

مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع و تحویل‌های دوگانه

بهنام افشارپور^۱، مسعود ربانی^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه خاتم، تهران، ایران

۲. استاد دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

خلاصه

بارانداز متقاطع به‌عنوان یک روش مؤثر کنترل جریان موجودی که نقشی اساسی در مدیریت زنجیره‌تأمین دارد، مورد توجه قرار گرفته شده است. همچنین ترکیب بارانداز متقاطع با انواع مسئله‌های مسیریابی خودرو باعث افزایش جذابیت این تکنیک شده است. یکی از انواع مسئله‌ی مسیریابی خودرو که با بارانداز متقاطع در نظر گرفته شده است، مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز است. مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع در دنیای واقعی کاربرد فراوانی دارد؛ برای مثال، شرکتی که محصولات خودش را از طریق یک بارانداز متقاطع توزیع می‌کند و به‌دلایلی نیاز دارد که ناوگان خودروی خود را به یک شرکت لجستیکی برون‌سپاری کند، مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع برای این شرکت بسیار کارگشا خواهد بود. در این تحقیق مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع و تحویل‌های دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این مسئله ما یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط توسعه داده‌ایم که هزینه‌ی کل را کمینه می‌کند. ما یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله ارائه و سپس الگوریتم را در دو اندازه آزمایش و نتایج حاصل را با نتایج حل دقیق به‌دست آمده از نرم‌افزار گمز مقایسه کرده‌ایم. نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی جواب‌های مناسبی را با درصد خطای کم نسبت به حل دقیق در مدت زمان منطقی ارائه می‌دهد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۳/۸

پذیرش ۱۳۹۸/۷/۱۱

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز

بارانداز متقاطع

تحویل‌های دوگانه

۱. مقدمه

بارانداز متقاطع یک استراتژی ابتکاری برای کمینه کردن هزینه‌ی غیرضروری، به‌ویژه در بخش موجودی و سطح خدمت به مشتری است. بارانداز متقاطع اقدام به جریان کالاها به‌صورت مستقیم از باراندازهای دریافت به باراندازهای ارسال می‌کند؛ به‌طوری‌که کالاها در بارانداز متقاطع برای مدت زمان کوتاهی ذخیره می‌شوند، معمولاً کمتر از ۱۲ ساعت، یا این‌که به‌صورت مستقیم به مشتریان ارسال می‌شوند. در یک زنجیره‌تأمین، مسئله‌ی مسیریابی خودرو کلاسیک نقش مهمی در مدیریت توزیع و لجستیک به‌علاوه هزینه‌های مرتبط با خودروهای عملیاتی بازی می‌کند. اهداف مسئله‌ی مسیریابی خودرو کمینه کردن مسافت کل و تعداد خودروهایی که مسیرشان را از انبار مرکزی شروع و خاتمه می‌دهند هستند. مسئله‌ی مسیریابی

خودرو باز یک توسعه‌ای از مسئله‌ی مسیریابی خودرو است و یک شبکه باز است، به‌طوری‌که جریان از یک مشتری شروع می‌شود و به یک انبار خاتمه می‌یابد یا از یک انبار شروع می‌کند و به یک مشتری بدون برگشت به انبار خاتمه می‌یابد.

مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز در عمل مرتبط با زمانی است که ناوگان خودرو برون‌سپاری می‌شود. مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع یک شبکه‌ای است که در آن جریان از نقاط برداشت آغاز می‌شود و از طریق بارانداز متقاطع و بدون تشکیل هیچ حلقه‌ای به نقاط تحویل خاتمه می‌یابد. در تحقیق پیش‌رو مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع را با تحویل‌های دوگانه در نظر گرفته‌ایم. هدف از طرح این مسئله پاسخ به این پرسش است که اگر مسئله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع را با تحویل‌های دوگانه در نظر

* نویسنده مسئول: مسعود ربانی

تلفن: ۰۲۱۸۸۳۵۰۶۴۲ پست الکترونیکی: mrabani@ut.ac.ir

بگیریم آیا هزینه‌های حمل‌ونقل کاهش می‌یابند؟

۱-۱. پیشینه تحقیق

اهداف، پیدا کردن تعداد خودروهایی که در قرارداد با شرکت لجستیکی ذکر می‌شوند و مسیرهای متناظر با آن‌ها، تحت پایین‌ترین هزینه‌ی کل حمل‌ونقل ممکن هستند. آن‌ها مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع را به‌عنوان یک برنامه‌ریزی خطی صحیح مختلط مدل کردند و برای حل مسأله‌ی یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید که چندین ساختار همسایگی را برای بهبود عملکرد حل مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع ترکیب می‌کند، ارائه دادند.

[۲] یک مدل ریاضی برای تعیین مسیریابی و زمان‌بندی خودرو با بارانداز متقاطع برای کمینه کردن هزینه‌ی کل ارائه دادند. این تحقیق اولین تحقیقی هست که در زمینه مسأله‌ی مسیریابی خودرو و بارانداز متقاطع انجام شده است. [۳] مسأله‌ی مسیریابی خودرو با بارانداز متقاطع را در نظر گرفتند. مسأله آن‌ها شبیه مسأله [۲] است. هر چند محدودیت رسیدن هم‌زمان خودروها در قسمت برداشت برای همه‌ی خودروها در این مسأله وجود ندارد و هر برداشت و تحویل دارای پنجره‌های زمانی از قبل تعیین شده است. آن‌ها همچنین برای این مسأله یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع را توسعه دادند. [۴] یک الگوریتم جست‌وجوی ممنوع جدید که یک روش کاملاً متفاوتی از الگوریتم جست‌وجوی ممنوع [۲] بود را ارائه دادند. [۵] یک مسأله‌ی مدیریت توزیع را معرفی کردند که آن‌را -مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز- نامیدند. ویژگی مهم این مسأله جدید که آن‌را از مسأله‌ی مسیریابی خودرو متمایز می‌کند، این بود که خودروها نیاز به برگشتن به انبار نداشتند یا اگر نیاز به این بود که آن‌ها این کار را انجام دهند، باز همان مشتری‌ها را در مسیر عکس ملاقات می‌کردند. مسأله شامل یافتن مجموعه‌ای از مسیرهاست که سه معیار زیر را باید تأمین کند: (۱) هر مسیر از یک انبار شروع و به یکی از مشتری‌ها ختم می‌شود. (۲) هر مشتری یک بار و فقط یک بار دقیقاً به‌وسیله‌ی یک خودرو ملاقات می‌شود و کل تقاضایش باید تأمین شود. (۳) مشتری‌هایی که در هر مسیر ملاقات می‌شوند، جمع تقاضایشان باید کمتر یا مساوی ظرفیت خودرویی باشند که به آن مسیر خدمت می‌دهند. اهداف این مسأله، مینیمم کردن کل سفر و هزینه‌ی عملیاتی خودروها هستند. آن‌ها همچنین بیان کردند که مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز که خودروها به انبار برنمی‌گردند به‌وسیله‌ی شرکت‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مالکیت ناوگان خودرو خود را ندارند یا ناوگان خودرویشان برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریانشان نامناسب یا ناکافی است؛ بنابراین این شرکت‌ها قسمتی یا تمام توزیع محصولشان را به حمل‌کننده‌های خارجی برون‌سپاری می‌کنند. راه‌حل این مسأله برای این شرکت‌ها، کمینه‌ی تعداد خودروهایی که برای خدمت‌رسانی به مشتری‌ها لازم است و همچنین مجموعه‌ای از مسیرها که هزینه‌ی سفر را کمینه خواهند کرد، مهیا می‌کند. [۶] مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه یک محصول و یک بارانداز متقاطع و خودروهای یکسان در نظر گرفته شده است. فرایند مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع از نقاطی که باید عملیات برداشت در آن‌ها انجام شود، در زمان‌های مختلف آغاز می‌شود. خودروها در مسیرهای شبکه، طوری زمان‌بندی شده‌اند که به‌طور هم‌زمان (در یک زمان مشابه) به بارانداز متقاطع می‌رسند. در عملیات تحویل، به همه‌ی مشتری‌ها باید دقیقاً یک بار خدمت‌رسانی شود و هر تحویل باید با یک زمان از پیش تعیین شده به پایان برسد.

۲. مدل‌سازی مسأله

این مسأله دارای سه سطح است که شامل تأمین‌کنندگان، بارانداز متقاطع و مشتریان می‌شود. البته در مدل ریاضی آن، یک بارانداز متقاطع مجازی نیز در نظر گرفته شده است که نشان‌دهنده‌ی شرکت لجستیکی مورد قرارداد است. مدل مورد بررسی از سه فعالیت تشکیل می‌شود: فعالیت برداشت کالاها، عملیات بارانداز متقاطع و فعالیت تحویل کالاها. این مسأله بیشتر در زنجیره‌های تأمین خرده‌فروشی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۲. فرضیات مسأله

- همه‌ی خودروها از شروع افق زمانی در دسترس هستند.
- یک ناوگان خودرو مشابه وظایف برداشت و تحویل کالاهای مورد نیاز را اجرا می‌کنند.
- حالت دوگانه در نودهای برداشت اجازه داده نمی‌شود، ولی در نودهای تحویل اجازه داده می‌شود.
- خودروها می‌توانند به بیش از یک تأمین‌کننده یا مشتری خدمت‌رسانی کنند.
- کل مقادیر کالاها در یک خودرو نباید از ظرفیت آن بیشتر شوند.
- خودروهای ورودی به بارانداز متقاطع مسیر خود را از تأمین‌کنندگان آغاز می‌کنند، کالاها را برداشته و به بارانداز متقاطع وارد شده و آن‌ها را در بارانداز متقاطع تخلیه می‌کنند و بعد از آن این خودروها یا برای استفاده در قسمت تحویل استفاده می‌شوند یا این که به شرکت لجستیکی برمی‌گردند.
- خودروهای خروجی از بارانداز متقاطع درحالی که ظرفیت آن‌ها کاملاً پر شده و کالاها در آن‌ها بارگیری شده‌اند به سمت مشتریان حرکت می‌کنند و وقتی به آخرین مشتری خدمت‌رسانی کردند دیگر به بارانداز متقاطع برنمی‌گردند و از آنجا به شرکت لجستیکی می‌روند.
- همه‌ی فرایندها باید در افق برنامه‌ریزی کامل شوند.
- خودروها در قسمت برداشت کالاها بعد از انجام عملیات به‌طور هم‌زمان به بارانداز متقاطع می‌رسند.

۲-۲. مجموعه‌ها و پارامترها

$P = \{1, 2, 3, \dots, p\}$ مجموعه گره‌های برداشت: P

$D = \{1, 2, 3, \dots, d\}$ مجموعه گره‌های تحویل: D

تنها یک وسیله نقلیه می‌تواند از هر گره برداشت منتقل شود و از آن خارج شود.

$$\sum_{i \in \{0\} \cup P, i \neq j} x_{ilk} - \sum_{j \in \{0\} \cup P, j \neq l} x_{ljk} = 0; \forall l \in P, k \in M \quad (4)$$

محدودیت (۴) حرکت متوالی وسایل نقلیه را تضمین می‌کند.

$$\sum_{j \in P} x_{|0|jk} \leq 1; \quad \forall k \in M, \quad (5)$$

$$\sum_{i \in P} x_{i0k} \leq 1; \quad \forall k \in M, \quad (6)$$

وسایل نقلیه بارانداز متقاطع مجازی را ترک می‌کنند که در محدودیت (۵) بیان شده است و لازم است که بلافاصله پس از آخرین گره برداشت، بارانداز متقاطع را ملاقات کنند در محدودیت (۶) بیان شده است.

$$y_j \geq y_i + P_j - Q + (Q \cdot (x_{ijk} + x_{jik})) - ((P_j + P_i) \cdot x_{jik}) \quad \forall k \in M, i \in P, j \in P, i \neq j \quad (7)$$

$$y_j \leq x_{|0|jk} \cdot P_j + (1 - x_{|0|jk}) \cdot Q \quad \forall j \in P, k \in M \quad (8)$$

محدودیت‌های (۷) و (۸) کل مقدار محصولاتی که توسط وسیله نقلیه جمع‌آوری شده‌اند را وقتی که وسیله نقلیه یک گره برداشت را ترک می‌کند، محاسبه می‌کنند.

$$P_i \leq y_i \leq Q; \quad \forall i \in P \quad (9)$$

محدودیت (۹) تضمین می‌کند که کل مقدار محصولات برداشت شده توسط وسیله نقلیه از ظرفیت وسیله نقلیه تجاوز نمی‌کند.

$$\sum_{i \in P} \sum_{k \in M} x_{i0k} \leq v \quad (10)$$

(۱۰) تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در فرایند برداشت را محاسبه می‌کند.

Delivery process

$$\sum_{i \in \{0\} \cup D, i \neq j} \sum_{k \in M} x'_{ijk} \geq 1; \quad \forall j \in D, \quad (11)$$

$$\sum_{j \in \{0\} \cup D, j \neq i} \sum_{k \in M} x'_{ijk} \geq 1; \quad \forall i \in D, \quad (12)$$

در فرایند تحویل ما محدودیت‌های مشابهی را استفاده می‌کنیم. محدودیت‌های (۱۱) و (۱۲) گنجانده شده‌اند تا اطمینان حاصل شود که حداقل یک وسیله نقلیه از هر گره تحویل می‌رسد و از آن عبور می‌کند و نوآوری مدل این تحقیق در همین دو محدودیت است.

$$\sum_{i \in \{0\} \cup D, i \neq l} x'_{ilk} - \sum_{j \in \{0\} \cup D, j \neq l} x'_{ljk} = 0 \quad \forall l \in D, k \in M, \quad (13)$$

محدودیت (۱۳) حرکت متوالی وسایل نقلیه را تأیید می‌کند.

$$\sum_{i \in D} x'_{i|0|k} \leq 1; \quad \forall k \in M, \quad (14)$$

O : بارانداز متقاطع

$|0|$: بارانداز متقاطع مجازی

M : مجموعه وسایل نقلیه در دسترس $M = \{1, 2, 3, \dots, m\}$

Q : ظرفیت وسیله نقلیه

H : هزینه کرایه وسیله نقلیه

P_i : تعداد محصولات مورد نیاز در گره برداشت i

D_j : تعداد محصولات مورد نیاز در گره تحویل j

x_{ij} : هزینه حمل‌ونقل از گره i به گره j در فرایند برداشت

x'_{ij} : هزینه حمل‌ونقل از گره i به گره j در فرایند تحویل

t_{ij} : زمان حمل‌ونقل مورد نیاز برای حرکت از گره i به گره j در فرایند برداشت

t'_{ij} : زمان حمل‌ونقل مورد نیاز برای حرکت از گره i به گره j در فرایند تحویل

T_{cd} : زمان فعالیت بارانداز متقاطع

T_{max} : افق زمانی

۳-۲. متغیرهای تصمیم‌گیری

x_{ijk} : اگر وسیله k از گره i به گره j در فرایند برداشت حرکت کند، در غیر این صورت ۰

x'_{ijk} : اگر وسیله k از گره i به گره j در فرایند تحویل حرکت کند، در غیر این صورت ۰

y_i : تعداد کل محصولات جمع‌آوری شده پس از ترک گره برداشت i

y'_i : تعداد کل محصولات تحویل داده شده پس از ترک گره تحویل i

T_{pickup} : آخرین زمان ورود در بارانداز متقاطع

AT^k : زمان ورود وسیله k در بارانداز متقاطع

v : تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز در فرایند برداشت

v' : تعداد وسیله نقلیه مورد نیاز در فرایند تحویل

V : تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده

۴-۲. مدل ریاضی

$$\min \left(\sum_{i \in \{0\} \cup P} \sum_{j \in \{0\} \cup P} \sum_{k \in M} c_{ij} \cdot x_{ijk} + \sum_{i \in \{0\} \cup D} \sum_{j \in \{0\} \cup D} \sum_{k \in M} c'_{ij} \cdot x'_{ijk} + V \cdot H \right) \quad (1)$$

تابع هدف، هزینه کل حمل‌ونقل را که در فرایندهای برداشت و تحویل تحمیل شده است، محاسبه می‌کند. یک هزینه کرایه، براساس تعداد خودروهای مورد استفاده، اضافه می‌شود. محدودیت‌ها برای فرایند برداشت و تحویل به شرح زیر ارائه می‌شود:

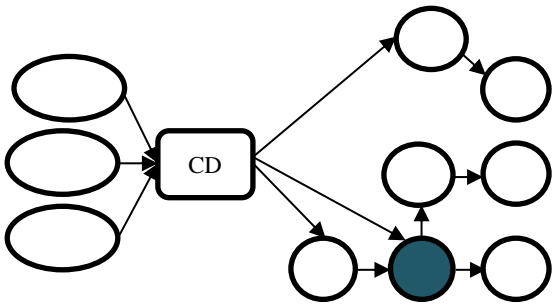
Pickup process

$$\sum_{i \in \{0\} \cup P} \sum_{j \neq i, k \in M} x_{ijk} = 1; \quad \forall j \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \{0\} \cup P} \sum_{j \neq i, k \in M} x_{ijk} = 1; \quad \forall i \in P \quad (3)$$

در فرایند برداشت، محدودیت‌های (۲) و (۳) بیان می‌کنند که

شکل (۱) نمونه‌ای از مسأله‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد، به طوری که خودروهای شرکت لجستیکی کالاها را از تأمین‌کنندگان جمع‌آوری کرده (هر خودرو برداشت کالاهای مورد نیاز را از یک تأمین‌کننده مطابق برنامه‌ی مسیریابی و در زمان از قبل معین شده‌اش شروع می‌کند و سپس طبق برنامه به بقیه‌ی تأمین‌کنندگان در مسیرش خدمت‌رسانی می‌کند) سپس به سمت بارانداز متقاطع حرکت می‌کنند و به صورت هم‌زمان به بارانداز متقاطع می‌رسند (هم‌چنین برنامه مسیریابی به صورت هم‌زمان ظرفیت خودرو، تأمین‌های کارخانه‌ها، تقاضاهای مشتری‌ها و افق زمانی را در نظر می‌گیرد) و کالاها را در آنجا تخلیه کرده و بعد از انجام عملیات بارانداز متقاطع کالاها دوباره در خودروها بارگیری می‌شوند و برای تحویل به سمت مشتریان حرکت می‌کنند و وقتی تحویل آخرین مشتری انجام شد خودروها دیگر به بارانداز متقاطع بر نمی‌گردند و به شرکت لجستیکی رجوع می‌کنند. خودروهایی که عملیات جمع‌آوری کالاها را انجام می‌دهند بعد از تخلیه کالاها در بارانداز متقاطع ممکن است در عملیات تحویل مورد استفاده قرار بگیرند و یا ممکن است مورد استفاده قرار نگرفته و به شرکت لجستیکی برگردند. در این تحقیق علاوه بر این که مسیریابی خودرو باز همراه با بارانداز متقاطع مورد توجه قرار گرفته تحویل‌های دوگانه نیز با آن تلفیق شده است؛ همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود مشتری‌ای که با رنگ تیره مشخص شده است درصدی از سفارش خود را از یک خودرو و درصد باقی‌مانده را از خودروی دیگری دریافت می‌کند؛ بنابراین در اینجا دیده می‌شود که تقاضای یک مشتری توسط دو خودرو تأمین می‌شود.



شکل (۱): مسأله‌ی مسیریابی خودروی باز با بارانداز متقاطع و تحویل‌های دوگانه

۲-۵. الگوریتم پیشنهادی

مسأله‌ی مورد تحقیق، جزء مسائل پیچیده است. از آنجا که مسأله‌ی مورد تحقیق حاضر شامل مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز است و یک زیرمسأله از آن است و مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز جزء مسائل سخت است، بنابراین مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع نیز یک مسأله‌ی سخت محسوب می‌شود [۶]. برای حل مسأله در ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده می‌شود. اگرچه الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری جواب بهینه‌ی

$$\sum_{j \in D} x'_{ojk} \leq 1; \quad \forall k \in M, \quad (15)$$

برگشت وسایل نقلیه به بارانداز متقاطع مجازی در محدودیت (۱۴) بیان شده است و لازم است که از بارانداز متقاطع شروع شود که در محدودیت (۱۵) بیان شده است.

$$y'_j \geq y'_i + D_j - Q + (Q \cdot (x'_{ijk} + x'_{jik})) - ((D_j + D_i) \cdot x'_{jik}) \quad (16)$$

$$\forall k \in M, i \in D, j \in D, i \neq j,$$

$$y'_j \leq x'_{ojk} \cdot D_j + (1 - x'_{ojk}) \cdot Q \quad \forall j \in D, k \in M \quad (17)$$

محدودیت‌های (۱۶) و (۱۷) کل مقدار محصولاتی که توسط یک وسیله نقلیه تحویل داده می‌شوند وقتی که وسیله نقلیه یک گره تحویل را ترک می‌کند، محاسبه می‌کنند.

$$D_i \leq y'_i \leq Q; \quad \forall i \in D \quad (18)$$

محدودیت (۱۸) تضمین می‌کند که کل مقدار محصولات حمل شده توسط وسیله نقلیه از ظرفیت خودرو تجاوز نمی‌کند.

$$\sum_{j \in D} \sum_{k \in M} x'_{ojk} \leq v' \quad (19)$$

تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده در فرایند تحویل با محدودیت (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$V = \max(v, v') \quad (20)$$

محدودیت (۲۰) تعداد کل وسایل نقلیه را که برای تکمیل فرایندهای برداشت و تحویل کرایه می‌شوند، محاسبه می‌کند.

$$AT^k \geq \sum_{i \in \{0\} \cup P} \sum_{j \in \{0\} \cup P} t_{ij} \cdot x_{ijk} \quad \forall k \in M, i \neq j, \quad (21)$$

$$AT^k = AT^{k'}; \quad \forall k, k' \in M, k \neq k' \quad (22)$$

علاوه بر محدودیت‌های برداشت و تحویل محدودیت‌های اضافی برای ایجاد یک زمان‌بندی برای هر کامیون استفاده می‌شود. این اطلاعات برای کاربر به منظور پردازش و زمان‌بندی کامیون‌ها در بارانداز متقاطع بسیار لازم است. زمان ورود کامیون‌ها در بارانداز متقاطع باید در محدودیت‌ها مطرح شود به این دلیل که کامیون‌ها به طور هم‌زمان به بارانداز متقاطع می‌رسند. علاوه بر این، زمان حمل‌ونقل باید کمتر از افق برنامه‌ریزی باشد. محدودیت (۲۱) زمان جمع‌آوری محصول را در فرایند برداشت بررسی می‌کند. محدودیت (۲۲) تضمین می‌کند که ناوگان وسایل نقلیه هم‌زمان به بارانداز متقاطع می‌رسند.

$$T_{pickup} \geq AT^k; \quad \forall k \in M \quad (23)$$

$$T_{pickup} + T_{cd} + \sum_{i \in \{0\} \cup D} \sum_{j \in \{0\} \cup D} t'_{ij} \cdot x'_{ijk} \leq T_{max}; \quad \forall k \in M \quad (24)$$

محدودیت (۲۳) زمان صرف شده در فرایند برداشت را تعیین می‌کند. محدودیت (۲۴) تضمین می‌کند که کل زمان حمل‌ونقل و زمان پردازش از افق برنامه‌ریزی تجاوز نمی‌کند.

۳. حل مسأله‌های نمونه و ارزیابی عملکرد الگوریتم

پیشنهادی

در این قسمت مسائل نمونه با مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی حل می‌شوند و سپس نتایج حاصل از این دو محاسبه با هم مقایسه می‌شوند.

۳-۱. مسأله‌های نمونه

مجموعه داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از مقالات [۲،۴] اقتباس شده‌اند. برای آزمون رویکرد پیشنهادی برای مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع، روش پیشنهادی را در متلب ۲۰۱۸ اجرا کردیم. روش بر روی رایانه‌ای با یک پردازنده‌ی ۲.۱ گیگاهرتزی و ۸ گیگابایت رم با استفاده از سیستم عامل ویندوز ۱۰ اجرا شد.

جدول (۲): مشخصات مثال‌ها

P+d	مسأله‌ی ۱ (۳۰ گره)	مسأله‌ی ۲ (۵۰ گره)
m	۲۰	۳۰
T _{max}	۱۴۴۰	۱۴۴۰
Q	۱۵۰	۱۵۰
H	۵۰	۵۰
C _{ij}	یکنواخت (۲۰ و ۲۰۰)	توزیع یکنواخت (۲۰ و ۲۰۰)
t _{ij}	یکنواخت (۴۸ و ۵۶۰)	توزیع یکنواخت (۴۸ و ۵۶۰)
P _i , D _i	یکنواخت (۵ و ۲۰)	توزیع یکنواخت (۵ و ۳۰)
تأمین‌کنندگان	۷	۱۲
مشتریان	۲۳	۳۸

P: تعداد تأمین‌کنندگان

D: تعداد مشتریان

m: تعداد خودروها

۳-۲. ارزیابی بهینگی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت نتایج حاصل از الگوریتم پیشنهادی و نتایج بهینه به‌دست آمده از حل مدل ریاضی با یکدیگر مقایسه و بررسی می‌شوند. حل و مقایسه‌ها طبق جدول (۳) ارائه شده‌اند.

در جدول (۳) ستون اول ردیف نمونه‌های حل شده برای دو بعد مسأله (۳۰ گره و ۵۰ گره) را نشان می‌دهد. ستون بعدی نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز است. ستون بعد از آن نشان‌دهنده‌ی هزینه‌های حاصل از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی برای دو بعد مسأله است و ستون آخر درصد خطای پاسخ‌های الگوریتم پیشنهادی نسبت به حل دقیق است.

به‌طور متوسط درصد خطای الگوریتم پیشنهادی نسبت به حل دقیق در ۳۰ گره برابر ۲/۴۵ و ۵۰ گره برابر ۱/۴۹ است. جدول (۴) نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی به‌وضوح راه‌حل‌های مناسب را

دقیق را نمی‌دهند، ولی جواب‌های نزدیک به بهینه می‌دهند که در دنیای واقعی کارا و قابل قبول هستند.

۲-۶. معرفی الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را کایرکپاتریک و همکارانش در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ م. معرفی کردند که براساس فرایند سرمایه‌ی مواد در علم ترمودینامیک آماری مطرح شد. در این علم ارتباط بین ساختار اتمی، آنتروپی و دما در طول فرایند سرمایه‌ی یک ماده مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصه‌ی اصلی این الگوریتم این است که علاوه‌بر این‌که تغییرات مثبت را همواره می‌پذیرد، تغییراتی که باعث بدتر شدن نتیجه می‌شوند نیز با یک احتمالی پذیرفته می‌شوند. این احتمال با کمتر شدن دما کاهش می‌یابد؛ یعنی هرچه پیش می‌رویم احتمال پذیرش تغییرات کمتر و کمتر می‌شود، چراکه احتمال پذیرش از رابطه‌ی (۲۵) پیروی می‌کند و در این رابطه با توجه به کم شدن دمای مسأله احتمال پذیرش هم کم می‌شود:

$$\exp(-\Delta z/T) \quad (25)$$

که در آن Δz مقدار افزایش تابع هدف است. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک الگوریتم جست‌وجوی محلی است و الگوریتمی فراابتکاری است که از یک سو دارای قابلیت کافی برای فرار از نقاط بهینه‌ی موضعی است و از جهت دیگر الگوریتمی است که اجرای آن نسبت به سایر الگوریتم‌ها ساده‌تر است. این الگوریتم دارای قابلیت خوبی برای حل مسائل بهینه‌سازی گسسته از قبیل مسائل مسیریابی خودرو است. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با یک جواب اولیه آغاز کرده و بعد برای هر جواب یک همسایگی تعریف می‌شود که این پاسخ همسایگی یا به‌صورت تصادفی یا بر قانون خاص تعیین می‌شود. در این زمان دما از حالت فعلی با همان پاسخ فعلی به سوی دما یا پاسخ همسایگی برای ایجاد شبکه‌ی منظم‌تر حرکت می‌کند. اگر p احتمال پذیرفته شدن پاسخ همسایگی و W' به‌عنوان جایگزین پاسخ فعلی W تعریف شود، آنگاه رابطه‌ی (۲۶) روش محاسبه این احتمال است:

$$p = \begin{cases} \exp\left[\frac{-[f(W') - f(W)]}{T}\right] & \text{if } f(W') < f(W) \\ 1 & \text{if } f(W') > f(W) \end{cases} \quad (26)$$

در رابطه‌ی (۲۶)، r یک متغیر تصادفی در بازه $[0, 1]$ است که اگر مقدار به‌دست آمده از مقدار r بیشتر باشد، پاسخ همسایگی پذیرفته می‌شود [۱].

جدول (۱): مقادیر پارامترهای الگوریتم پیشنهادی به روش

پارامترها	مقادیر نهایی
تعداد تکرارها	۱۵۰
دمای اولیه	۵۰
دمای نهایی	۰/۰۵
نرخ سرمایه‌ی	۰/۹۹

در یک زمان محاسباتی معقول برای همه‌ی موارد در دو مجموعه مسأله فراهم می‌کند.

الگوریتم پیشنهادی به‌طور متوسط نیاز به ۵/۶۹ و ۷/۰۲ ثانیه برای پیدا کردن راه‌حل‌های بهینه برای نمونه مسائل در مجموعه‌های ۳۰ گره و ۵۰ گره دارد. حل دقیق به‌طور متوسط به‌ترتیب به

۷۶۱/۲۰ و ۱۰۰۸/۵۰ ثانیه برای مسأله‌های ۳۰ گره و ۵۰ گره نیاز به زمان دارد. با توجه به نتایج ثبت شده در جدول (۳) و جدول (۴) می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی برای حل مسأله‌ی مسیریابی خودرو باز با بارانداز متقاطع و تحویل‌های دوگانه می‌تواند مؤثر و کارآمد باشد.

جدول (۳): مقایسه‌ی نتایج حل الگوریتم پیشنهادی

ردیف	حل‌کننده Cplex		الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)		درصد خطا
	هزینه ۳۰ گره	هزینه ۵۰ گره	هزینه ۳۰ گره	هزینه ۵۰ گره	
۱	۱۲۵۱	۴۰۶۷	۱۲۵۱	۴۳۰۶	۵/۸۷
۲	۱۷۱۱	۳۳۸۸	۱۷۳۸	۳۴۵۰	۱/۸۲
۳	۱۴۴۹	۳۵۹۹	۱۴۳۴	۳۶۱۷	۰/۵۰
۴	۱۴۵۸	۳۷۶۱	۱۴۷۷	۳۷۸۸	۰/۷۱
۵	۱۶۴۴	۲۹۶۴	۱۶۷۴	۳۰۰۴	۱/۳۴
۶	۱۸۶۵	۲۴۶۳	۱۹۴۶	۲۵۰۴	۱/۶۶
۷	۱۳۴۳	۲۹۸۵	۱۴۴۰	۲۹۸۵	۰
۸	۱۶۹۵	۴۴۰۹	۱۷۵۲	۴۴۳۶	۰/۶۱
۹	۱۶۰۶	۳۸۳۱	۱۶۵۱	۳۸۷۹	۱/۲۵
۱۰	۱۵۳۸	۲۹۴۹	۱۵۸۶	۲۹۸۵	۱/۲۲
میانگین	۱۵۵۶	۳۴۴۱	۱۵۹۴	۳۴۹۵	۱/۴۹

جدول (۴): زمان اجرای الگوریتم پیشنهادی و حل دقیق به ثانیه

ردیف	حل‌کننده Cplex		الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)	
	زمان ۳۰ گره	زمان ۵۰ گره	زمان ۳۰ گره	زمان ۵۰ گره
۱	۵۴	۱۰۱۰	۶/۴۸	۷/۰۸
۲	۱۰۰۶	۱۰۰۹	۵/۳۸	۷/۶۵
۳	۵۲۲	۱۰۰۹	۶/۳۲	۷/۲۱
۴	۳۶۹	۱۰۰۸	۵/۳۷	۷/۳۲
۵	۱۰۰۶	۱۰۰۸	۵/۲۰	۶/۷۸
۶	۱۰۰۸	۱۰۰۸	۵/۵۱	۷/۰۹
۷	۱۰۰۷	۱۰۰۸	۵/۸۸	۷/۱۲
۸	۱۰۰۶	۱۰۰۹	۶/۰۷	۶/۵۷
۹	۱۰۰۶	۱۰۰۸	۵/۲۷	۶/۷۱
۱۰	۶۲۸	۱۰۰۸	۵/۱۵	۶/۷۰
میانگین زمان	۷۶۱/۲۰	۱۰۰۸/۵۰	۵/۶۹	۷/۰۲

هدف را کاهش دهد.

فاکتور دوم: دومین فاکتور مورد بررسی ظرفیت خودرو است. در جدول (۶) محاسبات حالات مختلف آن آمده است با توجه به جدول (۶) هر چه ظرفیت خودروها بیشتر می‌شوند تابع هدف بهبود می‌یابد و یا به عبارت دیگر، هزینه کاهش می‌یابد.

جدول (۵): تحلیل حساسیت فاکتور اول

فاکتور اول	مقدار تابع هدف		درصد میزان بهبود
	۳۰ گره	۵۰ گره	
	۳۰ گره	۵۰ گره	

۳-۳. تحلیل حساسیت

فاکتور اول: در این فاکتور ما تابع هدف را درحالی‌که مدل با حالت تحویل‌های دوگانه در نظر گرفته شده و حالتی که تحویل‌های دوگانه در نظر گرفته نشده مقایسه و درصد بهبود آن را محاسبه می‌کنیم.

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که در مسأله با ۳۰ گره بدون داشتن حالت تحویل‌های دوگانه تابع هدف ۷/۴۹ درصد بدتر می‌شود و در ۵۰ گره این درصد به میزان ۳۷/۲۶ می‌رسد و این نشان می‌دهد که اضافه شدن حالت تحویل‌های دوگانه تا چه اندازه می‌تواند تابع

یا فقط برای یکی از این‌ها پنجره‌های زمانی در نظر گرفت یعنی به هر مشتری باید در یک بازه‌ی زمانی معین خدمت‌رسانی شود.

۰	۰	۴۴۹۸	۱۶۸۲	با تحویل‌های دوگانه
-۳۷/۲۶	-۷/۴۹	۶۱۷۴	۱۸۰۸	بدون تحویل‌های دوگانه

جدول (۶): تحلیل حساسیت فاکتور دوم

فاکتور دوم ظرفیت خودرو	مقدار تابع هدف		درصد میزان بهبود	
	۳۰ گره	۵۰ گره	۳۰ گره	۵۰ گره
۱۵۰	۱۶۸۲	۴۴۷۱	۰	۰
۱۷۰	۱۶۳۸	۳۹۰۳	۲/۶۱	۱۲/۷۰
۱۹۰	۱۵۸۴	۳۲۴۲	۵/۸۲	۲۷/۴۸

مراجع

- [۱] رضا توکلی مقدم، نرگس نوروزی، سید مصطفی کلامی، علیرضا سلامت بخش (۱۳۹۲). الگوریتم‌های فراابتکاری، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ویرایش اول.
- [2] Lee, Y.H., J.W. Jung, and K.M. Lee, *Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain*. Computers & Industrial Engineering, 2006. 51(2): p. 247-256.
- [3] Wen, M., et al., *Vehicle routing with cross-docking*. Journal of the Operational Research Society, 2009. 60(12): p. 1708-1718.
- [4] Liao, C.-J., Y. Lin, and S.C. Shih, *Vehicle routing with cross-docking in the supply chain*. Expert Systems with Applications, 2010. 37(10): p. 6868-6873.
- [5] Sariklis, D. and S. Powell, *A heuristic method for the open vehicle routing problem*. Journal of the Operational Research Society, 2000: p. 564-573.
- [6] Yu, V.F., P. Jewpanya, and A.A.N.P. Redi, *Open vehicle routing problem with cross-docking*. Computers & Industrial Engineering, 2016.94: p. 6-17.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مسأله‌ی مسیریابی خودرو با بارانداز متقاطع و تحویل‌های دوگانه پرداخته شده است. بر همین اساس یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط توسعه داده شد. مدل توسط نرم‌افزار گمز در دو بُعد ۳۰ گره و ۵۰ گره حل شد و سپس مسأله با یک الگوریتم فراابتکاری پیشنهادی (شبیه‌سازی تبرید) حل شد و نتایج آن با نتایج گمز مقایسه شد. مقایسه‌ی نتایج حاصل نشان داد که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید پیشنهادی می‌تواند در مدت‌زمان محاسباتی مناسب جواب‌های خوبی را با درصد خطای کمی ارائه دهد. به منظور تحقیقات آتی می‌توان خودروها را با ظرفیت‌های غیریکسان در نظر گرفت. هم‌چنین می‌توان برای عملیات‌های برداشت و تحویل



DOI: 10.22084/ier.2020.19256.1855

Open Vehicle Routing Problem with Cross-Docking and Split Deliveries

B. Afsharpour¹, M. Rabbani^{2*}

¹ M.A. Industrial Engineering graduate, Khatam University, Tehran, Iran

² Professor, School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 May 2019

Accepted 3 October 2019

Keywords:

Cross-docking

Open vehicle routing problem

Split deliveries

ABSTRACT

Cross-Dock is considered as an effective way of controlling the flow of inventory, which plays an essential role in supply chain management. Also, cross-docking with a variety of vehicle routing problem has increased the attractiveness of this technique. One of the types of vehicle routing problem that is considered with cross-dock is the open vehicle routing problem. The problem of open vehicle problem with a cross-dock in the real world has lots uses. For example, a company that distributes its products through a cross-dock and for some reason needs to outsource its fleet to a logistics company, the problem of open vehicle routing problem with cross-dock for this company will be very attractive. In this research, The open vehicle routing problem with cross-docking and split deliveries has been studied. For this, we have developed a mixed integer linear programming model that minimizes the total cost. We presented a simulated annealing algorithm to solve the problem. Then we tested it in two sizes and compared the obtained results with the precise obtained results from the GAMS software (Cplex solver). The computational results show that the proposed algorithm offers appropriate answers with a low error rate relative to the exact solution with a reasonable time period.

* Corresponding author. M. Rabbani

Tel.:021-88350642; E-mail address: mrabbani@ut.ac.ir