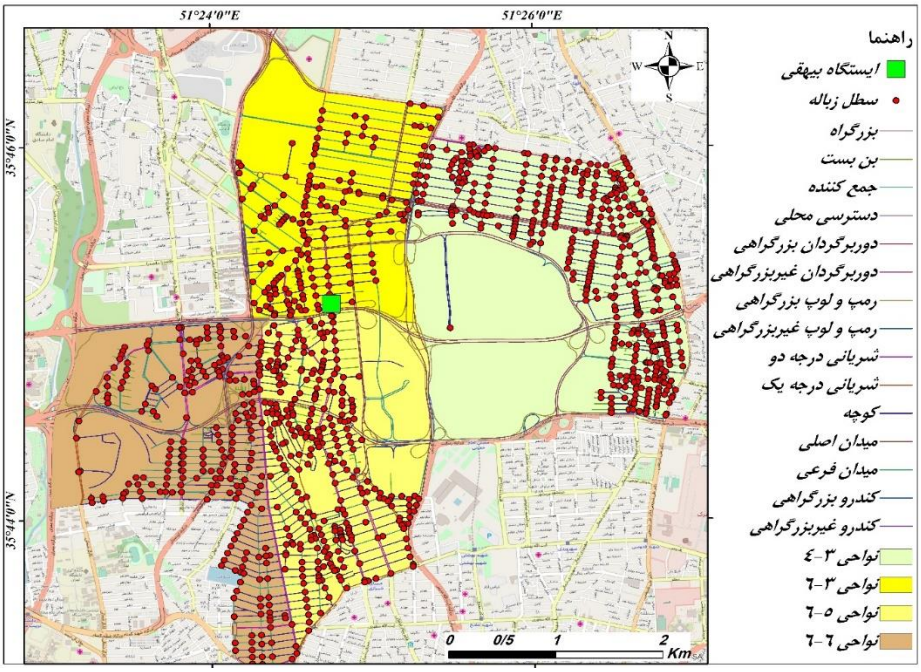
---

۱ Dataset
۲ Edge
۳ Junction
۴ Turn
۵ Directed

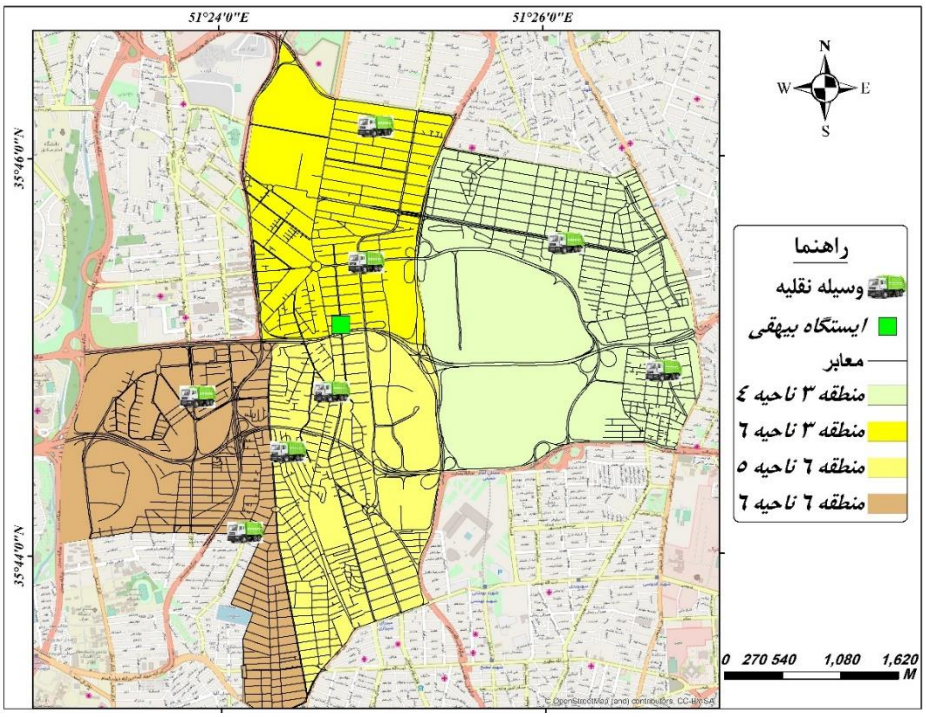
اشغال کرده است) مقدار زباله هر سطل یاداشت می‌شد. با استفاده از شاخص‌های آماری، میانگین پسماند روزانه هر سطل زباله با ضریب اطمینان ۹۵ درصد حساب شد.

ماشین‌های جمع‌آوری پسماند از یک محل خارج و به همان محل برای تخلیه بار برمی‌گردند که این محل ایستگاه میانی جمع‌آوری پسماند بیهقی نام دارد (شکل ۴).

در جدول (۲) مشخصات پارامترهای ذکرشده در برای مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند با توجه به محدوده موردمطالعه را مشخص شده است. این اطلاعات از سازمان مدیریت پسماند شهر تهران اخذ شده است. لازم به ذکر است برای خوشه‌بندی و تخصیص سطل‌های زباله به وسایل نقلیه از تقسیمات سازمان مدیریت پسماند استفاده‌شده است طوری که دو وسیله نقلیه مسئول جمع-آوری زباله هر ناحیه می‌باشند (شکل ۴).



شکل ۳- نقشه منطقه موردمطالعه: ناحیه ۴ و ۶ منطقه ۳ و ناحیه ۵ و ۶ منطقه ۶

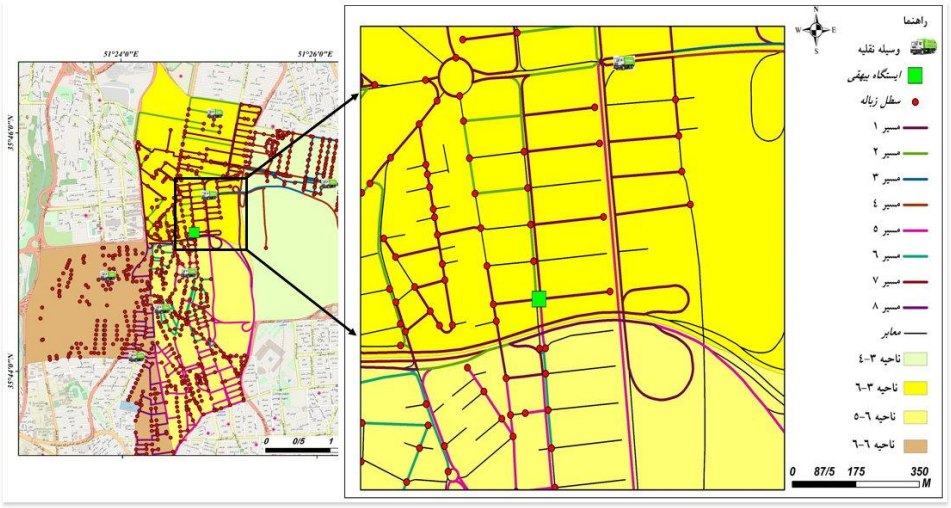


شکل ۴- تخصیص فضا برای وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند

جدول ۲- مشخصات پارامترهای استفاده‌شده در ACVRPTW

پارامتر	توضیحات	محدودیت‌ها
انبار	ایستگاه میانی بیهقی	نقطه شروع و پایان هر ماشین
تعداد ماشین	ماشین شماره ۱ تا ۸	ظرفیت ماشین متغیر از ۱۲ تا ۱۸ مترمکعب
ساعات شروع کار ماشین	دو نوبت روز و شب	ساعات ۹ تا ۲۱ و ۲۱ تا ۶ صبح
زمان رفت‌وبرگشت		۳ تا ۴ ساعت با توجه به شرایط ماشین، زمانی، جوی و ...
زمان تخلیه سطل زباله	زمانی که برای تخلیه هر سطل زباله صرف می‌شود	از صفر تا ۵ دقیقه با توجه به حجم پسماند موجود در سطل زباله
ماکزیمم کل فاصله	حداکثر فاصله‌ای که هر ماشین می‌تواند طی کند	۷۰ کیلومتر
حداکثر تعداد سطل زباله	بیشترین تعداد سطل زباله‌ای که هر ماشین می‌تواند بررسی کند	از ۱۰۰ تا ۱۵۰ سطل متغیر می‌باشد
تخصیص فضا	با توجه به برنامه سازمان مدیریت پسماند	در هر ناحیه موجود ۲ ماشین مسئول جمع‌آوری پسماند می‌باشند
زمان صرف پیمودن فاصله دو سطل زباله	پارامترهای مؤثر طول یال، میزان ترافیک و پهنای باند راه	با یک رابطه خطی جبری میزان زمان هر سگمنت راه محاسبه شد

مرحله بعدی تعیین مقدار پارامترهای تعداد ماشین، ساعات شروع کار ماشین، زمان رفت‌وبرگشت، زمان تخلیه سطل زباله، ماکزیمم کل فاصله، حداکثر تعداد سطل زباله که توسط یک وسیله نقلیه سرویس‌دهی می‌شوند، تخصیص فضا و زمان صرف پیمودن فاصله دو سطل زباله از مسئله می باشد که در جدول (۲) برای هر وسیله نقلیه نشان داده شده است. مرحله بعدی اجرای ACVRPTW به طور همزمان برای کل وسایل نقلیه می‌باشد. هر مسیر برای یک وسیله نقلیه و بلعکس هر وسیله نقلیه هم شامل یک مسیر می‌شود. ACVRPTW با استفاده از الگوریتم داجیسترا اجرا شده است که نتایج آن به‌صورت شکل ۵ می‌باشد.



شکل ۵- نقشه مسیرهای حاصل از ACVRPTW

جدول ۳- میزان براورد شده پارامترهای ACVRPTW بعد از اجرا

نام مسیر	ایستگاه مبدا	ایستگاه مقصد	تعداد سطل زباله های بررسی شده	حجم پسماند جمع‌آوری شده (مترمکعب)	زمان مسافرت طی شده (دقیقه)	کل فاصله طی شده (کیلومتر)
مسیر ۱	بیهقی	بیهقی	۱۰۳	۱۴	۲۳۱	۳۴
مسیر۲	بیهقی	بیهقی	۸۸	۱۲	۱۸۵	۲۳
مسیر۳	بیهقی	بیهقی	۱۰۷	۱۴	۲۳۸	۲۱
مسیر۴	بیهقی	بیهقی	۷۵	۱۲	۲۴۰	۲۰
مسیر۵	بیهقی	بیهقی	۱۲۲	۱۵	۲۱۹	۳۳
مسیر۶	بیهقی	بیهقی	۹۳	۱۴	۲۳۹	۳۰
مسیر۷	بیهقی	بیهقی	۹۸	۱۴	۲۳۹	۳۱
مسیر۸	بیهقی	بیهقی	۸۲	۱۳	۲۳۶	۲۱

برای مطمئن بودن از نتیجه ACVRPTW، چندین مرتبه اجرا شد و مقایسه نتایج هر تکرار حاکی از آن است که مدل جواب تقریبا یکسانی می‌دهد.

از طرفی برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی، مدل چندین مرتبه با تغییر دادن مقدار و رنج پارامترها جواب‌ها هم متناسب با این تغییرات، متفاوت می‌شد. در جدول (۳) میزان براورد شده پارامترهای الگوریتم پیشنهادی بعد از اجرا برای مسیرهای انتخابی مشخص شده است. همان طور که مشخص است مقدار پارامترهای هر مسیر بین مقدارهای تعیین شده در قسمت محدودیت‌های تحقیق (جدول ۳) می‌باشد. هر ماشین در مسیر مشخص شده تقریبا برابر کل ظرفیتش پسماند جمع-آوری کرده و حداقل تعداد سطل زباله، حداکثر فاصله و حداکثر زمان تعیین شده هم رعایت شده است.

۴-۱- ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی نتایج کار، نتیجه بدست آمده از ACVRPTW با زمان مسافرت و فاصله پیموده شده توسط هر ماشین با مقدار واقعی، مقایسه شده است. نتایج این مقایسه حاکی از آن است که ACVRPTW قادر به بهبود مورد زمان مسافرت، مسافت طی شده به میزان ۱۴٪ و ۲۴٪ به ترتیب بوده است (جداول ۴ و ۵).

جدول ۴- تفاوت بین میزان مسافت طی شده در مدل پیشنهادی و واقعیت (کیلومتر)

مسیر	براورد شده	واقعی	تفاوت (٪)
مسیر ۱	۳۴	۴۰	۱۵
مسیر ۲	۲۳	۲۶	۱۱/۵۴
مسیر ۳	۲۱	۳۸	۴۴/۷۴
مسیر ۴	۲۰	۳۵	۴۲/۸۶
مسیر ۵	۳۳	۳۷	۱۰/۸۱
مسیر ۶	۳۰	۳۹	۲۳/۰۸
مسیر ۷	۳۱	۴۱	۲۴/۳۹
مسیر ۸	۲۱	۲۶	۱۹/۲۳
مجموع	۲۱۳	۲۸۲	۲۴/۴۷

جدول ۵- تفاوت بین میزان زمان طی شده در مدل پیشنهادی و واقعیت (دقیقه)

مسیر	براورد شده	واقعی	تفاوت (٪)
مسیر ۱	۲۳۱	۲۵۴	۹/۰۶
مسیر ۲	۱۸۵	۱۹۱	۳/۱۴
مسیر ۳	۲۳۸	۳۰۱	۲۰/۹۳
مسیر ۴	۲۴۰	۲۸۵	۱۵/۷۹
مسیر ۵	۲۱۹	۲۶۱	۱۶/۰۹
مسیر ۶	۲۳۹	۲۸۳	۱۵/۵۵
مسیر ۷	۲۳۹	۲۸۰	۱۴/۶۴
مسیر ۸	۲۳۶	۲۷۱	۱۲/۹۲
مجموع	۱۸۲۷	۲۱۲۶	۱۴/۰۶

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

برنامه‌ریزی صحیح جمع‌آوری پسماند شهری جهت به‌کارگیری اصولی منابع، می‌تواند از ایجاد هزینه‌های اضافی جلوگیری نماید و موجب بالا رفتن اثربخشی و درنهایت بهره‌وری مدیریت پسماند گردد. هدف از این تحقیق، مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند خشک شهری با استفاده از داده‌های مکان‌مبنا و GIS بود. در این پژوهش یک ناوگان ثابت غیریکنواخت با تعداد ثابتی از هر نوع ماشین با هزینه و ظرفیت‌های متفاوت در اختیار قرار داشت. مدلی که جهت حل مسئله پیشنهاد شد باید مسیرهایی با حداقل تعداد وسیله نقلیه موردنظر، حداقل ظرفیت ماشین و حداقل زمان به‌کارگیری آن‌ها، برای سرویس‌دهی به‌کل سطل زباله‌ها ایجاد نماید. از ACVRPTW برای حل مسئله تحقیق استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی در مدت زمان اجرای ۵ دقیقه توانسته است به صورت تواما با در نظر گرفتن کل محدودیت‌های تعیین شده، مسیرهای بهینه ازلحاظ زمانی برای هر ماشین متناسب با ویژگی‌های آن و کل ناوگان تعیین کند. به عبارت دیگر الگوریتم پیشنهادی توانسته است.

یک تناسب منطقی بین تعداد سطل‌های زباله مورد بررسی توسط هر ماشین، حجم پسماند جمع‌آوری شده توسط هر ماشین، مسافت پیموده شده توسط هر ماشین و مدت زمان سرویس دهی توسط هر ماشین برای کل ناوگان

برقرار کند. اما، الگوریتم برای یک پایلوت کوچک (چندتا از نواحی منطقه ۳ و۶ شهر تهران) اجرا شده است. برای مسئله با ابعاد بزرگ‌تر نیاز به یک الگوریتم سریعتر احساس می‌شود؛ زیرا زمان حل مسئله خیلی مهم است و اگر مثلاً بخواهیم تحت وب یا تحت موبایل اجرا شود زمان زیادی را از کاربر می‌گیرد. مسیریابی با در نظر گرفتن بیش از یک تسهیل و همچنین مکان‌یابی تسهیلات (ایستگاه‌های سرویس) در کنار سایر روش‌های فرا ابتکاری از قبیل جستجوی ممنوع (TS)، الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ممتیک (MA)، الگوریتم بهینه‌سازی مورچگان (ACO) و ... برای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردند و همچنین بهتر است با در نظر گرفتن ملاحظاتی دیگر مدل پیشنهادی شامل انواع دیگری از مسائل VRP مانند MDVRP، MDVRP، MFVRP، VRPSST، FVRP و LRP باشد.

مراجع

[1] Blumenthal, K., Issn, L.B., Union, E., & States, E.U.M. (2013). “Waste indicators on generation and landfilling measuring sustainable development 2004-2010”; (June 2012):1–12.

[2] Ghazizadeh Hashemi, M. (2011). “Vehicles Routing Problem and determining the number of waste collection machines using an over-innovative method. Management of Waste”. Spring 2012 - No. 12 (8 pages - 53 to 60)

[3] Chang, N-B., & Wei, YL. (2000). “Siting recycling drop-off stations in urban area by genetic algorithm-based fuzzy multi objective nonlinear integer programming modeling”. Fuzzy Sets and Systems. Aug; 114(1):133–49.

[4] Sniezek, J., Bodin, L., Levy, L., & Ball, M. (2001). “Capacitated Arc Routing Problems with Vehicle-Site Dependencies: The Philadelphia Experience”. In: Toth P, Vigo D, editors. The Vehicle Routing Problem: Discrete mathematics and its applications. Philadelphia; p. 247–54.

[5] Angelelli, E., & Speranza, M.G. (2002). “The application of a vehicle routing model to a waste-collection problem: two case studies”. In: Klose A, Speranza MG, Van Wassenhove.

[6] Viotti, P., Polettini, A., Pomi, R., & Innocenti, C. (2003). “Genetic algorithms as a promising tool for optimization of the MSW collection routes”. Waste Management & Research. Aug 1; 21(4):292–8.

[7] Bautista, J., & Pereira, J. (2004). “Ant algorithms for urban waste collection routing”. Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings; 3172:302–9.

[8] Bianchessi, N., & Righini, G. (2007). “Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery”. Computers & Operations Research. Feb; 34(2):578–94.

[9] Ghiani, G., Guerriero, F., Improta, G., & Musmanno, R. (2005). “Waste collection in Southern Italy: solution of a real-life arc routing problem”. International Transactions in Operational Research. Mar; 12(2):135–44.

[10] Ghose, M.K., Dikshita, K., & Sharma, S.K. (2006). “A GIS based transportation model for solid waste disposal-a case study on Asansol municipality”. Waste management (New York, NY). Jan; 26(11):1287–93.

[11] Alagöz, A.Z., & Kocasoy, G, (2008). “Improvement and modification of the routing system for the health-care waste collection and transportation in Istanbul”. Waste management (New York, NY). Jan;28 (8):1461–71.

[12] Karadimas, N.V., Kolokathi, M., Defteraiou, G., & Loumos, V. (2007). “Ant Colony System vs ArcGIS Network Analyst: The Case of Municipal Solid Waste Collection”. 5th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development; 128–34.

[13] Apaydin, O., & Gonullu, M.T. (2007). “Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study”. Global NEST; 9 (1):6–11.

[14] Bautista, J., Fernández, E., & Pereira, J. (2008). “Solving an urban waste collection problem using ants heuristics”. Computers & Operations Research. Sep; 35 (9):3020–33.

[15] Ombuki-berman, B.M., Runka, A., & Hanshar, F. (2007). “Waste collection vehicle routing problem with time windows using multi-objective genetic algorithms windows using multi-objective genetic algorithms”. International Association of Science and Technology for Development Proceedings of the Third IASTED” International Conference on Comutational Intelligence. 91–7.

[16] Ustundag, A., & Cevikcan, E. (2008). “Vehicle route optimization for RFID integrated waste collection system”. International Journal of Information Technology & Decision Making. World Scientific Publishing Company; Dec 20; 07(04):611–25.

[17] Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Current, JR. (2008). “Implementing a multi-vehicle multi-route spatial decision support system for efficient trash collection in Portugal”. Transportation Research Part A: Policy and Practice. Jul; 42(6):922–34.

[18] Karadimas, N., Kolokathi, M., Defteraiou, G., Loumos, V., Kim, H., Yang, J., & Lee, K-D. (2009). "Vehicle routing in reverse logistics for recycling end-of-life consumer electronic goods in South Korea". Transportation Research Part D: Transport and Environment. Jul; 14(5):291–9.

[19] Maniezzo, V. (2004). "Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support". UBLCS Technical Report University of Bologna. Bologna; p. 29.

[20] Archetti, C., & Speranza, M.G. (2005). "Collection of waste with single load trucks: A real case". In: Fleischmann B, Klose A, editors. Distribution Logistics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; p. 105–19.

[21] Sniezek, J,. & Bodin, L. (2006). "Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles". Annals of Operations Research. May 24; 144(1):33–58.

[22] Muttiah, R.S., Engel, B.A., & Jones, D.D. (1996). "Waste disposal site selection using GIS-based simulated annealing". Computers & Geosciences. Nov; 22(9):1013–7.

[23] Cheng, S., Chan, C.W., & Huang, G.H. (2003). "An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management". Engineering Applications of Artificial Intelligence. Aug; 16(5-6):543–54.

[24] McLeod, F., & Cherrett, T. (2008). "Quantifying the transport impacts of domestic waste collection strategies". Waste management (New York, NY). Nov; 28(11):2271–8.

[25] Sumathi, V.R., Natesan, U., & Sarkar, C. (2008). "GIS-based approach for optimized siting of municipal solid waste landfill". Waste management (New York, NY). Nov; 28(11):2146–60.

[26] Aringhieri, R., Bruglieri, M., Malucelli, F., & Nonato, M.A. (2004). "Particular Vehicle Routing Problem arising in th collection and disposal of special waste Presented at Tristan". Guadeloupe, French West Indies.

[27] Arribas, C.A., Blazquez, C.A., & Lamas, A. (2010). "Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems". Waste management &research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA. Apr; 28 (4):355–63.

[28] Han, H., & Ponce Cueto, E. (2015). "Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review". PROMET-Traffic &Transportation, 27(4), 345-358.

[29] Caric, T., & Gold, H. (2008). "The Vehicle Routing Problem". Toth P, Vigo D, editors. Society for Industrial and Applied Mathematics.

[30] Santos, L., Coutinho-Rodrigues, J., & Antunes, C. H. (2011). A web spatial decision support system for vehicle routing using Google Maps. Decision Support Systems, 51(1), 1-9.

[31] Galindo, C., Gonzalez, J., & Fernádez-Madrigal, J. A. (2010). Interactive in-vehicle guidance through a multi hierarchical representation of urban maps. International Journal of Intelligent Systems, 25(7), 597-620.

[32] Chen, R. C., Shieh, C. H., Chan, K. T., Chiu, S. Y., Fan, J. Y., Chang, Y. T., & Ma, N. J. (2013). A Systematic Approach to Order Fulfillment of On-demand Delivery Service for Bento Industry. Procedia Computer Science, 17, 96-103.

[33] Krichen, S., Faiz, S., Tlili, T., & Tej, K. (2014). Tabu-based GIS for solving the vehicle routing problem. Expert Systems with Applications, 41(14), 6483-6493.

[34] Kim, G., Ong, Y. S., Heng, C. K., Tan, P. S., & Zhang, N. A. (2015). City vehicle routing problem (City VRP): A review. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 16(4), 1654-1666.

[35] Abousaeidi, M., Fauzi, R., & Muhamad, R. (2016). Geographic Information System (GIS) modeling approach to determine the fastest delivery routes. Saudi journal of biological sciences, 23(5), 555-564.

[36] Gu, W., Foster, K., & Shang, J. (2016). Enhancing market service and enterprise operations through a large-scale GIS-based distribution system. Expert Systems with Applications, 55, 157-171.

[37] Sharaf, N. I., Shabana, B. T., & El-Bakry, H. M. (2017). GIS Utilization for Delivering a Time Condition Products. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS, 8(3), 84-90.

[38] Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. Computers & Industrial Engineering, 57(4), 1472-1483.

[39] Shokri Khoshroudi, N., Mirabi, M. & Sadeghieh, A. (1392). Solving the problem of multi-warehouse vehicles with a time window using an efficient parenting algorithm. Thesis for Master of Industrial Engineering.

[40] Wang, J., Yun, M., Ma, W., & Yang, X. (2013). "Travel time estimation model for emergency vehicles under preemption control". Procedia-Social and Behavioral Sciences, 96, 2147-2158.