

مسیریابی و زمان بندی حمل پول نقد در شبکه‌ی چندگانه با در نظرگیری

محدودیت ریسک و زمان سفر تحت شرایط عدم قطعیت ترافیکی

(مطالعه موردی: شهر اصفهان)

حمید تیکنی (مسئول مکاتبات)، دکتری مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

مصطفی ستاک، دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

محمد سینا اسدیان، کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی، قزوین، ایران

E-mail: hamid.tikani@email.kntu.ac.ir

چکیده

مسئله‌ی مسیریابی حمل پول، اسناد بانکی و سایر اقلام ارزشمند به‌عنوان یکی از شاخه‌های نوین در حوزه‌ی *Cash-In-Transit (CIT)* شناخته می‌شود. با توجه به ارزشمندی این قبیل کالاها، دخیل کردن استراتژی‌های امنیتی در فرآیند حمل و نقل امری اساسی است. در این رابطه، این مقاله مدل دومرحله‌ای حمل و نقل پول نقد با در نظر گرفتن حجم ترافیک احتمالی در ساعات مختلف در شبکه‌ی چندگانه‌ی شهری ارائه می‌دهد. مدل ارائه‌شده نه تنها منتج به ارائه‌ی رویکرد جدیدی در محاسبه‌ی ریسک سفر می‌شود بلکه به کارگیری شبکه‌ی چندگانه با یال‌های چند مشخصه (شامل زمان و ریسک سفر) موجب افزایش کیفیت پاسخ‌های به دست آمده شده است. لحاظ کردن محدودیت‌های مختلف مانند حداکثر زمان مجاز سفر، ریسک سفر و وجود یال‌های چند مشخصه با شرایط ترافیکی احتمالی، حل چنین مسئله‌ای را با پیچیدگی فراوان مواجه می‌سازد. بدین منظور، یک الگوریتم بهینه سازی ترکیبی دومرحله‌ای برای حل مسئله ارائه گردید که توانایی حل مسئله در ابعاد مختلف را به خوبی خواهد داشت. در نهایت مدل مطرح شده بر روی شبکه‌ی شهری اصفهان پیاده‌سازی و نتایج به دست آمده گزارش گردیده است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی، حمل و نقل پول، شبکه‌ی چندگانه، ترافیک وابسته به زمان، ریسک سفر

۱. مقدمه و ادبیات پژوهش

مسئله‌ی مسیریابی CIT به‌عنوان یکی از شاخه‌های جدید در حوزه‌ی CIT شناخته می‌شود. این مسئله مفاهیم ایمنی را در طراحی مسیرهای حمل‌ونقل لحاظ می‌کند. تنها تعداد محدودی از مطالعات در ادبیات موضوع بر روی این موضوع تمرکز کردند. کالو و کاردون^۱ یک مدل تک هدفه برای مسئله فروشنده دوره-گرد چند دوره‌ای شبانه با ملاحظات امنیت سفر ارائه کرد. نگوئو^۲ و همکاران یک مدل VRP دوره‌ای برای تعیین مسیرهای غیرقابل پیش‌بینی ارائه داد.

یان^۳ و همکاران یک مدل چند محصولی برای حمل‌ونقل کالاهای با ارزش با تأکید بر عدم یکنواخت بودن زمان مطرح کردند. در ادامه، تالاریکو^۴ و همکاران مدل ریاضی برای مسیریابی CIT با پنجره‌ی زمانی سخت ارائه دادند. میچالت^۵ و همکاران بر روی مسئله‌ی VRP چند دوره‌ای با محدودیت گسترش زمان رسیدن به نقاط تقاضا توسعه دادند. هر یک از نقاط تقاضا می‌بایست مکرراً در طول یک بازه‌های مختلف بازدید شود. تالاریکو و همکاران یک مدل حمل‌ونقل پول بر مبنای مسیریابی وسایل نقلیه با محدودیت ریسک برای هر مسیر ارائه دادند. آنها روش‌های فرا ابتکاری متفاوتی برای حل مسئله مطرح کردند. در ادامه تالاریکو و همکاران مدل ارائه‌شده در تالاریکو و همکاران را به شکل دو هدفه بررسی و روش حل فرا ابتکاری برای حل آن توسعه دادند. بازکایا^۶ و همکاران مدل چند دوره‌ای مل و نقل پول با لحاظ کردن بارگیری و تحویل همزمان را مطالعه کردند. رادوجیکیک^۷ و همکاران به توسعه‌ی روش هیبرید با جستجوی ممنوعه برای حل مسئله‌ی تالاریکو و همکاران پرداختند. در مطالعه‌ی دیگر رادوجیکیک و همکاران، مفاهیم فازی را در مدلسازی مسئله‌ی تالاریکو و همکاران دخیل کردند. هوگبوم و دولارت^۸ بر روی ارائه‌ی روشی جدید و کارا برای توزیع زمان رسیدن به نقاط تقاضا در یک مدل چند دوره‌ای تمرکز کردند. اخیراً کو^۹ و همکاران مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی مختلط بر مبنای مدل تالاریکو و همکاران ارائه کردند که حمل‌ونقل

اسکناس‌های مختلف را شامل می‌شد. سایر مطالعات در ادبیات موضوع مانند تالاریکو و همکاران، کانسانتیو^{۱۰} و همکاران و زاجاک^{۱۱} بر روی مسیریابی نامتشابه وسایل نقلیه تمرکز کردند. در این مطالعات رویکردهای مختلفی برای محاسبه‌ی تشابه مسیرها در حمل‌ونقل کالاهای ارزشمند مطرح شده است. قنادپور و زندیه بر روی فاکتور آسیب‌پذیری در حمل‌ونقل پول تمرکز کردند و یک مدل دو هدفه‌ی مسیریابی ارائه دادند. قنادپور و زندیه از تکنیک نظریه بازی برای توسعه‌ی روشی بر مبنای الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله CIT استفاده کردند. از دیگر کارهای ارائه‌شده در این حوزه می‌توان به تیکنی و همکاران اشاره کرد.

در حیطه‌ی حمل‌ونقل پول دو مطالعه‌ی دیگر شامل وان^{۱۲} و همکاران و لاریان^{۱۳} و همکاران بر روی توزیع مجدد و کنترل موجودی دستگاه‌های ATM تمرکز کردند. آنها در ادامه روش-های حل کارا برای حل مسائل خود ارائه دادند. لازم به ذکر است که این دو پژوهش ریسک‌های ناشی از حمل‌ونقل را در مدل‌ها خود لحاظ نکردند.

مرور مطالعات مسیریابی CIT نشان می‌دهد که علی‌رغم تلاش-های صورت پذیرفته در مدلسازی عملیاتی مسئله مسیریابی CIT، ولیکن مدل‌ها ارائه‌شده همچنان نواقص جدی داشته و نمی‌توانند مشخصه‌های دنیای واقعی را لحاظ کنند. برای نمونه این مدل‌ها تنها قادرند بخشی از مسیرهای شبکه را مطالعه کنند. دیگر اینکه در مدل‌های مذکور مبحث ترافیک وابسته به زمان در طول روز که می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای در ریسک سفر تأثیر بگذارد دیده نشده است.

۲. شکاف‌های تحقیقاتی و نوآوری‌های

مدل

طبق مطالعات انجام‌شده به‌طورکلی تنها تعداد معدودی از مقالات بر روی شبکه‌های چندگانه در حمل‌ونقل و طراحی شبکه‌ی لجستیک تمرکز کرده‌اند. از آنجایی که در دنیای واقعی

که پیش‌تر عنوان شد، مسئله به صورت مسیریابی و سیله نقلیه وابسته به زمان بوده و در یک شبکه‌ی چندگانه $G = (V, E)$ مطالعه می‌شود. مجموعه‌ی گره‌ها شامل یک انبار مرکزی و مجموعه‌ای از نقاط تقاضا است که در آن $N = \{1, \dots, n\}$. همچنین، $E = \{(i, j, m) : i, j \in V, i \neq j\}$ مجموعه یال‌های ترافیکی بین دو نقطه‌ی مشخص i و j را نشان می‌دهد. از آنجایی که شبکه به صورت چندگانه است هر یال به صورت (i, j, m) نمایش داده شده که در آن m نشان‌دهنده‌ی شمارنده‌ی یال موازی بین نقاط است. شمارنده‌ها و پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله در جدول ۱ آورده شده است. در این بخش مسئله‌ی TD-CITRM-ST با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی غیرخطی مدلسازی می‌شود. مفروضات زیر برای مدلسازی مسئله در نظر گرفته شده است.

- وسایل نقلیه مأموریت خود را در شروع بازه‌ی زمانی آغاز می‌کنند؛
- زمان کل یک تور و ریسک تجمعی آن می‌بایست کمتر از میزان تعیین شده باشد؛
- از آنجایی که مسئله‌ی TD-CITRM-ST در فضای درون‌شهری مطالعه می‌شود، دسترسی از یک نقطه به نقاط دیگر با بیش از یک سال می‌تواند صورت پذیرد (توسط شبکه‌ی چندگانه)؛
- یال‌های موازی در شبکه‌ی چندگانه دارای دو مشخصه‌ی ذاتی شامل زمان سفر وابسته به زمان و ریسک هستند؛
- تقاضای وسایل نقلیه در نقاط تقاضا مشخص و قطعی است. در واقع، ارگان‌های تقاضاکننده می‌بایست دقیقاً مقدار نیاز خود را پیش از مسیریابی و زمان‌بندی تعیین کنند؛
- تمامی وسایل نقلیه موظف‌اند تمامی نقاط تقاضای تخصیص یافته به آنها را بازدید کرده و در نهایت به نقطه‌ی انبار اولیه بازگردند.

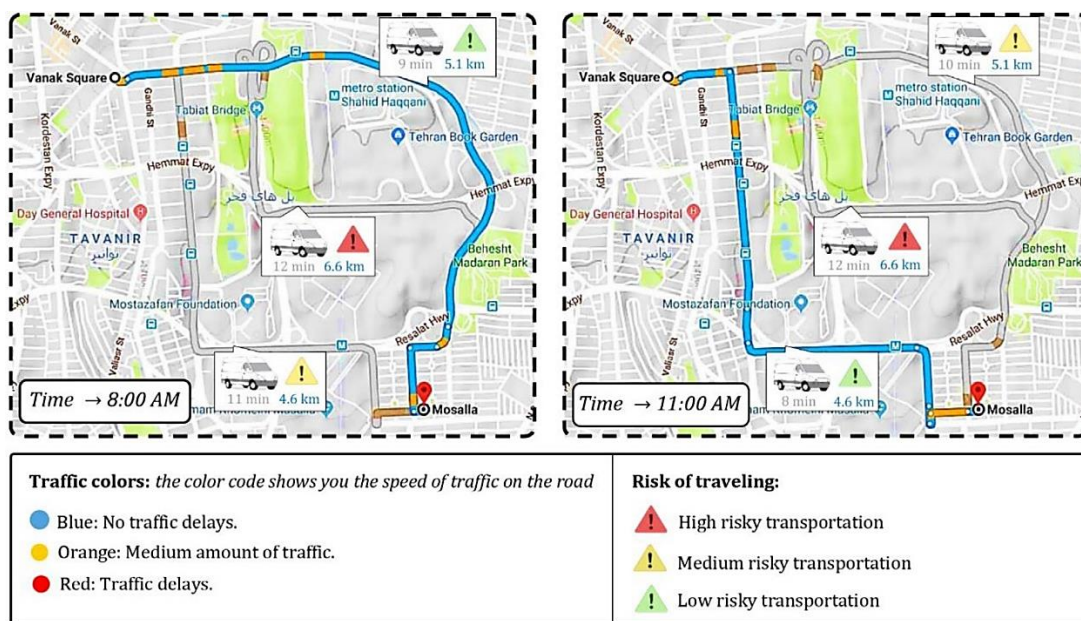
مسیرهای متنوعی برای رسیدن از یک نقطه به نقطه‌ی دیگر وجود دارد. در نظرگیری این نوع شبکه در مسائلی که زمان فاکتور اساسی محسوب می‌شود بسیار حائز اهمیت است و طبیعتاً می‌تواند کیفیت پاسخ‌ها را تحت الشعاع قرار دهد.

مرور ادبیات نشان می‌دهد که در حوزه‌ی مسیریابی و حمل و نقل پول نقد مشخص است که مدل‌های ارائه شده در این حوزه قادر به لحاظ کردن شرایط دنیای واقعی به شکل مناسب نیستند. برای نمونه، شرکت‌های CIT عموماً در محیط‌های درون‌شهری با وجود ترافیک فعالیت می‌کنند. ترافیکی که وابسته به زمان سفر متفاوت بوده و می‌تواند ماهیت عدم قطعیت نیز داشته باشد که این موارد در مدل‌های پیشین عنوان نشده بود. علاوه بر آن مدل‌های قبلی CIT در شبکه‌ی ساده بررسی شده‌اند. ولیکن بنا بر ادعای گرایکس و همکاران (۲۰۱۰)، زمانی که بیش از یک ویژگی یال‌های شبکه در تصمیم‌گیری مؤثر باشد، شبکه‌ی ساده قادر نیست بالانس و تعامل بین ویژگی‌های یال‌ها را لحاظ کند. در نتیجه یک موضوع تحقیقاتی قابل توجه می‌تواند مطالعه‌ی مسیریابی مسئله‌ی CIT در گراف چندگانه باشد که دو ویژگی متفاوت زمان و ریسک یال‌های ملاک است باشد.

در ادامه به مدل تصادفی دومرحله‌ای مسیریابی و زمان‌بندی حمل پول نقد در شبکه‌ی چندگانه با در نظرگیری محدودیت ریسک و محدودیت زمان سفر که من بعد از اختصار TD-CITRM-ST^{۱۴} برای ذکر مدل استفاده می‌شود.

۳. تعریف مسئله و مفروضات آن

مدل VRP ارائه شده در این مقاله به دنبال تعیین بهترین توالی گره‌ها و یال‌های بین آنها است؛ که طبیعتاً بر اساس زمان آغاز سفر از یک نقطه یال مناسب می‌تواند تغییر کند. این موضوع در ساعات مختلف روز در شبکه‌ی شهری کاملاً مشهود است که در شکل ۱ به نمونه از این موضوع اشاره شده است. همان‌طور



شکل ۱. نمایش مسیرهای مختلف موجود بین دو نقطه از شبکه‌ی شهری

جدول ۱. اندیس‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم مسئله TD-CITRM

شناسه	تعریف
N	مجموعه‌ی نقاط تقاضا $N = \{1, \dots, n\}$
P	گره انبار و انبار مجازی $P = \{0 \cup n + 1\}$
i, j	اندیس نقاط شبکه $i, j \in (N \cup P)$
K	اندیس وسایل نقلیه $k \in \{1, \dots, K \}$
M_{ij}	مجموعه یال‌های موازی بین دو نقطه i و j ، که $i \neq j$ ، $m \in \{1, \dots, M_{ij} \}$
D_i	تقاضا در نقطه‌ی i
s_i	زمان سرویس‌دهی در نقطه‌ی i
Q	ظرفیت وسایل نقلیه
ρ	حداکثر ریسک مجاز برای هر مسیر
δ	حداکثر زمان مورد انتظار برای هر مسیر
Tr_{ij}^m	احتمال وقوع سرقت در یال m بین دو نقطه‌ی i و j
H_m	مجموعه بازه‌های زمانی در یال m بین دو نقطه‌ی i و j $h \in \{1, \dots, H_m \}$
a_{ijm}^h, b_{jhm}^h	ضرایب برای تعیین زمان سفر در یال m بین دو نقطه‌ی i و j
\bar{T}_{ijm}^h	بازه‌های زمانی جدید برای یال m بین دو نقطه‌ی i و j
t_i^k	زمان عزیمت وسیله نقلیه k از نقطه‌ی i (متغیر تصمیم)
r_{ijm}^k	ریسک سرقت در لینک (i, j, m) با وسیله نقلیه k
v_{ijm}	پارامتر آسیب‌پذیری در یال m بین دو نقطه‌ی i و j
Cp_i^k	میزان بار باقیمانده در نقطه i در وسیله نقلیه k (متغیر تصمیم)

شناسه	تعریف
R_i^k	ریسک تجمعی در نقطه i و برای وسیله نقلیه k (متغیر تصمیم)
x_{ij}^k	متغیر تصمیم که برابر یک است اگر وسیله نقلیه k از گره i به گره j برود (متغیر تصمیم)
x_{ijm}^{hk}	متغیر تصمیم که برابر یک است اگر وسیله نقلیه k توسط یال m از گره i به گره j برود (متغیر تصمیم)
E	عدد بزرگ
Ω	مجموعه سناریوها $\omega \in \Omega$

۳- احتمال موفق بودن دزدی در زمانی که دزدی رخ دهد که

آن با فاکتور آسیب‌پذیری v_{ijm} نمایش داده شده است.

۴- میزان کالایی که در وسیله نقلیه وجود دارد در میزان ریسک

تأثیرگذار است. در این مسئله این مقدار معادل میزان پول

باقیمانده در وسیله نقلیه k بعد از بازدید نقطه‌ی i است (این

مقدار معادل است با Cp_i^k).

با توجه به فاکتورهای فوق، ریسک سفر بر روی لینک

$$r_j^k = Tr_{ij}^m \cdot v_{ijm} \cdot Cp_i^k \cdot (t_j^k - s_j) \quad (i, j, m) \text{ عبارت}$$

$t_i^k - s_j$ تعیین می‌گردد. از آنجایی که به دست آوردن فاکتور

آسیب‌پذیری پیچیده است. در این مطالعه نیز مطابق بر مطالعه‌ی

تالاریکو و همکاران (۲۰۱۵)، مقدار این پارامتر ثابت فرض شده

است. در واقع به این ترتیب می‌توان این فاکتور را از معادلات

بهینه‌سازی حذف کرد. در نهایت در صورتی که متغیر تصمیم R_j^k

نشان‌دهنده‌ی ریسک تجمعی بعد از بازدید نقطه‌ی j در طول

مسیر (i, j, m) در مسیر k باشد، ریسک در طول مسیر وسیله‌ی

k از معادله (۱) به دست می‌آید.

$$R_j^k = Tr_{ij}^m \cdot Cp_i^k \cdot (t_j^k - t_i^k - s_j) + R_i^k \quad (1)$$

در مسئله‌ی TD-CITRM، ریسک کلی هر مسیر با یک مقدار

مجاز ρ کنترل می‌شود. محدود کردن این مقدار موجب می‌شود

تا کالاهای ارزشمند (پول) بتواند با مسیرهایی نسبتاً ایمن به

مقصد برسند. شکل ۲ برای روشن‌تر شدن نحوه‌ی محاسبه‌ی

ریسک با مقدار حد مجاز ریسک معادل $\rho = 5$ آورده شده

است.

۳-۱ شبکه‌ی چندگانه با مشخصه‌های ریسک و زمان

وابسته به ترافیک

شبکه‌ی چندگانه‌ی ارائه‌شده قادر است بیش از یک را بین دو

نقطه در خود نگه دارد. در نتیجه بر اساس زمان آغاز سفر از یک

نقطه یالی که زمان سفر کمتر دارند می‌تواند تغییر کند. البته لازم

به ذکر است که در مدل TD-CITRM-ST صرفاً زمان سفر

تعیین‌کننده‌ی بهترین یال عبوری نیست. به دلیل اینکه یال‌ها برای

مسئله‌ی CIT دارای دو مشخصه‌ی ذاتی شامل زمان سفر و

ریسک سفر هستند.

۳-۲ ارزیابی ریسک در شبکه‌ی چندگانه

به‌طور عمده، توابع ریسک بر اساس میزان خطرناک بودن مواد

مورد حمل و شرایط جاده تعریف می‌شوند. در مسئله‌ی CIT،

جمعیت حول وسیله‌ی نقلیه در معرض خطر نیست و ماده‌ی

حمل شونده انفجار پذیر نیست. در این مسئله، وسایل نقلیه در

معرض ریسک دزدی قرار دارند. در مسئله‌ی موردبررسی ریسک

وقوع دزدی در طول یال (i, j, m) در شبکه‌ی چندگانه با ρ

فاکتور اصلی درگیر است:

۱- احتمال دزدی به زمان سفر وسیله‌ی نقلیه در طول یک لینک

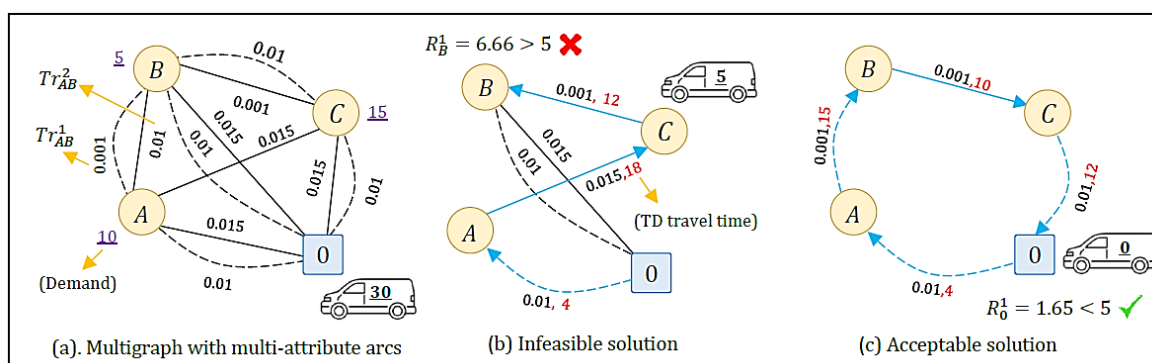
۲- احتمال وقوع دزدی در طول یال در واحد زمان که با

پارامتر Tr_{ij}^m نشان داده شده است. مقدار Tr_{ij}^m به فاکتورهای

مختلفی وابسته است که می‌توان به تعداد لاین‌های مسیر،

وجود تونل، پتانسیل جرم در منطقه، شرایط آب و هوایی و

غیره وابسته باشد.



شکل ۲. مثالی از نحوه‌ی محاسبه‌ی ریسک برای یک وسیله نقلیه در شبکه‌ی چندگانه (خط‌چین‌ها یال‌های موازی در شبکه را نشان می‌دهد)

CITRM-ST استفاده شده است. برای این منظور متغیرهای

تصمیم مسئله به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

- متغیرهای تصمیم غیر وابسته به سناریو: متغیرهای تصمیم مرحله‌ی اول که پیش از تحقق مقادیر واقعی پارامترهای غیرقطعی، مقدار می‌گیرند. در این مسئله متغیرهای مربوط تعیین توالی گره‌ها x_{ij}^k و بار وسیله نقلیه تصمیمات مرحله اول هستند.

- متغیرهای تصمیم وابسته به سناریو: متغیرهای تصمیم مرحله‌ی دوم که پس از تحقق مقادیر واقعی پارامترهای غیرقطعی، مقدار می‌گیرند. فرض کنید مجموعه‌ی سناریوهای ممکن برای مسئله با نمایش Ω داده شود که به ازای هر سناریو داریم $\omega \in \Omega$. پس متغیرهای تصمیم مرحله‌ی دوم وابسته به سناریو مقادیر متفاوتی به خود می‌گیرند. در این مسئله متغیرهای مربوط به تعیین یال مورد استفاده بین نقاط تقاضا $x_{ijm}^{hk}(\omega)$ زمان اعزام وسایل نقلیه از نقاط مختلف $t_i^k(\omega)$ و ریسک تجمعی وسایل نقلیه $R_j^k(\omega)$ متغیرهای مرحله‌ی دوم هستند.

مدل تصادفی دو مرحله‌ای غیرخطی از TD-CITRM-ST به

شکل زیر است.

Stage one (P1):

$$\min E_{\xi} [h(\mathbf{x}, \xi)] \quad (2)$$

$$\sum_{i \in (0 \cup N), i \neq j} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall j \in (N \cup n + 1) \quad (3)$$

۳-۳ محدودیت حداکثر زمان سفر

در ادبیات موضوع، معیارهای مختلفی جهت افزایش کیفیت سرویس‌دهی در مسائل VRP ارائه شده است. یکی از این معیارها محدود کردن زمان سفر و یا طول مسیر است که در TD-CITRM-ST لحاظ شده است. قابل توجه است که از دید شرکت‌های CIT، این مورد که بتوان تمامی مسیرهای طراحی شده بالانس باشد و در یک زمان معین به انجام برسد امری مطلوب تلقی می‌شود.

۳-۴ مدل‌سازی مسئله‌ی TD-CITRM-ST

مسئله‌ی TD-CITRM-ST می‌بایست هم‌زمان توالی گره‌های تقاضا و یال‌های موازی بین آنها را تعیین کند. این مسئله به دنبال آن است که مجموع زمان تکمیل کار وسایل نقلیه را کاهش دهد به طوری که محدودیت‌های زمان سفر، ظرفیت و ریسک برای وسایل نقلیه برآورده شود. به منظور مدل کردن عدم قطعیت در ترافیک مسیرها، مسئله به صورت برنامه‌ریزی عدم قطعیت دو مرحله‌ای مدل شده است. در واقع، از درخت سناریو شامل تعداد محدودی از سناریو برای تقریب سرعت سفر در TD-

مسیریابی و زمان‌بندی حمل پول نقد در شبکه‌ی چندگانه با در نظرگیری محدودیت ریسک و زمان سفر تحت شرایط عدم قطعیت ترافیکی

(مطالعه موردی: شهر اصفهان)

$$\sum_{j \in (n+1 \cup N), i \neq j} \sum_{k \in K} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in (N \cup 0) \quad (4)$$

$$\sum_{i \in (0 \cup N)} x_{ij}^k = \sum_{i \in (n+1 \cup N)} x_{ji}^k \quad \forall j \in N, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{0j}^k \leq |K| \quad (6)$$

$$Cp_0^k \leq Q \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$Cp_0^k = \sum_{i \in N} D_i \sum_{j \in (n+1 \cup N)} x_{ij}^k \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$Cp_j^k \geq Cp_i^k - D_j - (1 - x_{ij}^k)E \quad \forall i, j \in (N \cup P), \forall k \in K, i \neq j \quad (9)$$

$$x_{ii}^k = 0 \quad \forall i \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (10)$$

$$x_{i0}^k = 0 \quad \forall i \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (11)$$

$$x_{(n+1)j}^k = 0 \quad \forall j \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (12)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (13)$$

$$Cp_i^k \geq 0 \quad \forall i \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (14)$$

در ادامه به ازای هر سناریو ω ، مدل مرحله‌ی دوم با تابع هدف

$h(\mathbf{x}, \xi(\omega))$ به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

Stage two (P2):

$$h(\mathbf{x}, \xi(\omega)) = \text{Min} \sum_{k \in K} t_{n+1}^k(\omega) \quad (15)$$

$$\sum_{i \in (0 \cup N), i \neq j} \sum_{m \in M_{ij}} \sum_{h \in H_m} x_{ijm}^{hk}(\omega) = \sum_{i \in (0 \cup N), i \neq j} x_{ij}^k \quad \forall j \in (N \cup n+1), \forall k \in K \quad (16)$$

$$t_j^k(\omega) - t_i^k(\omega) \geq a_{ijm}^h(\omega) + b_{ijm}^h(\omega)t_i^k(\omega) + s_j + (x_{ijm}^{hk}(\omega) - 1)E \quad \forall i \in (0 \cup N), \forall j \in (N \cup n+1), \forall k \in K, \forall m \in M_{ij}, \forall h \in H_m, i \neq j \quad (17)$$

$$t_i^k(\omega) \geq \bar{T}_{ijm}^h(\omega) + (1 - x_{ijm}^{hk}(\omega))E \quad \forall i \in (0 \cup N), \forall j \in (n+1 \cup N), \forall k \in K, \forall m \in M_{ij}, \forall h \in H_m, i \neq j \quad (18)$$

$$t_i^k(\omega) \leq E \sum_{j \in (N \cup n+1)} x_{ij}^k \quad \forall i \in (0 \cup N), \forall k \in K \quad (19)$$

$$R_0^k(\omega) = 0 \quad \forall k \in K \quad (20)$$

$$R_j^k(\omega) = Tr_{ij}^m \cdot Cp_i^k \cdot (t_j^k(\omega) - t_i^k(\omega) - s_j) + R_i^k(\omega) - (1 - \sum_{h \in H_m} x_{ijm}^{hk}(\omega))E \quad \forall i \in (0 \cup N), \forall j \in (n+1 \cup N), \forall k \in K, \forall m \in M_{ij}, i \neq j \quad (21)$$

$$0 \leq R_i^k(\omega) \leq \rho \quad \forall i \in (N \cup P) \forall k \in K \quad (22)$$

$$t_{n+1}^k(\omega) \leq \delta \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$x_{ijm}^{hk}(\omega) \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in (N \cup P), \forall m \in M_{ij}, \forall h \in H_m, \forall k \in K \quad (24)$$

$$t_i^k(\omega), R_i^k(\omega) \geq 0 \quad \forall i \in (N \cup P), \forall k \in K \quad (25)$$

نیز در زمان قابل قبول نیستند. به دلیل اینکه ساختار مدل‌های این پژوهش به‌موجب عدم خطی بودن مدل، وجود شبکه‌ی چندگانه‌ی وابسته به زمان، عدم قطعیت، یال‌های چند مشخصه و سایر محدودیت‌های کاربردی به‌صورت جدی با مدل‌های پیشین تفاوت دارد. درواقع این روش پیشنهادی تلفیقی از حل دقیق بر مبنای برنامه‌ریزی پویا و فرا ابتکاری است. در این راستا، الگوریتم GA بهبودیافته شده برای تعیین توالی مناسب برای گره‌ها ارائه‌شده، در ادامه پاسخ‌های به‌دست‌آمده از این روش به روش LSFSN ارسال می‌شود تا پاسخ‌ها بتواند سایر محدودیت‌هایی که در فاز اول لحاظ نشده را ارضا کند. فرآیند کلی این الگوریتم در الگوریتم ۱ نشان داده شده است.

محدودیت‌های (۳) تا (۱۴) مدل مرحله‌ی اول (P1) مربوط به الزامات مسیریابی و محدودیت ظرفیت وسیله‌ی نقلیه است. درحالی‌که محدودیت‌ها و معادلات در زیر مسئله‌ی (P2) شامل محدودیت‌های زمانی و ریسک سفر است که به ازای هر سناریو نوشته شده است. به‌صورت دیگر می‌توان گفت که مدل مرحله‌ی اول (P1) یک مدل VRP ظرفیت دار با تابع هدف مقدار مورد انتظار توابع هدف در (P2) مسئله‌ی است.

۴. حل مدل‌های TD-CITRM-ST

با توجه به پیچیدگی و غیرخطی بودن مسائل ارائه‌شده، حل‌کننده‌های تجاری حتی قادر به حل مسئله در ابعاد کوچک

الگوریتم ۱. فرآیند کلی الگوریتم ژنتیک با پایگاه داده داخلی و جستجوی همسایگی

```

1  Input Parameters: Popsiz, Pc, PLC, coefficients  $\theta$  and  $\varphi$ 
2  Set  $UP \leftarrow \infty, It \leftarrow 1$ 
3  Generate an initial random population  $POP_{It}$ 
4  For each chromosome  $CH \in POP_{It}$ 
5      If ( $CH$  is repetitive)
6          Use cache table to achieve the fitness value
7      Else
8          Decode the  $CH$ , calculate the related fitness value and update the cache table
9          Update the  $UP$  based on fitness value of  $CH$ 
10     End if
11  While (termination criteria is not met) do
12     Select two parents from  $POP_{It}$  using Tournament Selection
13     Apply self-adapted crossover to generate the offsprings
14     Evaluate the fitness values of offsprings
15     Apply self-adapted local-search to generate the offsprings with probability  $P_{LS}$ 
16     Evaluate the fitness values of offsprings
17     Rank the individuals of the current population and determine new population
18     If (exist some individuals with fitness value  $UP$ )
19         Replace these repetitive individuals with some randomly generated individuals
20     End if
21      $It \leftarrow It + 1$ 
22  End while
23  Return The best individual in the last population
    
```

که در میدان آزادی قرار دارد به چندین ATM در فضای شهر توزیع شود. توزیع پول در ساعت ۸ صبح شروع شده و مسیرها می‌بایست قبل ساعت ۱۰ به پایان رسیده باشند. میزان حد مجاز ریسک معادل ۲ در نظر گرفته شده است. تعداد گره‌های تقاضا برابر ۲۰ بوده (که شامل یک انبار و ۱۹ دستگاه ATM می‌شود) با دو وسیله نقلیه می‌شود. زمان میانگین بارگذاری در نقاط تقریباً برابر ۴ دقیقه در نظر گرفته شده است. هر یک از ATM های موردبررسی شامل ۴ کاست بوده که ظرفیت هر کاست برابر

برای اطلاعات بیشتر در رابطه با نحوه‌ی ارزیابی تابع برانندگی الگوریتم برچسب‌گذاری LSFSN^{۱۵} به تیکنی و همکاران رجوع شود.

۵. تحلیل داده‌ها

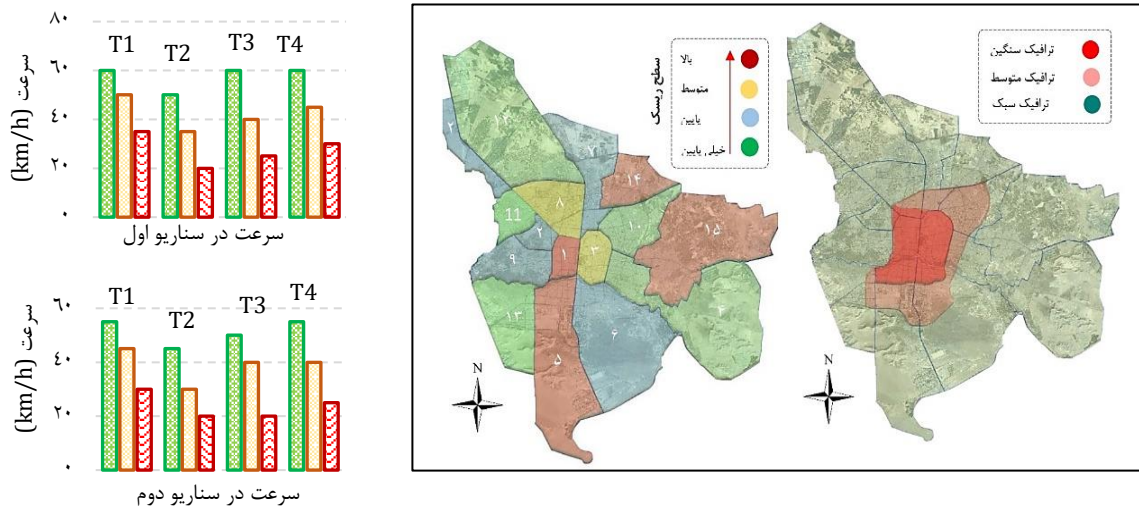
در این مطالعه، اطلاعات مربوط به یکی از بانک‌های شهر اصفهان مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در این مثال می‌بایست، مقداری پول مشخص جهت تأمین نیاز مربوطه از شعبه‌ی مرکزی

مسیریابی و زمان‌بندی حمل پول نقد در شبکه‌ی چندگانه با در نظرگیری محدودیت ریسک و زمان سفر تحت شرایط عدم قطعیت ترافیکی

(مطالعه موردی: شهر اصفهان)

ملاحظات امنیتی این حداکثر ظرفیت برابر ۶۰۰ میلیون تومان قرار گرفته شده است. به منظور تعیین ریسک در مسیرهای سفر، از آمارهای پیشین در سرقت‌های صورت گرفته در سطح شهر استفاده شده است. برای این منظور ۱۵ منطقه‌ی شهری در اصفهان بر اساس ریسک گروه‌بندی شده‌اند. شکل ۳ پراکندگی و ریسک مناطق مختلف را نشان می‌دهد. احتمال وقوع سرقت در هر یال از شبکه بنابراین گروه‌بندی و بر پایه‌ی نظر کارشناسان صورت می‌پذیرد.

۲۰۰۰ اسکناس است. به‌طور کلی، کاست‌ها با اسکناس‌های ۵۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ پر می‌شوند؛ بنابراین، تقاضای هر یک از نقاط تقاضا با تابع یکنواخت [30, 80] تولید شده‌اند. لازم به ذکر است که در شرایط واقعی میزان تقاضای نقاط از پیش به‌صورت قطعی توسط سیستم الکترونیکی بانکداری تعیین می‌شود. وزن هر یک از اسکناس‌ها معادل ۱,۳ گرم است و میزان ظرفیت وسیله برای هم اسکناس‌ها و هم پرسنل برابر ۶۰۰۰ کیلوگرم است. در نتیجه حداکثر ظرفیت وسیله برابر ۴۰۰۰۰۰ خواهد بود که با این حساب معادل ۲ تا ۴ بیلیون تومان خواهد شد. ولیکن بنا بر



شکل ۳. نواحی ترافیکی مختلف شهر اصفهان مناطق شهر اصفهان با کلاس‌بندی بر مبنای ریسک دزدی شکل ۱: تغییر سرعت در بازه‌های زمانی مختلف (II) در سه منطقه ترافیکی، منطقه ۱: ترافیک سنگین، منطقه ۲: ترافیک متوسط، منطقه ۳: ترافیک سبک

با حل مسئله‌ی TD-CITRM-ST برای مطالعه‌ی موردی دو مسیر برای تحویل مرسوله‌ها پیشنهاد شده است. شکل ۴ (ب) پاسخ مسئله را گزارش می‌کند. در این شکل، اگر مسیر پیشنهادی در سناریو دو با سناریو یک متفاوت باشد، مسیر سناریو دوم با علامت خط‌چین آورده شده است. در این شکل OB_j مقدار تابع هدف مسئله را نشان می‌دهد و علامت \odot زمان تکمیل هر یک از مسیرها و همچنین \triangle ریسک تجمعی هر یک از مسیرها را گزارش می‌دهد.

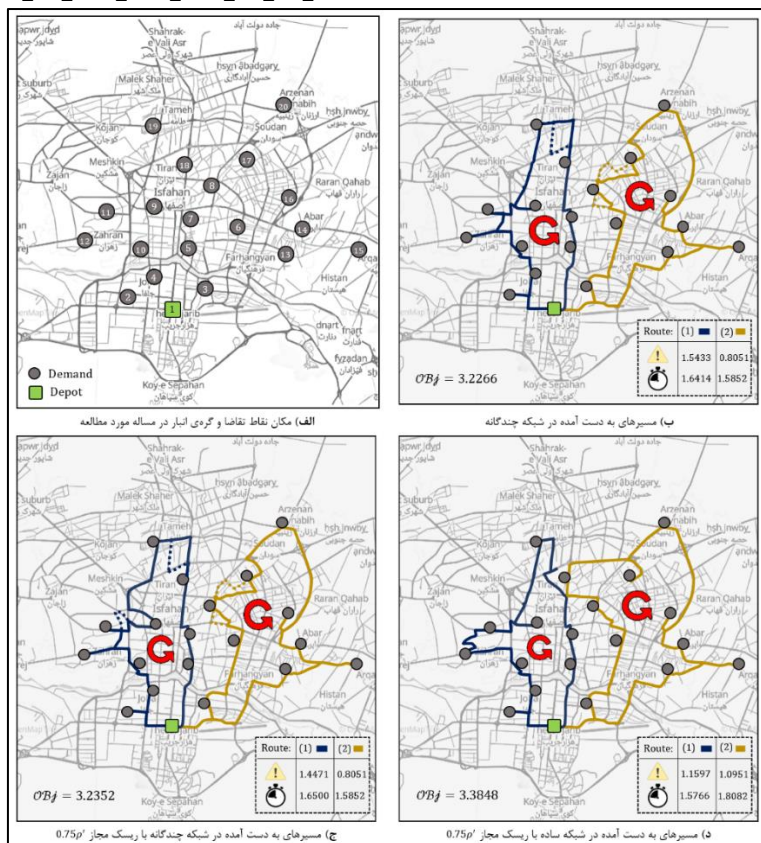
فرض کنید که یک حمل بین دو نقطه‌ی i و j با لینک m در سناریو اول و با لینک m' در سناریو دوم به‌صورت $i \rightarrow j \rightarrow m'$

به‌منظور تعیین سرعت در شهر اصفهان، بر اساس ساختار شهری سه نوار ترافیکی لحاظ شده است. این کلاس‌بندی بر اساس آمار و اطلاعات ترافیکی شهر اصفهان بوده است. شکل ۴، گروه‌بندی ترافیکی را نشان می‌دهد. در این شکل رنگ قرمز ترافیک سنگین، رنگ صورتی ترافیک متوسط و سایر مناطق که به‌صورت رنگ سبز هستند ترافیک سبک تلقی می‌شود. دو سناریو $S(1)$ و $S(2)$ برای شرایط ترافیکی با احتمال‌های ۶۰٪ و ۴۰٪ لحاظ شده‌اند که در آن $S(2)$ ترافیک بیشتری داشته و احتمال وقوع کمتر. شکل ۴ الگوی سرعت در مناطق مختلف ترافیکی و در هر سناریو را گزارش می‌کند. شکل ۴ نیز پراکندگی نقاط تقاضا و انبار را نشان می‌دهد.

پیشنهادشده برابر با

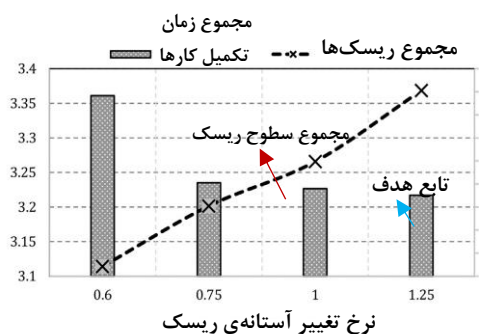
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
 (1→5→7→18→19→9→11→12→10→4→2→1)
 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1

نمایش داده شود. در مدل بررسی شده ریسک تجمعی مسیرها با استفاده از پارامتر ρ' محدود شده است. در این راستا، مسیر اول



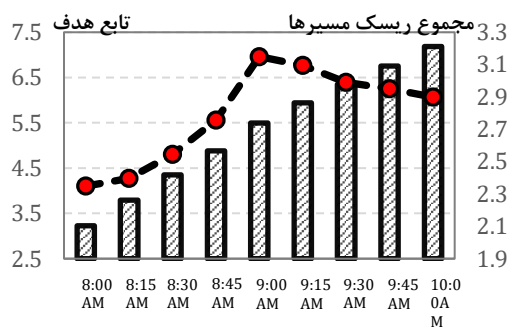
شکل ۴. مکان نقاط تقاضا و انبار در شبکه‌ی شهری و نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل

تابع هدف به‌دست‌آمده که در شکل به‌صورت خطی و نقطه‌چین ارائه شده است. این شکل نشان می‌دهد که میزان زمان کل سفر و ریسک سفر با یکدیگر در trade-off قرار دارند. در واقع، کاهش آستانه‌ی ریسک می‌تواند موجب افزایش زمان سفر شود.



شکل ۶. رابطه‌ی بین مجموع ریسک وسایل نقلیه و زمان تکمیل سرویس‌دهی

در شکل ۵ میزان ریسک با توجه به زمان آغاز سفر مختلف را نشان می‌دهد. در شکل ۶ نیز رابطه بین حد آستانه ریسک و زمان کل تکمیل سرویس‌دهی در مطالعه‌ی موردی، بررسی شده است. در این شکل با ضرب ρ' در ضرایب مختلف و حل مدل مقدار



شکل ۵. آنالیز تأثیر زمان شروع عملیات حمل‌ونقل بر روی

مقدار تابع هدف و ریسک سفر

۶. نتیجه‌گیری

این مقاله به ارائه‌ی مدلی جدید برای مسیریابی حمل‌ونقل پول نقد در گراف چندگانه با شرایط ترافیکی وابسته به زمان می‌پردازد. نوآوری‌های این مدل که با TD-CITRM-ST معرفی شده‌اند به‌طور خاص به‌صورت زیر هستند:

- استفاده از شبکه‌ی چندگانه در مسیریابی حمل‌ونقل پول؛
- لحاظ کردن مسئله در شرایط ترافیکی وابسته به زمان و همچنین مطالعه‌ی مسئله در شرایط قطعی؛
- ارائه‌ی فرمول ریسک جدید به‌منظور در نظرگیری شرایط مسئله اعم از وجود یال‌های موازی و ترافیک وابسته به زمان؛
- طراحی مسیرهای بالانس شده با لحاظ کردن حداکثر زمان مجاز سفر.

در این مسئله یال‌های موازی دارای دو مشخصه شامل زمان سفر وابسته به زمان و ریسک سفر را شامل می‌شود. واضح است که هر دوی این مشخصه‌ها مسیریابی را تحت شعاع قرار می‌دهد. نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش به ترتیب ذیل است:

۱. در مسائلی همچون مسئله‌ی CIT که یال‌ها چند مشخصه دارند، به‌کارگیری شبکه‌ی چندگانه تأثیر قابل‌توجهی در کیفیت پاسخ‌های مسئله دارند. به‌عبارت‌دیگر اگر این نوع از مسئله در شبکه‌ی ساده بررسی شوند بخشی از پاسخ‌های شدنی مسئله بررسی نمی‌شوند.
۲. لحاظ کردن شرایط ترافیکی وابسته به زمان در شبکه‌ی چندگانه موجب نزدیک شدن مدل‌سازی به شرایط واقعی خواهد شود. این امر باعث می‌شود تا بسته به زمان آغاز سفر از یک نقطه مسیر انتخابی پیش رو متفاوت باشد.
۳. از منظر شرکت‌های حمل پول نقد بالانس کردن ریسک سفر و زمان سفر وسایل نقلیه حائز اهمیت است. لذا مدل TD-CITRM-ST گارانتی می‌کند تا تکمیل عملیات توزیع پول برای تمامی وسایل نقلیه قبل از یک موعد معین و تحت حداکثر ریسک تعریف‌شده‌ای شکل گیرد.

۴. طبیعتاً عدم در نظرگیری شرایط عدم قطعیت در ترافیک

مسیرهای شبکه موجب کاهش قابل‌توجه پاسخ‌های به‌دست‌آمده خواهد شد. مدل ارائه‌شده در این مقاله قادر است تا شرایط عدم قطعیت در الگوی ترافیکی مسیرها را لحاظ کند.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Calvo and Cordone
2. Ngueveu
3. Yan
4. Talarico
5. Michallet
6. Bozkaya
7. Radojčić
8. Hoogeboom & Dullaert
9. Xu
10. Constantino
11. Zajac
12. Van
13. Larrain
14. Time-dependent CIT routing problem in multigraphs with stochastic travel time
15. Link selection in a fixed sequence of nodes

۸. مراجع

- Calvo, R. W., & Cordone, R. (2003). A heuristic approach to the overnight security service problem. *Computers & Operations Research*, 30(9), 1269-1287.
- Ngueveu, S. U., Prins, C., & Calvo, R. W. (2010). Lower and upper bounds for the m-peripatetic vehicle routing problem. *4OR*, 8(4), 387-406.
- Yan, S., Wang, S. S., & Wu, M. W. (2012). A model with a solution algorithm for the cash transportation vehicle routing and scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 464-473.
- Talarico, L., K. Sörensen, and J. Springael. (2013), "The risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem with time window constraints." 14th Workshop of the EURO

- Constantino, M., Mourão, M. C., & Pinto, L. S. (2017). Dissimilar arc routing problems. *Networks*, 70(3), 233-245.
- Zajac, S. (2018). On a two-phase solution approach for the bi-objective k-dissimilar vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, 24(3), 515-550.
- Ghannadpour, S. F., & Zandiyeh, F. (2020). A new game-theoretical multi-objective evolutionary approach for cash-in-transit vehicle routing problem with time windows (A real life case). *Applied Soft Computing*, 93, 106378.
- Ghannadpour, S. F., & Zandiyeh, F. (2020). An adapted multi-objective genetic algorithm for solving the cash in transit vehicle routing problem with vulnerability estimation for risk quantification. *Engineering applications of artificial intelligence*, 96, 103964.
- Tikani, H., Setak, M., & Demir, E. (2021). A risk-constrained time-dependent cash-in-transit routing problem in multigraph under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 293(2), 703-730.
- Tikani, H., Setak, M., & Demir, E. (2021). Multi-objective periodic cash transportation problem with path dissimilarity and arrival time variation. *Expert Systems with Applications*, 164, 114015.
- Van Anholt, R. G., Coelho, L. C., Laporte, G., & Vis, I. F. (2016). An inventory-routing problem with pickups and deliveries arising in the replenishment of automated teller machines. *Transportation Science*, 50(3), 1077-1091.
- Larrain, H., Coelho, L. C., & Cataldo, A. (2017). A variable MIP neighborhood descent algorithm for managing inventory and distribution of cash in automated teller machines. *Computers & Operations Research*, 85, 22-31.
- Working Group “EU/ME: the Metaheuristics Community,” Hamburg, Germany.
- Michallet, J., Prins, C., Amodeo, L., Yalaoui, F., & Vitry, G. (2014). Multi-start iterated local search for the periodic vehicle routing problem with time windows and time spread constraints on services. *Computers & operations research*, 41, 196-207.
- Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2015). Metaheuristics for the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem. *European Journal of operational research*, 244(2), 457-470.
- Talarico, L., Sörensen, K., & Springael, J. (2017). A biobjective decision model to increase security and reduce travel costs in the cash-in-transit sector. *International Transactions in Operational Research*, 24(1-2), 59-76.
- Bozkaya, B., Salman, F. S., & Telciler, K. (2017). An adaptive and diversified vehicle routing approach to reducing the security risk of cash-in-transit operations. *Networks*, 69(3), 256-269.
- Radojičić, N., Marić, M., & Takači, A. (2018). A new fuzzy version of the risk-constrained cash-in-transit vehicle routing problem. *Information Technology and Control*, 47(2), 321-337.
- Radojičić, N., Djeniđ, A., & Marić, M. (2018). Fuzzy GRASP with path relinking for the Risk-constrained Cash-in-Transit Vehicle Routing Problem. *Applied Soft Computing*, 72, 486-497.
- Hoogeboom, M., & Dullaert, W. (2019). Vehicle routing with arrival time diversification. *European Journal of Operational Research*, 275(1), 93-107.
- Xu, G., Li, Y., Szeto, W. Y., & Li, J. (2019). A cash transportation vehicle routing problem with combinations of different cash denominations. *International Transactions in Operational Research*, 26(6), 2179-2198.

Routing and Scheduling of Cash Transportation in Multigraph Considering Risk and Travel Time Constraints under Traffic Uncertainty (Case Study: Isfahan City)

Hamid Tikani*, PhD of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Mostafa Setak, Associate professor of Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran
Mohammad Sina Asadian, MS of Project Management, Department of Industrial Engineering, Imam Khomeini International University, Gazvin, Iran

E-mail: hamid.tikani@email.kntu.ac.ir

Abstract

The transportation of cash, banknotes, and other valuable items is known as one of the new branches in the field of Cash-In-Transit (CIT). Due to the high-value density of these products, incorporating security strategies in carrier operations is crucial. In this regard, this paper provides a two-stage stochastic transportation model with traffic uncertainties at different times of the day in an inner-city multigraph network. The presented model not only yields to provide a new approach for calculating the travel risk but also helps to increase the quality of the obtained solution by considering multi-characteristic arcs (including time and travel risk). Taking into account various constraints such as maximum travel time, travel risk, and the presence of multi-characteristic arcs with stochastic traffic conditions brings high computational challenges. To this end, a multi-stage hybrid optimization algorithm is proposed to solve the problem. Finally, the proposed model has been implemented on the Isfahan city network and the results have been reported.

Keywords: Routing, cash transportation, multigraph network, time-dependent traffic, travel risk