

## ارائه مدل جدید مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن و حل آن به وسیله الگوریتم تکاملی کوانتوم

### پیشنهادی

محسن زمانی<sup>۱</sup>  
مهدی علینقیان<sup>۲</sup>

### چکیده

مسئله مسیریابی موجودی یکی از مهمترین مسائل مطرح در حوزه لجستیک است. در این مسئله تصمیمات مربوط به توزیع و مدیریت موجودی با هم اتخاذ می‌شود. معمولاً امکان استفاده از چندین نوع وسیله با ویژگی‌های متفاوت وجود دارد و امکان بررسی و انتخاب بهترین ترکیب ناوگان، به منظور کاهش هزینه‌های موجودی و مسیریابی برای تصمیم‌گیرنده وجود دارد. از سوی دیگر توجه به میزان آلودگی تولید شده در این مسئله می‌تواند باعث کاهش میزان آلودگی تولید شده شود. در این مقاله یک مدل جدید مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن ارائه می‌شود. در مدل ارائه شده کمینه کردن میزان مصرف سوخت، هزینه‌های ترکیب ناوگان حمل، هزینه مسیریابی و موجودی مدنظر است. با توجه به NP-hard بودن مسئله مطرح شده، یک الگوریتم فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم فراابتکاری کوانتوم برای حل مسئله مطرح شده ارائه می‌شود. به منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل با نتایج حاصل از حل دقیق مسئله و الگوریتم پایه مورد مقایسه قرار می‌گیرند. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم تکاملی کوانتوم، مدل انتشار کیفیتی جامع، مسیریابی موجودی با ناوگان

ناهمگن، مصرف سوخت.

mohsen.zamani@in.iut.ac.ir

alinaghian@cc.iut.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد رشته مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲. استادیار رشته مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۶/۱۸؛ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۲۰

## مقدمه

یکی از زمینه‌هایی که در سال‌های اخیر مورد توجه محققین واقع شده است، مدیریت یکپارچه موجودی و حمل و نقل است به گونه‌ای که بتوان هزینه کل مربوط به سفارش، نگهداری و حمل و نقل موجودی را به حداقل رساند. از جمله مسائلی که به بررسی و بهینه‌سازی همزمان هزینه‌های حمل و نقل و موجودی می‌پردازد، مسئله مسیریابی موجودی است. مسئله مسیریابی موجودی با توجه به مفاهیم مدیریت موجودی توسط فروشنده به وجود آمده است. در مدیریت موجودی توسط فروشنده، تأمین‌کننده بر مبنای موجودی مشتریان و سیاست‌های زنجیره تأمین، در مورد میزان محصولی که باید به هر مشتری تحویل داده شود تصمیم‌گیری می‌کند (لی و سانگجین، ۲۰۰۸).

در حوزه حمل و نقل استفاده از محصولات نفتی توسط وسایل نقلیه باعث تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود و کاهش استفاده از این محصولات می‌تواند کمک بزرگی به کاهش آلودگی نماید. لجستیک سبز با اندازه‌گیری تأثیرات زیست‌محیطی استراتژی‌های مختلف توزیع، با کاهش سوخت مصرفی همراهی می‌کند (سبیهی و ایگلکس، ۲۰۰۷) لذا در نظر گرفتن معیارهای زیست‌محیطی در مسئله مسیریابی موجودی می‌تواند تأثیر مناسبی در کاهش آلودگی ناشی از ناوگان حمل در شرکت‌هایی داشته باشد که از سیستم‌های مدیریت موجودی مشتری پشتیبانی می‌کنند. از سوی دیگر انتخاب ترکیب مناسب ناوگان حمل و نقل تأثیر زیادی بر کاهش هزینه‌های توزیع و میزان آلودگی‌های تولید شده دارد. لذا در نظر گرفتن دو موضوع انتخاب ترکیب بهینه ناوگان حمل و نقل و کمینه‌سازی آلاینده‌گی‌های زیست‌محیطی به طور همزمان می‌تواند تأثیر زیادی بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و هزینه‌های توزیع داشته باشد.

در این مقاله یک مدل ریاضی جدید برای مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن ارائه شده است. در مدل ارائه شده هدف کمینه‌سازی میزان مصرف سوخت، هزینه ترکیب ناوگان حمل و نقل و هزینه‌های موجودی و مسیریابی است.

از این رو این مقاله با در نظر گرفتن اهداف زیست محیطی مانند کاهش مصرف سوخت می‌تواند تا حدودی نگرانی‌های سازمان‌ها و بخصوص شرکت‌های توزیع را در مورد آلودگی هوا و هزینه‌های سوخت مصرفی کاهش دهد.

تحقیق حاضر بر اساس هدف، کاربردی است که پیامد آن به دست آوردن نتایج کاربردی در زمینه کاهش هزینه‌های توزیع و میزان آلودگی‌های تولید شده برای یک شرکت توزیع است. از نقطه نظر چگونگی جمع‌آوری اطلاعات، پژوهش حاضر از نوع تحقیقات کتابخانه‌ای است و از منابع علمی و مقالات برای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز بهره برده شده است.

ادامه مقاله به این صورت است که در بخش ۲ مرور ادبیات موضوع بیان می‌شود در بخش ۳ به تعریف مسئله و مدل پیشنهادی پرداخته و در بخش ۴ روش‌های حل مسئله بیان می‌شود. بخش ۵ به ارائه نتایج اختصاص یافته است و در بخش آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی ارائه شده است.

پیشینه پژوهش

اولین مقاله در زمینه مسیریابی موجودی (IRP<sup>1</sup>) توسط بل و همکارانش (۱۹۸۳) منتشر شد. لین و همکاران (۲۰۱۴) IRP برای محصولات چندگانه را با ناوگان محدود در نظر گرفتند که در آن تقاضا در لحظه تحویل مشخص می‌شود، اگر مقدار تحویل داده شده تقاضا را برطرف نکند، مقدار باقی مانده تقاضا با استفاده از تور دیگری به مشتری می‌رسد که باعث ایجاد هزینه اضافی می‌شود. اگر باقیمانده تقاضا به مشتری نرسد، او هزینه کمبود را متحمل می‌شود. در مقاله آن‌ها از روش بهینه‌سازی کلونی مورچگان برای تعادل بین هزینه کمبود و هزینه حمل و نقل استفاده شده است.

احمدی جاوید و آزاد (۲۰۱۰) مدلی ارائه دادند که به طور همزمان تصمیمات مکان‌یابی، موجودی و مسیریابی را در یک سیستم زنجیره تأمین تصادفی بهینه می‌کرد. تقاضای مشتریان در مطالعه آن‌ها قطعی نیست و از توزیع نرمال پیروی می‌کند. آن‌ها برای حل مدل خود از الگوریتم ترکیبی جستجوی ممنوع و شبیه‌سازی تبرید استفاده کردند.

ادالیاساک و همکاران (۲۰۱۳) مدلسازی مسیریابی موجودی را تحت سیاست‌های بیشینه سطح موجودی و محدودیت بیشینه سطح موجودی برای وسایل نقلیه چندگانه گسترش دادند. آن‌ها وسایل نقلیه را یک بار بدون اندیس و بار دیگر با در نظر گرفتن اندیس در مدل آوردند. همچنین از روش ابتکاری بر پایه جستجوی همسایگی بزرگ تطبیقی برای یافتن جواب اولیه استفاده کردند و از روش شاخه و برش برای حل مدل‌ها بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مدلسازی با در نظر گرفتن اندیس برای وسایل نقلیه در یافتن جواب بهینه امتیاز بالاتری دارد در حالی که مدلسازی بدون در نظر گرفتن اندیس برای وسایل نقلیه در بدست آوردن کران پایین خوب برای مسائل بزرگ بهتر است.

حلیم و همکاران (۲۰۱۴) الگوریتم کلنی زنبور عسل را برای مسئله مسیریابی موجودی ارائه دادند. در مسئله آن‌ها توپولوژی یک به چند و ناوگان ناهمگن در نظر گرفته شده است. تابع هدف مدل آن‌ها شامل کمینه کردن هزینه‌های نگهداری، حمل و نقل و کمبود است. شاوو و هانگ (۲۰۱۴) IRP را با مفهوم تأمین در هاب ارائه دادند. همچنین در مدل خود از وسایل حمل و نقل ناهمگن استفاده کردند و سیاست موجودی آن‌ها تکمیل ظرفیت به هنگام بازدید بود.

کوپفر (۲۰۱۳) کاهش انتشار آلاینده‌ها را در مسئله مسیریابی وسایل نقلیه با در نظر گرفتن ناوگان‌های ناهمگن (FSVRP<sup>1</sup>) بررسی کرد. وون و همکاران (۲۰۱۳) نیز مسئله FSVRP را با هدف کمینه کردن میزان انتشار CO<sub>2</sub> مطرح کردند. کوک و همکاران (۲۰۱۴) FSVRP را با توجه به کاهش مصرف سوخت مدلسازی کردند و برای حل مدل، الگوریتمی مبتنی بر روش جستجو ارائه دادند.

دمیر و همکاران (۲۰۱۲) مسئله مسیریابی آلودگی دو هدفه را ارائه کردند. در مدل آن‌ها دو هدف کمینه کردن زمان سفر و کاهش مصرف سوخت لحاظ شده است. آن‌ها برای روش حل مدل خود الگوریتم جستجوی همسایگی بزرگ را بعنوان موتور جستجو برای روش‌های استقرایی مانند وزن‌دهی نرمال شده به کار بردند.

میرزاپور و رکیک (۲۰۱۳) مسئله مسیریابی موجودی با محصولات چندگانه را در نظر گرفتند که در آن وسایل نقلیه ناهمگن برای توزیع محصولات از تأمین کنندگان مختلف به یک کارخانه مورد استفاده قرار می‌گیرند. افق برنامه‌ریزی مسئله متناهی و تقاضای هر یک از محصولات، قطعی فرض شده است. آن‌ها مبحث لجستیک سبز را با در نظر گرفتن رابطه متقابل بین هزینه حمل و نقل و سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای در مدل گنجانده‌اند. در مدل آن‌ها از هیچ مدلی برای برآورد میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرفی استفاده نشده است و برای برآورد از این فرض استفاده شده است که میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای هر یک از وسایل نقلیه از قبل مشخص است و به مسافت طی شده توسط آن‌ها بستگی دارد.

سویسال و همکاران (۲۰۱۵) IRP را در سیستم مواد غذایی بررسی کردند. در مدل مسئله سعی شده است علاوه بر فرض‌های سنتی، دو فرض محدود بودن عمر کالا و تقاضای احتمالی در نظر گرفته شود. مدل آن‌ها کمینه کردن مصرف سوخت و به تبع آن، کاهش گازهای گلخانه‌ای را نیز دنبال کرد. آن‌ها یک مطالعه موردی در زمینه زنجیره تأمین گوجه‌فرنگی انجام داده و کاهش هزینه‌های واقعی را بعنوان نتیجه بدست آوردند.

نیکان و رحیمی (۲۰۱۵) یک مدل ریاضی چندهدفه برای مسئله مسیریابی موجودی در حوزه داروهای فاسدشدنی ارائه دادند. قسمت اول تابع هدف آن‌ها به حداقل رساندن هزینه نگهداری و حمل و نقل و قسمت دوم مربوط به حداقل رساندن مقدار فاسد شدن دارو و تولید گازهای گلخانه‌ای است. آن‌ها برای مقابله با عدم اطمینان، رویکرد فازی را بکار گرفتند. سویسال و همکاران (۲۰۱۶) مسیریابی موجودی سبز برای کالاهای فاسدشدنی را مطرح کردند. آن‌ها برای تابع هدف خود چند شاخص کلیدی در نظر گرفتند و در این مقاله مطالعه موردی برای زنجیره تأمین میوه آورده شده است. آن‌ها در انتها مفهوم همکاری افقی را یک راهکار مناسب برای کالاهای فاسدشدنی نتیجه‌گیری کردند. لرهلالی و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل مسیریابی موجودی برای تعیین مکان انبارها ارائه دادند. مدل دو هدفه آن‌ها مبتنی بر بهینه‌سازی هزینه‌های عملیاتی و انتشار گازهای

گلخانه‌ای است. نویسندگان برای حل مدل در ابعاد متوسط یک الگوریتم پیشنهادی ارائه دادند و نتایج حاکی از کارایی مطلوب این الگوریتم بود. با بررسی ادبیات موضوع مشخص می‌شود که تحقیقات زیادی در زمینه مسیریابی موجودی و لجستیک سبز به صورت جداگانه انجام شده است اما ادغام مسئله مسیریابی موجودی و لجستیک سبز در تحقیقات دارای فقر مطالعاتی است. این مقاله، مسیریابی موجودی، لجستیک سبز و همچنین ناوگان ناهمگن را مورد بررسی قرار می‌دهد که تا کنون در تحقیقات به طور همزمان در نظر گرفته نشده است.

## روش‌شناسی پژوهش

### تعریف مسئله و مدل پیشنهادی

مدل‌های بسیاری برای محاسبه میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرفی وجود دارد که در روش مدل کردن، ساختار و داده‌های موردنیاز با یکدیگر متفاوت هستند. یکی از این مدل‌ها، مدل‌های میکروسکوپیست است که تولید گازهای گلخانه‌ای و مصرف سوخت را به صورت لحظه به لحظه برآورد می‌کند. این مدل‌ها بعنوان مدل‌های مبتنی بر نیرو نیز شناخته می‌شوند. یکی از مدل‌های پرکاربرد میکروسکوپیست، مدل انتشار کیفیتی جامع (CMEM<sup>1</sup>) است که می‌توان از آن برای محاسبه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و سوخت مصرفی استفاده کرد. در این مدل سرعت و بار وسیله نقلیه و شیب جاده مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل با توجه به تحقیقات کوک و همکاران در این مقاله آورده شده است (کوک و همکاران، ۲۰۱۴).

### فرضیات مسئله

مدل پیشنهاد شده شامل فرضیات زیر است:

- حداکثر تعداد وسایل نقلیه در دسترس نامحدود است و استفاده از هر نوع وسیله نقلیه هزینه ثابت مربوط به خود را دارد.

- هر یک از وسایل نقلیه پارامتر مخصوص به خود را دارند و با یکدیگر متفاوت هستند.
  - وسایل نقلیه در دسترس در حالت استاندارد خود قرار دارند و سیستم سوخت آن‌ها تنظیم است.
  - مبدأ و مقصد (گره صفر) همه وسایل نقلیه یکسان است یعنی یک انبار مرکزی وجود دارد.
  - تقاضای مشتریان در همه دوره‌های زمانی در ابتدای افق برنامه‌ریزی مشخص است.
  - تقاضای هر یک از مشتریان از ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله نقلیه کوچک‌تر است.
  - تقاضای هر یک از مشتریان در هر دوره زمانی از ظرفیت انبار مشتری کوچک‌تر است.
  - افق برنامه‌ریزی متناهی است.
  - یک نوع محصول بین مشتریان توزیع می‌شود.
  - محصول در دسترس در هر دوره زمانی در انبار مرکزی نامحدود است.
  - حداکثر ظرفیت انبار مشتریان مشخص است.
  - هزینه نگهداری موجودی فقط برای مشتریان لحاظ می‌شود.
  - سیاست موجودی، سیاست محدودیت پیشینه سطح<sup>۱</sup> است.
  - مشتریان در ابتدای افق برنامه‌ریزی دارای موجودی اولیه هستند.
  - کمبود مجاز نیست.
- با توجه به مفروضات فوق، در ادامه پارامترها و متغیرهای مدل پیشنهادی معرفی و سپس به شرح تابع هدف و محدودیت‌های مدل پرداخته می‌شود.

### اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای مسئله

علاوه بر پارامترهای معرفی شده در جداول ۱ و ۲، پارامترهای دیگر در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۱. پارامترهای مدل مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن

پارامتر	تعریف	پارامتر	تعریف
$N(i, j, p)$	مجموعه گره‌ها شامل مشتریان و انبار	$m_h$	تعداد در دسترس وسیله نوع h
$N'(i, j)$	مجموعه مشتریان	$d_{ij}$	مسافت بین مشتری i و j (متر)
$H(h)$	مجموعه وسایل نقلیه	$f_h$	هزینه بکارگیری وسیله نوع h
$T(t)$	مجموعه دوره‌های زمانی	$dem_i^t$	تقاضای مشتری i ام در دوره زمانی t ام
$cap_i$	ظرفیت نگهداری موجودی مشتری i ام	$f_d$	هزینه کار راننده در واحد زمان
$Q_h$	ظرفیت وسیله نقلیه	$v_h$	سرعت بهینه وسیله نوع h (متر بر ثانیه)

متغیرهای مدل پیشنهادی در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲. متغیرهای مدل مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن

متغیر	تعریف
$x_{ij}^{ht}$	اگر در دوره t وسیله h مسیر i تا j را بپیماید برابر با ۱ و در غیر این صورت صفر است.
$f_{ij}^{ht}$	مقدار بار وسیله h در مسیر i تا j در دوره t
$q_i^t$	مقدار بار تحویل داده شده به مشتری i در دوره t
$I_i^t$	موجودی آخر دوره مشتری i در دوره t

### مدل غیر خطی پیشنهادی

در این قسمت به ارائه مدل پیشنهادی و شرح آن پرداخته می‌شود. مدل ریاضی

پیشنهادی مسئله مسیریابی موجودی سبز با ناوگان ناهمگن به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} \lambda f_c k^h N^h v^h d_{ij} x_{ij}^{ht} / v^h \\ & + \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} \lambda f_c \gamma^h a d_{ij} (w_h x_{ij}^{ht} + f_{ij}^{ht}) \\ & + \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} \lambda f_c \beta^h \gamma^h d_{ij} (v^h)^n x_{ij}^{ht} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} f^h x_{0j}^{ht} \\ & + \sum_{i \in n} \sum_{t \in T} f^h x_{0i}^{ht} \end{aligned} \quad \text{(رابطه ۱)}$$



$$+ \sum_{i \in n} \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} f_q x_{ij}^{ht} / v^h$$

S.t

$$\sum_{i \in n} x_{0j}^{ht} \leq m_h \quad \forall h = 1, \dots, H; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\sum_{j \in n, j \neq i} \sum_{h \in H} x_{ij}^{ht} \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$\sum_{i \in n, i \neq j} \sum_{h \in H} x_{ij}^{ht} \leq 1 \quad \forall j = 0, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\sum_{i \in n, i \neq p} x_{ip}^{ht} = \sum_{j \in n, j \neq p} x_{pj}^{ht} \quad \forall p = 0, \dots, n; h = 1, \dots, H; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{i \in n} \sum_{h \in H} f_{ji}^{ht} - \sum_{j \in n} \sum_{h \in H} f_{ij}^{ht} = q_i^t \quad \forall i, j = 0, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$q_i^t * x_{pj}^{ht} \leq f_{ij}^{ht} \quad \forall i, j = 0, \dots, n; h = 1, \dots, H; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$f_{ij}^{ht} \leq (Q_h - q_i^t) * x_{ij}^{ht} \quad \forall i, j = 0, \dots, n; h = 1, \dots, H; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$I_i^t = I_i^{t-1} + q_i^t - dem_i^t \quad \forall i = 0, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۹)}$$

$$I_i^{t-1} + q_i^t \leq cap_i \quad \forall i = 0, \dots, n; t = 1, \dots, T \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$x_{ij}^{ht} \in \{0, 1\}, (f_{ij}^{ht}, q_i^t, I_i^t) \geq 0 \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

در مدل پیشنهادی تابع هدف از ۶ قسمت تشکیل شده است قسمت اول تا سوم مربوط به محاسبه هزینه سوخت مصرفی و انتشار آلاینده است، قسمت ۴ هزینه ثابت وسایل را در نظر می گیرد. قسمت ۵ هزینه نگهداری موجودی و قسمت ۶ هزینه راننده را محاسبه می کند. در مدل ارائه شده محدودیت (۲) حداکثر تعداد وسایل از هر نوع را در هر دوره در نظر می گیرد که در این مقاله تعداد وسایل نامحدود فرض می شود. محدودیت (۳) تا محدودیت (۵) مربوط به مسیریابی وسایل بوده و تضمین می کند که حداکثر تعداد بازدید در هر دوره برای هر مشتری یک مرتبه است. همچنین اگر وسیله ای در یک دوره به یک مشتری وارد شد باید همان وسیله در همان دوره از آن مشتری خارج شود. محدودیت های (۶) تا (۸) مقدار محصول تحویلی به مشتریان و میزان جریان یال ها را در هر دوره، توسط هر وسیله مشخص می کنند. محدودیت (۹) موجودی آخر هر دوره برای هر مشتری را محاسبه می کند. محدودیت (۱۰) حداکثر ظرفیت هر مشتری را تضمین می کند و محدودیت (۱۱) حدود متغیرها را بیان می کند.

### خطی سازی مدل پیشنهادی

مدل معرفی شده یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط است. این مدل به دلایل ضرب دو متغیر در یکدیگر غیرخطی است. ضرب دو متغیر در یکدیگر در ۲ مورد تکرار شده است. در محدودیت‌های (۷) و (۸) دو متغیر در یکدیگر ضرب شده‌اند، یکی از متغیرها از نوع پیوسته و دیگری از نوع باینری است. با جایگزینی رابطه (۱۲) به جای رابطه (۷) و رابطه (۱۳) و (۱۴) به جای رابطه (۸) می‌توان این دو رابطه غیرخطی را به خطی تبدیل کرد.

$$q_i^t \leq f_{ij}^{ht} + M * (1 - x_{pj}^{ht}) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$f_{ij}^{ht} - M * (1 - x_{pj}^{ht}) \leq (Q_h - q_i^t) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$f_{ij}^{ht} \leq M * x_{pj}^{ht} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

### روش حل

پیچیدگی مسئله مسیریابی وسایط نقلیه به این دلیل است که شامل دو مسئله فروشنده دوره گرد و مسئله بسته‌بندی است. از آنجایی که TSP از رده مسائل NP است و مسئله مسیریابی وسایط نقلیه قادر به تبدیل شدن به مسئله TSP است، مسئله مسیریابی وسایط نقلیه حداقل به سختی مسئله TSP شناخته شده است و NP-hard است. مسئله مطرح در این مقاله، مسئله توسعه یافته مسیریابی موجودی است که چون شامل مسئله مسیریابی وسایط نقلیه است، جزء دسته مسائل NP-hard است (شاو و هوانگ، ۲۰۱۴). لذا به منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم کوانتوم ارائه شده است که در ادامه توضیحات مربوط به آن ارائه می‌شود.

### نحوه نمایش جواب

ساختار نمایش جواب در این مقاله به صورت یک ماتریس باینری است. سطرهای این ماتریس مشتریان و ستون‌های آن دوره‌های زمانی است. این ماتریس صفر-یک بازدید یا عدم بازدید مشتریان را در هر دوره زمانی نشان می‌دهد که توسط الگوریتم فراابتکاری ساخته می‌شود.

در ادامه به منظور مسیریابی و انتخاب نوع وسیله نقلیه جهت بازدید مشتریانی که در یک دوره باید بازدید شوند، یک الگوریتم ابتکاری مبتنی بر الگوریتم صرفه جویی واقع بینانه فرصت (گلدن و همکاران، ۱۹۸۴) ارائه شده است.

در الگوریتم پیشنهادی صرفه جویی<sup>۲</sup>  $(S_{ij})$  اتصال دو گره  $i, j$  به صورت رابطه (۱۵) ارائه می شود.

$$s_{ij} = f(i) + f(j) - f(i, j) + \delta(w) \cdot \hat{F}(P(z_i + z_j) - z_i - z_j)$$

$$w = P(z_i + z_j) - P(\max(z_i, z_j)) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

$$\delta(w) = \begin{cases} 1 & \text{if } w > 0 \\ 0 & \text{if } w = 0 \end{cases}$$

در رابطه (۱۵):

$f(i)$  شامل هزینه مصرف سوخت، هزینه راننده و هزینه ثابت وسیله نقلیه توری است که گره  $i$ ، گره ابتدایی یا انتهای آن تور است.

$f(j)$  شامل هزینه مصرف سوخت، هزینه راننده و هزینه ثابت وسیله نقلیه توری است که گره  $j$ ، گره ابتدایی یا انتهای آن تور است.

$f(i, j)$  شامل هزینه مصرف سوخت، هزینه راننده و هزینه ثابت وسیله نقلیه، توری است که از ادغام دو تور با اتصال دو گره  $i$  و  $j$  به دست می آید.

$P(z_i)$  ظرفیت کوچکترین وسیله ای است که می تواند تقاضای توری که  $i$  گره ابتدایی یا انتهای آن است را سرویس دهی کند.

هزینه ثابت بزرگ ترین وسیله ای است که می تواند مقداری کوچکتر یا برابر تقاضای توری که  $i$  گره ابتدایی یا انتهای آن است را سرویس دهی کند.

$\delta(w)$  زمانی مقدار یک می گیرد که ادغام دو تور منجر به استفاده از وسیله با ظرفیت بیشتر شود.

مراحل الگوریتم ارائه شده به صورت زیر است:

- گام ۱: به هر یک از گره ها (مشتریان) یک وسیله نقلیه اختصاص پیدا کند.
- گام ۲: گام های ۳ تا ۱۱ تا تشکیل تورهای مربوط به همه مشتریان تکرار شود.

- گام ۳: صرفه جویی حاصل از اتصال همه جفت گره که دو شرط زیر را دارند، از رابطه (۱) محاسبه شود و در لیست ۱ ذخیره شوند.
- ۱- دو گره باید نقاط ابتدایی یا انت‌هایی تورها باشند.
- ۲- مجموع تقاضای دو تور که این دو گره نقاط ابتدایی یا انت‌هایی آن‌ها هستند نباید از ظرفیت بزرگ‌ترین وسیله نقلیه موجود بیشتر باشد.
- گام ۴: اگر در میان گره‌ها صرفه جویی مثبت وجود نداشت به گام ۱۲ بروید.
- گام ۵: لیست ۱ به صورت نزولی مرتب شود.
- گام ۶: از بین بازه  $[a, b]$  یک عدد  $t$  به تصادف انتخاب شود (در این مقاله  $a=2$  و  $b=6$  تنظیم گردید).
- گام ۷: از ابتدای لیست ۱ به تعداد  $t$  جفت گره انتخاب شود و در لیست ۲ ذخیره شود.
- گام ۸: در لیست ۲ با توجه به مقدار صرفه جویی از چرخ رولت<sup>۱</sup> استفاده شود و یک جفت گره به تصادف انتخاب شود.
- گام ۹: دو تور که جفت گره انتخاب شده گام قبل، نقاط ابتدایی یا انت‌هایی آن‌ها هستند، ادغام شوند.
- گام ۱۱: تورهای تغییر یافته با استفاده از جستجوی محلی 2-opt بهینه محلی شوند.
- گام ۱۲: پایان و نمایش جواب.
- لازم به ذکر است الگوریتم پیشنهادی چندین مرتبه تکرار می‌شود (در این مقاله ۳ مرتبه تکرار در نظر گرفته شده است) و در انتها بهترین جواب گزارش می‌شود. نتایج حاصل از الگوریتم ابتکاری نسبت به حل دقیق نشان می‌دهد که خطای الگوریتم ابتکاری در حدود ۰/۷۸٪ است که مقدار نشان دهنده کارایی بالای الگوریتم ابتکاری ارائه شده است.

### الگوریتم تکاملی کوانتوم

محاسبات کوانتومی در اوایل دهه ۱۹۸۰ توسط بنیوف<sup>۱</sup> و فیلمان<sup>۲</sup> مطرح شده است (کی و همکاران، ۲۰۰۷). استفاده از مفاهیم محاسبات کوانتومی برای افزایش کارایی اجرای الگوریتم‌های تکاملی بر روی کامپیوترهای معمولی منجر به توسعه الگوریتم‌های تکاملی کوانتومی (QEA<sup>۳</sup>) شده است (هان و کیم، ۲۰۰۲). هان و کیم (۲۰۰۲) QEA را برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی پیشنهاد کردند. در QEA از مفاهیم محاسبات کوانتومی از قبیل بیت کوانتوم، برهم‌نهدستی خطی حالات و گیت چرخشی کوانتومی استفاده می‌شود و در آن برای اولین بار امکان استفاده از نمایش کوانتومی به جای نمایش‌های متداول دودویی، عددی و نمادی مطرح شده است. در ادامه مفاهیم و ساختار QEA توضیح داده می‌شود. در منابع ذکر شده الگوریتم پایه به طور کامل تشریح شده است. شبه کد QEA در شکل ۱ ارائه شده است.

### الگوریتم تکاملی کوانتوم پیشنهادی

در قسمت قبل الگوریتم کلاسیک QEA بیان شد. نتایج تحقیقات قبلی در زمینه الگوریتم تکاملی کوانتوم نشان می‌دهند که این الگوریتم دارای مشکل همگرایی زودرس ناشی از پدیده سواری مجانی<sup>۴</sup> است (پلاتل و همکاران، ۲۰۰۷). این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که مقدار یکی از بیت‌های جواب سراسری تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی با مقدار مورد انتظار آن مغایرت داشته باشد اما به واسطه مقدار برانزدگی کلی جواب سراسری مقدار این بیت در طی اجرای الگوریتم بدون تغییر بماند. در این صورت اصطلاحاً گفته می‌شود که بیت مورد نظر از سایر بیت‌های جواب سراسری، سواری مجانی می‌گیرد. برای رفع این مشکل و بهبود الگوریتم تکاملی کوانتوم راه‌حل‌هایی ارائه شده است که در ادامه به شرح هریک پرداخته می‌شود.

### Procedure QEA

1. Benioff
2. Feynman
3. quantum evolutionary algorithm
4. Hitchhiking Phenomenon

```

begin
t=0
initialize Q(t)
make P(t) by observing Q(t)
evaluate P(t)
store the best solutions among P(t) into b
while (not termination-condition) do
begin
t = t+1

update Q(t) using Q-gate
make P(t) by observing the states of Q(t-1)
evaluate P(t)
store the best solutions among P(t) into b
end
end
    
```

#### شکل ۱. شبه کد QEA

تولید چندین جواب با توجه به یک فرد: از این ایده برای تنوع بیشتر و افزایش کیفیت جواب‌ها استفاده شده است. به این صورت که هر فرد کیو بیته،  $L$  مرتبه جواب تولید می‌کند. سپس بهترین جواب، در جواب فعلی  $c_i(t)$  ذخیره می‌شود. در هر نسل بهترین فرد (جواب) انتخاب می‌شود و بعنوان بهترین جواب جاری در  $z(t)$  ذخیره می‌شود. بهترین جواب سراسری  $b^1$  نیز در هر نسل بروزرسانی می‌شود.

استفاده از بهترین جواب جاری (در هر نسل): در این مقاله برای رفع مشکل پدیده سواری مجانی در مرحله بروزرسانی کیو بیته‌ها علاوه بر بهترین جواب سراسری، به بهترین جواب جاری در هر نسل (تکرار) نیز توجه می‌شود. در مرحله بروز رسانی  $Q(t)$  با استفاده از کیو گیت، بروزرسانی می‌شود که زاویه چرخش به صورت رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\Delta\theta_{ij}(t) = \gamma_1 \left[ (b_j - c_{ij}(t)) + \alpha (b_j * c_{ij}(t)) - \alpha(1 - b_j) * (1 - c_{ij}(t)) \right] + \gamma_2 \left[ (z_j(t) - c_{ij}(t)) + \alpha (z_j(t) * c_{ij}(t)) - \alpha(1 - z_j(t)) * (1 - c_{ij}(t)) \right]$$

رابطه ۱۶

پس از ساده‌سازی رابطه (۱۷) حاصل می‌شود.

$$\Delta\theta_{ij}(t) = \gamma_1 [(\alpha + 1)b_j + (\alpha - 1)c_{ij}(t) - \alpha]$$

رابطه ۱۷

$$+\gamma_2[(\alpha + 1)z_j(t) + (\alpha - 1)c_{ij}(t) - \alpha]$$

در رابطه (۱۶)،  $C_{ij}$  بیت ز فرد  $i$ ام جواب جاری است.  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  دو ضریب مثبت هستند که به ترتیب میزان اعتماد به بهترین جواب سراسری و بهترین جواب هر نسل را نشان می دهند. برای افزایش سرعت همگرایی، الگوریتم به گونه ای طراحی شده که بیت هایی که شبیه بیت های بهترین جواب های سراسری و جاری هستند سریع تر از بیت های متفاوت، به مقدار خود همگرا شوند. برای در نظر گرفتن این موضوع، ضریب  $\alpha$  که ضریب مثبت و بزرگ تر از ۱ است در نظر گرفته می شود. رابطه (۱۶) به گونه ای تعریف شده است که مقادیر مثبت  $\Delta\theta$  احتمال مقدار ۱ و مقادیر منفی احتمال مقدار ۰ را افزایش می دهد. لازم به ذکر است در الگوریتم پیشنهادی  $\alpha$  و  $\beta$  فقط مقادیر مثبت می گیرند یعنی محدوده  $\alpha$  و  $\beta$  در ربع اول دایره مثلثات است. برای جلوگیری از همگرایی زودرس الگوریتم از فن ارائه شده در (هان و کیم، ۲۰۰۲) استفاده می شود. به طوری که کیو بیت ها از مقدار مشخص  $\epsilon$  نمی توانند به ۰ یا ۱ نزدیک شوند. شبه کد الگوریتم پیشنهادی در شکل ۲ ارائه شده است.

---

Procedure IQEA

$t \leftarrow 0$

Initialize population  $Q(t)$

While (not termination condition) do

$t \leftarrow t + 1$

Make  $P(t)$  by observing  $Q(t)$

For each Q-bit individual  $q_i(t)$  do

Run L times by observing  $q_i(t)$

$c_i(t) \leftarrow$  best solution among l of times

End for

Evaluate  $P(t)$

$z(t) \leftarrow$  best solution among  $P(t)$

Update b

Update  $Q(t)$  using Q-gate by  $P(t)$ ,  $z(t)$ , b,  $c_i(t)$

End while

End procedure

---

شکل ۲. شبه کد الگوریتم پیشنهادی

### تنظیم پارامتر

از جمله روش‌های توانمند آماری که برای تنظیم پارامترها مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تاگوچی است. در روش تاگوچی به جای استفاده از مقدار جواب از نسبتی به نام سیگنال به نویز S/N برای بررسی جواب استفاده می‌شود. در این نسبت S میزان مطلوبیت (مقدار تابع هدف) است و N مقدار عدم مطلوبیت است (انحراف استاندارد مقادیر تابع هدف). در نتیجه هدف افزایش مقدار این نسبت تا حد امکان است (مونتگمری، ۱۹۹۷).

در روش تاگوچی توابع هدف به سه دسته تقسیم می‌شوند، دسته اول بیشتر - بهتر نامیده می‌شود، در این دسته مطلوبیت با افزایش تابع هدف حاصل می‌شود. دسته دوم کمتر - بهتر است، در این دسته کاهش تابع هدف مطلوبیت را افزایش می‌دهد. دسته سوم نومیال - بهتر نام دارد، در این دسته نزدیک شدن به یک مقدار خاص مطلوب است. با توجه به تابع هدف انتخابی فرمول محاسبه نسبت S/N متفاوت است. با توجه به هدف این پژوهش که کمینه نمودن مقادیر تابع هدف است، از رابطه (۱۸) برای محاسبه این نسبت استفاده شده است.

$$\text{رابطه ۱۸} \quad -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

در رابطه (۱۸)،  $y_i$  مقدار تابع هدف است. در این پژوهش برای الگوریتم تکاملی کوانتوم سه پارامتر تعریف می‌شود. که هر یک از پارامترها در سه سطح بررسی می‌شوند. جدول ۳ مقادیر این پارامترها را نشان می‌دهد.

جدول ۳. پارامترها و سطوح مورد ارزیابی

پارامتر	سطح	مقدار	پارامتر	سطح	مقدار	پارامتر	سطح	مقدار
$\alpha$	۱	$0.1 * \pi$	$\gamma_2$	۱	$0.2 * \pi$	$\gamma_1$	۱	$0.2 * \pi$
	۲	$0.15 * \pi$		۲	$0.25 * \pi$		۲	$0.25 * \pi$
	۳	$0.2 * \pi$		۳	$0.3 * \pi$		۳	$0.3 * \pi$

در ادامه برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است. با توجه به تعداد فاکتورهای انتخابی و سطوح انتخاب شده برای تحلیل، جدول استاندارد تعامدی  $L9(3^3)$  برای این مطالعه انتخاب شد. برای بررسی هر یک از بردارهای تعامدی ارائه شده پنج مسئله



انتخاب می شود. هر مسئله با توجه به مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترها در هر سطر از جدول تا کوچی مربوط به ماهیت مسئله، سه بار اجرا می شود میانگین این جواب ها به نرم افزار مینی تب گزارش می شود. معیار پاسخ برای حل هر یک از مسائل میزان خطا در نظر گرفته شد. در این صورت طبق عملکرد تا کوچی در مینی تب، در هر مسئله برای هر پارامتر، سطحی که بیشترین نسبت S/N را دارد انتخاب شد. سپس برای هر یک از پارامترها در پنج مسئله متوسط نسبت S/N با توجه به سطح انتخابی در هر مسئله محاسبه شد. در نهایت برای هر پارامتر، سطحی که بیشترین نسبت S/N را دارد، بعنوان بهترین سطح برای آن پارامتر در نظر گرفته شد. نتایج نهایی که با الگوریتم تکاملی کوانتوم پیشنهادی بهبود یافته حل شده اند در جدول ۴ آمده است.

جدول ۴. نسبت S/N در سطوح مختلف پارامترها

سطوح	پارامترها		
	(۱)	(۲)	(۳)
۱	-۵۸/۵۷	-۵۸/۷۰	-۷۹/۵۸
۲	-۵۸/۵۸	-۵۸/۴۷	-۵۸/۲۸
۳	-۵۸/۱۸	-۵۸/۱۷	-۵۸/۲۵

بنابراین با توجه به نتایج حاصل از روش تا کوچی پارامترها برای الگوریتم تکاملی کوانتوم به این صورت در نظر گرفته شد: مقدار پارامتر (۱)  $۰/۰۳*\pi$ ، پارامتر (۲)  $۰/۰۲*\pi$ ، پارامتر (۳)  $۱/۵$ .

### نتایج محاسباتی

در این قسمت به بررسی الگوریتم پیشنهادی پرداخته می شود. حل دقیق مسائل با ابعاد کوچک با استفاده از نرم افزار گمز بدست آمده است. برای تولید دسته مسائل نمونه از مسائل آگرت ۱ استفاده شده است. برای تولید مسائل نمونه با ابعاد کوچک به تعداد گره مورد نظر از ابتدای گره های مسئله  $n=۱۶$  از مسائل نمونه آگرت انتخاب شد. برای تولید مسائل با ابعاد بزرگ ۲ از شماره ۱ تا ۴ به تعداد گره های مورد نظر از ابتدای گره های مسئله

1 Augerat  
2 large problem instances

$n=16$  انتخاب شد. برای تولید مسائل نمونه بزرگ از شماره ۴ تا ۹ از ابتدای گره‌های مسئله  $n=32$  و برای دیگر مسائل بزرگ از ابتدای گره‌های مسئله  $n=80$  از مسائل آگرت، انتخاب شد. در این مسائل ۳ نوع وسیله نقلیه سبک، نیم‌سنگین و سنگین در نظر گرفته شد که پارامترهای مربوط به آن‌ها طبق جدول ۴ در نظر گرفته شده‌اند. سرعت وسایل نقلیه برابر سرعت بهینه آن‌ها مطابق جدول ۵ است. الگوریتم‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 2012 و بر روی کامپیوتر CPU Core i5 و 4GB RAM اجرا شدند. در این بخش نتایج الگوریتم‌ها در دو قسمت، مسائل ابعاد کوچک و مسائل با ابعاد بزرگ مورد بررسی قرار گرفته شده است.

### مسائل با ابعاد کوچک

به منظور بررسی اعتبار الگوریتم پیشنهاد شده، حل بهینه مسائل در ابعاد کوچک با جواب‌های حاصل از دو الگوریتم کوانتوم پایه و پیشنهادی مقایسه شده است. مقایسه نتایج بدست آمده در جدول ۳ مشاهده می‌شود. در این جدول درصد خطا از رابطه (۱۹) بدست آمده است.

$$\text{رابطه (۱۹)} \quad 100 * \frac{\text{جواب بهینه مسئله} - \text{جواب مسئله}}{\text{جواب بهینه مسئله}}$$

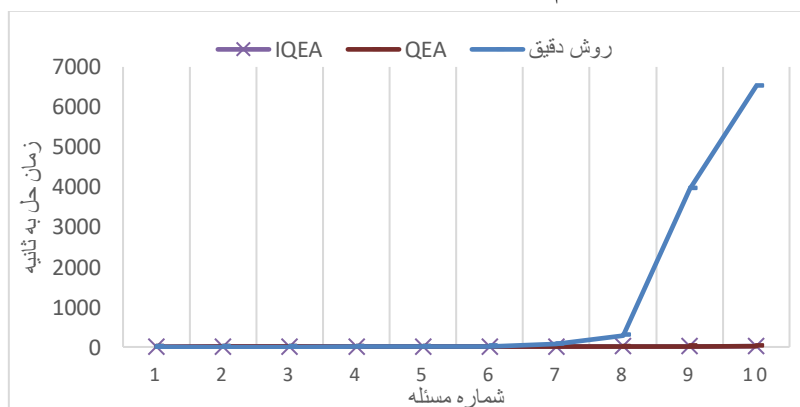
درستون اول (مشخصات مسئله)، عدد اول شماره مسئله، عدد دوم تعداد مشتریان، عدد سوم تعداد نوع وسایط نقلیه و عدد چهارم تعداد دوره‌های زمانی را نشان می‌دهد. الگوریتم کوانتوم پایه با نماد QEA و الگوریتم کوانتوم پیشنهادی با نماد IQEA در جدول نمایش داده شده‌اند.

جدول ۵. مقایسه الگوریتم‌های QEA، IQEA با روش دقیق در ابعاد کوچک

مشخصات مسئله	روش دقیق		QEA			IQEA		
	جواب بهینه	زمان حل (S)	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا (%)	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا (%)
۱/۴/۳	۱۱۱۵/۸	۰/۶	۱۱۱۵/۸	۲/۵۱	۰	۱۱۱۵/۸	۲/۶	۰
۲/۴/۴	۱۶۰۷/۸	۰/۷	۱۶۰۷/۸	۲/۶	۰	۱۶۰۷/۸	۲/۸	۰
۳/۵/۳	۱۱۸۷	۲	۱۲۳۱	۴/۹	۳/۷۱	۱۱۹۲	۵/۲	۰/۴۲

مشخصات مسئله	روش دقیق		QEA			IQEA		
	جواب بهینه	زمان حل (S)	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا (%)	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا (%)
۴/۵/۴	۱۷۰۳	۴/۵	۱۷۰۳	۶/۵	۰	۱۷۱۸	۶/۸	۰/۸
۵/۶/۳	۱۲۹۲/۸	۹/۶	۱۳۴۱/۱	۶/۰/۸	۳/۷۴	۱۲۹۸/۲	۷/۲	۰/۴۲
۶/۶/۴	۱۸۶۲/۵	۱۵/۳	۱۸۶۲/۵	۹/۰	۰	۱۸۶۲/۵	۹/۳	۰
۷/۷/۳	۱۶۷۶/۶	۷۴	۱۷۰۱/۶	۷/۰/۱	۱/۴۹	۱۶۷۶/۶	۷/۳	۰
۸/۸/۳	۲۰۰۱/۴	۲۸۹	۲۰۶۹/۶	۱۰/۴	۳/۴۱	۲۰۶۹/۶	۱۰/۵۹	۳/۴۱
۹/۸/۴	۲۱۰۶/۷	۳۹۵۰	۲۲۲۸/۷	۱۵/۸	۵/۷۹	۲۱۶۱	۱۶/۰۴	۲/۵۸
۱۰/۹/۴	۳۰۸۴/۲	۶۵۲۱	۳۲۴۴/۸	۱۹/۲	۵/۲۱	۳۱۱۹/۹	۲۰/۶	۱/۱۶
میانگین	۱۷۶۳/۸	۱۰۸۶	۱۸۱۰/۵	۱۷/۴۳	۲/۳۳	۱۷۸۰/۶	۸/۸۴	۰/۸

همان‌طور که از جدول مشخص است، میانگین درصد خطا در الگوریتم تکاملی کوانتوم پیشنهادی برابر ۰/۸ شده است. در صورتی که الگوریتم کوانتوم دارای میانگین خطای ۲/۳۳ درصد است. می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک عملکرد مطلوبی دارد و نسبت به الگوریتم پایه بهتر است. همان‌طور که از شکل ۳ پیدا است زمان حل مسئله توسط روش دقیق با افزایش ابعاد مسئله به صورت نمایی افزایش می‌یابد، اما روش‌های فراابتکاری بررسی شده در مدت زمان کمی به جواب بهینه و نزدیک به بهینه رسیده‌اند و کاهش چشم‌گیری در زمان حل دارند.



شکل ۳. مقایسه زمان حل سه الگوریتم با روش دقیق

### مسائل با ابعاد بزرگ

با توجه به این که زمان حل مسائل توسط روش دقیق برای مسائل بزرگ تر به شدت افزایش می یابد، از الگوریتم های پیشنهاد شده در ابعاد بزرگ استفاده می شود. در این بخش مسائل بزرگ معرفی شده با دو الگوریتم QEA و IQEA حل شده و با یکدیگر مقایسه می شوند. به منظور مقایسه الگوریتم ها، برای هر الگوریتم درصد خطا از رابطه (۲۰) محاسبه شده است. ستون اول جدول ۶ مشابه ستون اول جدول ۵ تعریف می شود.

بهترین جواب - جواب الگوریتم  
 رابطه (۲۰) \* 100

بهترین جواب

جدول ۶. مقایسه الگوریتم های پیشنهادی در ابعاد بزرگ

مشخصات مسئله	IQEA			QEA		
	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا/٪	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا/٪
۱/۱۰/۴	۳۵۱۷/۶	۱۶/۴	۰	۳۵۱۷/۶	۳۵/۳	۰
۲/۱۰/۶	۵۶۷۲/۷	۳۲/۴	۰	۵۶۷۲/۷	۳۴/۸	۰
۳/۱۲/۶	۶۵۴۶/۹	۱۰۳/۷	۰	۶۵۴۶/۹	۷۹/۳	۰
۴/۱۵/۳	۳۲۳۹/۴	۶۴/۴	۲/۵	۳۱۶۰/۲	۱۳۷/۹	۰
۵/۱۵/۴	۴۵۱۸/۰	۱۴۴/۹	۰	۴۵۱۸	۱۸۶/۲	۰
۶/۱۶/۵	۵۸۸۶/۴	۵۳۴	۰	۵۸۸۶/۴	۲۷۷/۱	۰
۷/۱۸/۴	۴۹۸۰/۴	۳۳۸/۳	۰	۵۰۰۴/۱	۱۰۸۰/۴	-۰/۵
۸/۲۰/۳	۳۹۱۷/۶	۲۹۲/۵	۰	۳۹۱۷/۶	۳۵۱/۳	۰
۹/۲۰/۵	۷۲۰/۱/۱	۴۴۲/۶	۰	۷۲۲۸/۷	۳۵۴/۲	-۰/۴
۱۰/۲۲/۳	۴۲۱۹/۶	۳۷۷/۹	۰	۴۲۴۷	۳۶۴/۸	-۰/۷
۱۱/۲۲/۴	۵۹۸۳/۲	۴۴۱/۵	۰	۶۴۲۰/۵	۳۸۱/۴	۷/۳
۱۲/۲۴/۵	۹۰۱۱/۴	۸۰۱/۲	۰	۱۰۰۴۰/۵	۷۰۵	۱۱/۴
۱۳/۲۵/۳	۵۰۷۷/۹	۶۴۹/۴	۰	۵۰۸۹/۴	۶۱۹	-۰/۲
۱۴/۲۵/۶	۱۱۲۴۰/۵	۷۵۰/۲	۰	۱۱۲۵۲	۶۷۲/۴	-۰/۱
۱۵/۲۶/۳	۵۱۹۷/۶	۷۴/۱	۰	۵۱۹۷/۶	۶۱۹/۷	۰
۱۶/۲۸/۳	۵۱۰۴/۲	۱۱۴۵/۸	۰	۵۱۰۴/۲	۹۶۷/۹	۰
۱۷/۳۰/۴	۷۸۲۴/۴	۹۸۹/۲	۰	۷۸۲۴/۴	۱۱۲۶/۸	۰

مشخصات مسئله	IQEA			QEA		
	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا/٪	تابع هدف	زمان حل (S)	درصد خطا/٪
۱۸/۳۰/۵	۱۱۱۲۷/۴	۲۱۴۱/۳	۱۰/۴	۱۰۰۷۵/۴	۲۱۴/۹	۰
۱۹/۳۵/۳	۶۰۱۲/۵	۱۹۴۶/۷	۰	۶۱۹۱/۷	۱۸۹۸/۷	۳/۰
۲۰/۳۵/۶	۱۲۹۵۶/۴	۴۰۲۲	۰	۱۳۱۹۵/۶	۵۰۱۱/۲	۱/۸
میانگین	۶۴۶۱/۸	۷۹۸/۸	۰/۶	۶۵۰۴/۵	۷۵۵/۹	۳/۱

با توجه به جدول ۴، عملکرد الگوریتم IQEA برای این دسته مسائل بهتر از الگوریتم QEA است، بگونه‌ای که میانگین درصد خطا در الگوریتم IQEA، ۰/۶ درصد و در الگوریتم QEA، ۱/۳ درصد است. همچنین الگوریتم IQEA در تمامی مسائل به جز دو مسئله، به جواب بهتری دست یافته است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

افزایش روزافزون مصرف محصولات نفتی باعث ایجاد مشکلات بزرگی از جمله آلودگی هوا شده است. از آنجا که بخش حمل و نقل یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان سوخت و تولید گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود، مطالعه روی این مبحث به منظور کاهش مصرف سوخت و به دنبال آن کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، می‌تواند اثرات مثبتی روی محیط زیست داشته باشد و از لحاظ اقتصادی باعث کاهش هزینه‌های مسیر شود. از آنجا که مسئله مسیریابی موجودی یکی از مسائل اصلی در حوزه لجستیک است در این مقاله مدل جدیدی برای مسئله مسیریابی موجودی و در نظر گرفتن کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها در یک دوره برنامه‌ریزی متناهی پیشنهاد داده شد. نکته برجسته دیگر این است که در این مقاله وسایل حمل و نقل، ناهمگن در نظر گرفته شده است. این فرض مدل را به واقعیت نزدیک کرده و سودمندی به دنبال دارد. با توجه به NP-hard بودن مسئله الگوریتم تکاملی کوانتوم پیشنهاد شد. الگوریتم پیشنهادی در مسائل با ابعاد کوچک و بزرگ با الگوریتم پایه مقایسه شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد در ابعاد کوچک الگوریتم کوانتوم پیشنهادی خطای نسبتاً پایین دارد و در تمامی مسائل الگوریتم پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم کوانتوم پایه دارد.

با توجه به اهمیت موضوع بررسی شده در این مقاله ادامه تحقیقات در این زمینه ضروری است. بعنوان پیشنهادات آتی می توان محدودیت پنجره زمانی را اضافه کرد زیرا در بسیاری از مسائل محدودیت زمانی توزیع و تحویل وجود دارد. با توجه به این که در این مقاله سرعت در تمامی مسیرها ثابت در نظر گرفته شد، بهینه سازی سرعت در مسیرها می تواند موضوع مناسبی باشد. استفاده از سیاست های دیگر موجودی مانند سیاست پیشنه سطح موجودی نیاز به بررسی دارد. استفاده از دیگر مدل های مصرف سوخت و توسعه روش های حل را می توان بعنوان پیشنهاد بیان کرد. همچنین اضافه کردن اهداف دیگر به مدل مانند فسادپذیری که در حال حاضر تحقیقات زیادی را شامل می شود می تواند موضوع جذابی باشد.

## منابع

- Adulyasak, Y., Cordeau, J.-F., & Jans, R. (2013). Formulations and branch-and-cut algorithms for multivehicle production and inventory routing problems. *INFORMS Journal on Computing*, 26(1), 103-120 .
- Ahmadi Javid, A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582-597 .
- Bell, W. J., Dalberto, L. M., Fisher, M. L., Greenfield, A. J., Jaikumar, R., Kedia, P., . . . Prutzman, P. J. (1983). Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, 13(6), 4-23 .
- C Montgomery, D. (1997). *Montgomery Design and Analysis of Experiments* .
- Demir, E. (2012). *Models and algorithms for the pollution-routing problem and its variations*. University of Southampton .
- Golden, B., Assad, A., Levy, L., & Gheysens, F. (1984). The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 11(1), 49-66 .
- Halim, H., & Moin, N. (2014). Solving inventory routing problem with backordering using Artificial Bee Colony. Paper presented at the Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2014 IEEE International Conference on.
- Han, K.-H., & Kim, J.-H. (2002). Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(6), 580-593 .
- Han, K.-H., & Kim, J.-H. (2004). Quantum-inspired evolutionary algorithms with a new termination criterion, H & epsilon; gate, and two-phase scheme. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 8(2), 156-169 .
- Kaye, P., Laflamme, R., & Mosca, M. (2007). *An introduction to quantum computing*.
- Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2014). The fleet size and mix pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 239-254 .
- Kopfer, H., & Kopfer, H. (2013). Emissions Minimization Vehicle Routing Problem in Dependence of Different Vehicle Classes. In H.-J. Kreowski, B. Scholz-Reiter, & K.-D. Thoben (Eds.), *Dynamics in Logistics* (pp. 49-58): Springer Berlin Heidelberg.
- Kwon, Y.-J., Choi, Y.-J., & Lee, D.-H. (2013). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing considering carbon emission. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, 81-89. doi: <http://dx.doi.org/10.16/10/j.trd.04/2013.001>
- Lee, H. L., & Seungjin, W. (2008). The whose, where and how of inventory control design. *Supply Chain Management Review*, 12(8), 22-29 .
- Lerhlaly, S., Lebbar, M., Allaoui, H., Ouazar, D., & Afifi, S. (2016). An Integrated Inventory Location Routing Problem Considering CO2 Emissions .
- Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T., Chung, S., & Lam, H. (2014). Survey of green vehicle routing problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1118-1138 .
- Mirzapour Al-e-hashem, S., & Rekiq, Y. (2013). Multi-product multi-period Inventory Routing Problem with a transshipment option: A green approach. *International Journal of Production Economics* .
- Niakan, F., & Rahimi, M. (2015). A multi-objective healthcare inventory routing problem; a fuzzy possibilistic approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 80, 74-94 .
- Platel, M. D., Schliebs, S., & Kasabov, N. (2007). A versatile quantum-inspired evolutionary algorithm. Paper presented at the Evolutionary Computation, 2007. CEC 2007. IEEE Congress on.
- Sbihi, A., & Eglese, R. (2007). Combinatorial optimization and Green Logistics. *4OR*, 5(2), 99-116. doi: 1007/10/s10288-007-0047-3
- Shao, S., & Huang, G. Q. (2014). A SHIP Inventory Routing Problem with Heterogeneous Vehicles under Order-Up-To Level Policies. Paper presented at the IIE Annual Conference. Proceedings.
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. (2015). Modeling an Inventory Routing Problem for perishable products with environmental considerations and demand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 164, 118-133 .
- Soysal, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Haijema, R., & van der Vorst, J. G. (2016). Modeling a green inventory routing problem for perishable products with horizontal collaboration. *Computers & Operations Research*.