

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

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

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

^۲دانشیار 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 طوری که زمان مجموع سفرهای وسایل نقلیه کمینه کردن شود. از طرفی محدودیت‌های حداکثر زمان مسافرت، حداکثر کل فاصله 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 نامتقارن و پنجره زمانی^۲ (ACVRPTW) می‌باشد. در ادامه به منظور اجرای یک نمونه کاربردی از مسئله مورد نظر بررسی مسئله جمع‌آوری پسماند در یک پایلوت از شهر تهران مورد بررسی 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 می‌توان شبکه‌ای طراحی کرد که به کمک آن کاهش قابل توجهی در هزینه‌های 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 وسیله 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 حمل‌برگشتی^۱ (مواد زائد جامد و اجناس قابل بازیافت) است که از مجموعه نقاط (سطح‌های 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 این یک مسئله لجستیک معکوس^۲ (RLP) می‌باشد، به‌عبارت‌دیگر از تعدادی نقاط (سطح‌های 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 می‌باشد 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 [۳-۱۸]. دیگر محققان در پیدا کردن محل مناسب برای اسکان سطل، کیسه و یا جعبه‌های جمع‌آوری پسماند تمرکز کردند [۱۲ و ۱۹-۲۵] و مطالعاتی دیگر در به حداقل رساندن تعداد وسایل نقلیه جمع‌آوری موردنیاز برای سیستم برداشت تمرکز داشتند [۲۶ و ۲۷]. 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 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 فاصله‌ی زیادی دارد. در واقع تحقیقات کمی در این زمینه وجود دارد در صورتی‌که نشان داده‌اند استفاده از داده‌های مکان‌مبنا در مسائلی مانند مسائل مسیریابی وسایل نقلیه جمع‌آوری پسماند، برای رسیدن به نتیجه بهتر مفید می‌باشد [۱۷ و ۳۰]. زیرا توجه به داده‌های مکانی می‌تواند جزئیات بیشتری از پارامترهای تاثیرگذار واقعی در این نوع مسائل را نشان دهد که از طریق سیستم اطلاعات جغرافیایی^۶ (GIS) بدست می‌آیند [۳۱]. در ادامه تحقیقاتی که از VRP و GIS استفاده کرده‌اند 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 مسافت پیدا کنند [۳۲].

کرپچین^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

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

۱ In charge of taking-back wastes

۲ Reverse Logistics Problem

۳ Forward Logistics Problem

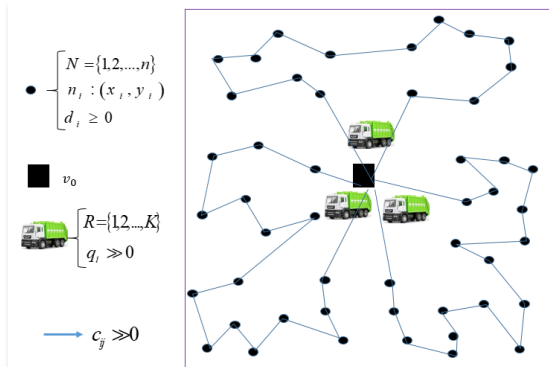
۴ Vehicle Routing Problem

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 می‌باشد.

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 به صورت خاص روی مسئله جمع‌آوری پسماند شهری^۴ (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. پنجره 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

وزنی را به بخش‌های خطوط (معابر)^۱ 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 می‌شود بتوان از پنجره زمانی^۲ 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 به منظور 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^۳ (OD) برای اختصاص هر مقصد مشتری به کمترین هزینه ذخیره‌شده از آن استفاده شد. در نهایت 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 رفت و برگشت برای وسیله نقلیه، حداکثر تعداد سطل زباله‌ای که هر وسیله نقلیه می‌تواند بررسی کند، حداکثر زمان رفت و برگشت وسیله نقلیه، محدودیت‌های معابر مانند یک/دو طرفه بودن معابر و همچنین زون‌هایی که به وسایل نقلیه تخصیص داده را بررسی کند. در واقع در ادبیات تحقیق مسئله‌ای که همه‌ی 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 بر روی محدودیت‌ها و فرضیات

^۱ line (street) segments

^۲ Time Windows

^۳ Origin Destination

^۴ Waste Collection Vehicle Routing Problem

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^۳ (SCVRP) روبرو خواهیم بود و در صورتی که این ماتریس هزینه‌ها نامتقارن باشد حاصل کار یک مسئله مسیریابی وسیله نقلیه ظرفیت دار نامتقارن^۴ (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. به عبارت دیگر 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^۵ (VRPTW) می‌گویند. به عنوان مثال، فروشندگان روزنامه تمایل دارند تا کالای خود را هر چه سریع‌تر در ابتدای روز تحویل بگیرند. در واقع 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، در نتیجه زمان سرویس‌دهی برای ناوگان محدود می‌باشد. در واقع زمان تخلیه سطل زباله‌ها مهم بوده است پس مدل پیشنهادی نوعی VRPTW می‌باشد. همچنین ناوگان غیریکنواخت^۶ 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. در نتیجه مسئله نوعی از مسائل CVRPTW می‌باشد. هر یک از ماشین‌های

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^۱ و همکاران در سال (۲۰۰۹) در جدول ۱ آورده شده است [۳۸].

جدول ۱- انواع دسته‌بندی ارائه‌شده VRP توسط بوراک

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

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 تعیین شده بوده طوری که و بارگیری وسیله بیش‌تر از آن حد مشخص مجاز نباشد مسئله تبدیل به مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با ظرفیت محدود^۲ (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

^۳ Symmetric Capacitated Vehicle Routing Problem

^۴ Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem

^۵ Waste Collection Vehicle Routing Problem With Time Windows

^۶ Heterogeneous

^۱ Burak

^۲ Capacitated Vehicle Routing Problem

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 مشخص شده است. ابتدا اخذ و آماده سازی داده که شامل تعیین موقعیت سطل‌های زباله و میانگین میزان زباله تولیدی روزانه آنها می‌باشد همچنین داده‌ها و سیاست‌های سازمان پسماند که شامل تعداد و نوع وسیله نقلیه همراه با مشخصه های ظرفیت و میزان مصرف سوخت آنها می‌باشد. در ادامه داده های توصیفی به داده مکانی لینک شده که شامل محدودیت‌ها و ویژگی‌های معابر هم می‌شود. در ادامه کل داده‌ها وارد یک ژئودیتابیس متمرکز می‌شود. مرحله‌ی بعدی اصلاح خطای توپولوژی می‌باشد. 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 به صورت 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.

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 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 می‌باشد پس مسئله موجود نامتقارن هم می‌باشد و ACVRP را پوشش می‌دهد. در واقع مسئله تبدیل به مسئله-ACVRPTW می‌شود.

مسئله می‌تواند به صورت زیر تعریف شود. فرض می‌کنیم که $G(D,A)$ یک گراف کامل است که $D = \{0,1,2,\dots,I,\dots,N\}$ مجموعه سطل زباله (گره) می‌باشد و $A = \{(i,j) | i,j \in D, i \neq j\}$ 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 مسیری از انبار (گره شماره ۰) است.

۱ Travelling Salesman Problem



شکل ۲- روند اجرایی روش تحقیق

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

مجموعه داده‌های شبکه‌ای، مجموعه‌ای از عناصر شبکه‌ای به هم پیوسته 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) معرفی شده توسط [۴] استفاده شد.

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

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_e

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.

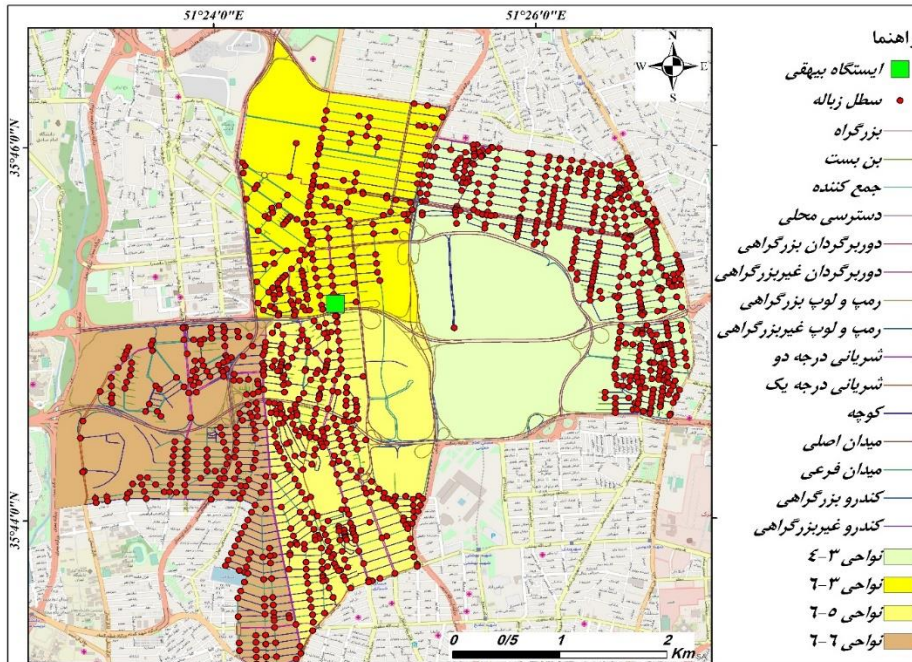
۴- داده و پیاده‌سازی ACVRPTW

منطقه مورد مطالعه شامل بخشی از مناطق ۳ و ۶ تهران می‌باشد که در حوزه ایستگاه میانی (انبار) جمع‌آوری 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 داده‌های ترافیکی از جمله 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 دقیقاً قبل از تخلیه سطل زباله در وسیله نقلیه اندازه‌گیری می‌شد همچنین نحوه اندازه‌گیری مقدار زباله به این صورت بود که چه حجمی از فضا داخل سطل زباله را

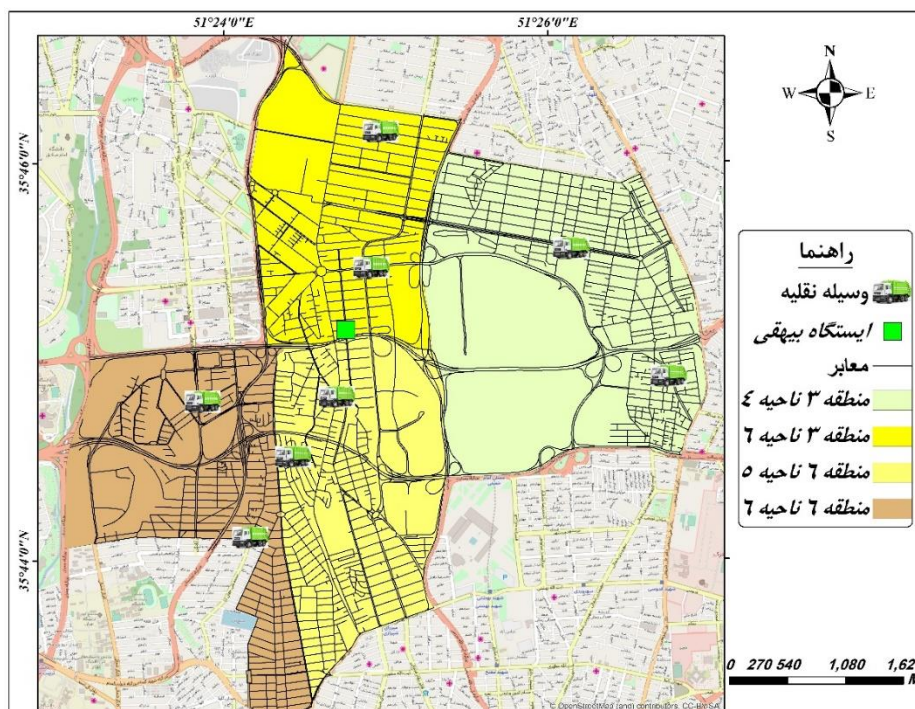
۱ Dataset
۲ Edge
۳ Junction
۴ Turn
۵ Directed

محدوده مورد مطالعه را مشخص شده است. این اطلاعات از سازمان مدیریت پسماند شهر تهران اخذ شده است. لازم به ذکر است برای خوشه بندی و تخصیص سطل های زباله به وسایل نقلیه از تقسیمات سازمان مدیریت پسماند استفاده شده است طوری که دو وسیله نقلیه مسئول جمع-آوری زباله هر ناحیه می باشند (شکل ۴).

اشغال کرده است) مقدار زباله هر سطل یادداشت می شد. استفاده از شاخص های آماری، میانگین پسماند روزانه هر سطل زباله با ضریب اطمینان ۹۵ درصد حساب شد. ماشین های جمع آوری پسماند از یک محل خارج و به همان محل برای تخلیه بار برمی گردند که این محل ایستگاه میانی جمع آوری پسماند بیهقی نام دارد (شکل ۴). در جدول (۲) مشخصات پارامترهای ذکر شده در برای مسیریابی وسایل نقلیه جمع آوری پسماند با توجه به



شکل ۳- نقشه منطقه مورد مطالعه: ناحیه ۴ و ۶ منطقه ۳ و ناحیه ۵ و ۶ منطقه ۶



شکل ۴- تخصیص فضا برای وسایل نقلیه جمع آوری پسماند

جدول ۲- مشخصات پارامترهای استفاده شده 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 رفت و برگشت		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

شده است. مرحله بعدی تعیین مقدار پارامترهای تعداد ماشین، ساعات شروع کار ماشین، زمان رفت و برگشت، 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 می‌باشد 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 بالعکس هر وسیله نقلیه هم شامل یک مسیر می‌شود. ACVRPTW با استفاده از الگوریتم داجیسترا اجرا شده است که نتایج آن به صورت شکل ۵ می‌باشد.



شکل ۵- نقشه مسیرهای حاصل از ACVRPTW

جدول ۳- میزان برآورد شده پارامترهای ACVRPTW بعد از اجرا

نام مسیر	ایستگاه مبدا	ایستگاه مقصد	تعداد سطل زباله‌های 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
مسیر ۲	بیهقی	بیهقی	۸۸	۱۲	۱۸۵	۲۳
مسیر ۳	بیهقی	بیهقی	۱۰۷	۱۴	۲۳۸	۲۱
مسیر ۴	بیهقی	بیهقی	۷۵	۱۲	۲۴۰	۲۰
مسیر ۵	بیهقی	بیهقی	۱۲۲	۱۵	۲۱۹	۳۳
مسیر ۶	بیهقی	بیهقی	۹۳	۱۴	۲۳۹	۳۰
مسیر ۷	بیهقی	بیهقی	۹۸	۱۴	۲۳۹	۳۱
مسیر ۸	بیهقی	بیهقی	۸۲	۱۳	۲۳۶	۲۱

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

مسیر	برآورد 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- نتیجه گیری و پیشنهادات

برنامه ریزی صحیح جمع آوری پسماند شهری جهت به کارگیری اصولی منابع، می تواند از ایجاد هزینه های اضافی جلوگیری نماید و موجب بالا رفتن اثربخشی و در نهایت بهره وری مدیریت پسماند گردد. هدف از این تحقیق، مسیریابی وسایل نقلیه جمع آوری پسماند خشک شهری با استفاده از داده های مکان مبنا و GIS بود. در این پژوهش یک ناوگان ثابت غیریکنواخت با تعداد ثابتی از هر نوع ماشین با هزینه و ظرفیت های متفاوت در اختیار قرار داشت. مدلی که جهت حل مسئله پیشنهاد شد باید مسیریابی با حداقل تعداد وسیله نقلیه مورد نظر، حداقل ظرفیت ماشین و حداقل زمان به کارگیری آن ها، برای سرویس دهی به کل سطل زباله ها ایجاد نماید. از ACVRPTW برای حل مسئله تحقیق استفاده شد. نتایج نشان می دهد که الگوریتم پیشنهادی در مدت زمان اجرای ۵ دقیقه توانسته است به صورت تواما با در نظر گرفتن کل محدودیت های تعیین شده، مسیره های بهینه از لحاظ زمانی برای هر ماشین متناسب با ویژگی های آن و کل ناوگان تعیین کند. به عبارت دیگر الگوریتم پیشنهادی توانسته است.

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

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

از طرفی برای تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی، مدل چندین مرتبه با تغییر دادن مقدار رنج پارامترها جواب ها هم متناسب با این تغییرات، متفاوت می شد. در جدول (۳) میزان برآورد 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 محدودیت های تحقیق (جدول ۳) می باشد. هر ماشین در مسیر مشخص شده تقریباً 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 مسافت 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 مسافت، مسافت طی شده به میزان ۱۴٪ و ۲۴٪ به ترتیب بوده است (جدول ۴ و ۵).

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

مسیر	برآورد 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

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 ملاحظات دیگری مدل پیشنهادی شامل انواع دیگری از مسائل VRP مانند MDVRP، MFVRP، VRPSST، FVRP و LRP باشد.

برقرار کند. اما، الگوریتم برای یک پایلوت کوچک (چندتا از نواحی منطقه ۳ و ۶ 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

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., Poletini, 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 Computational 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., & Fernández-Madrugal, 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] Eksioğlu, 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.