

مسیریابی و زمانبندی وسائل نقلیه سبز با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس در قالب کالاهای مرجوعی

رضا علیزاده فروتن^۱، جواد رضائیان^۲، ایرج مهدوی^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

^۲ دانشیار و عضو هیأت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و فناوری، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

^۳ استاد و عضو هیأت علمی گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و فناوری، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

چکیده

مسأله مسیریابی وسائل نقلیه عبارت است از یافتن مجموعه‌ای از مسیرهای بهینه برای ناوگانی معلوم از وسائل نقلیه به طوری که با پیمودن آن‌ها تقاضای مجموعه‌ای از مشتریان مفروض را برآورده نمایند. این مسأله و گسترش‌های پر شمار آن از مهمترین و پرکاربردترین مسائل حوزه حمل و نقل و لجستیک می‌باشند که هم از نقطه نظر تنوری و هم در جایگاه عمل همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صاحبان صنایع بوده‌اند. در این تحقیق مسأله مسیریابی و زمانبندی وسائل نقلیه سبز با ناوگان ناهمگن با در نظر گرفتن کالاهای مرجوعی به همراه زودکرد و دیرکرد وزنی به منظور برقراری توازن میان هزینه‌های عملیاتی و محیطی و کمینه کردن توأمان آنها بررسی شده است. در این راستا یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط ارائه و با حل یک مثال بدیهی توسط نرم افزار LINGO 9.0 حل و اعتبارسنجی شده است.

واژه‌های کلیدی: مسیریابی و زمانبندی وسائل نقلیه سبز، ناوگان ناهمگن، لجستیک معکوس، الگوهای ترافیکی وابسته به زمان، زودکرد و دیرکرد وزنی.

۱- مقدمه

امروزه مسائل حمل و نقل از مهمترین و کاربردی ترین مسائل مطرح در حوزه لجستیک و مدیریت زنجیره تأمین می باشند. در همین راستا طراحی شبکه‌های توزیع کالا و خدمات به عنوان یکی از مهمترین سطوح این حیطه همواره مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و صاحبان صنایع بوده است. یکی از مهمترین، پرکاربردترین و در عین حال عمومی‌ترین مسائل در زمینه حمل و نقل، مسأله مسیریابی و مسائل نقلیه^۱ می باشد. این مسأله نخستین بار در اواخر دهه ۵۰ میلادی توسط (دانتریگ و رامزر، ۱۹۵۹) مطرح شد و از آن زمان تا به امروز گسترش‌های متعدد و روش‌های حل گوناگونی برای آن ارائه گردیده است. مسأله VRP یک مسأله بهینه سازی ترکیباتی^۲ و برنامه ریزی عدد صحیح می باشد که به دنبال یافتن مجموعه ای از مسیرهای بهینه برای ناوگانی معلوم از وسائل نقلیه می باشد تا با پیمودن این مسیرها تقاضای مجموعه ای از مشتریان را برآورده سازند. ثابت گردیده این مسأله در کلاس مسائل NP-Hard^۳ قرار دارد.

امروزه لجستیک سبز در مفهوم عام خود و لجستیک معکوس به شکل خاص آن به معنای بازگشت دوباره کالاها از مصرف‌کنندگان به فرایند لجستیک در راستای توسعه پایدار، حفظ کیفیت محیط زیست و پایداری استراتژی‌های تأمین و توزیع بطور فزاینده ای مورد توجه دولتها، صاحبان کسب و کار، صنعتگران و دانشگاهیان قرار گرفته است. بدینسان به منظور طراحی و اجرای سیستم‌های لجستیکی و نیز حمل و نقل به عنوان بخش اصلی این سیستمها، علاوه بر هزینه‌ها و عوامل اقتصادی مرسوم، ملاحظات محیطی نیز مد نظر قرار می گیرند. در مراجعه به ادبیات موضوع با گستره بسیار متنوعی از مسائل سبز روبرو می شویم. از نخستین تلاش‌ها در این زمینه می توان از مقاله (بلومهورف-رووارد و دیگران، ۱۹۹۵) و نیز (دانیل و دیگران، ۱۹۹۷) نام برد. مسأله GVRP^۴ با هدف ایجاد هماهنگی میان هزینه‌های عملیاتی و محیطی از سال ۲۰۰۶ به کانون توجه محققان بدل گشته و از موضوعات مطرح و مورد توجه در سالهای اخیر بوده است. برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه عبارتند از: (کارا و دیگران، ۲۰۰۷)، (فیگلیوزی، ۲۰۱۰)، (اردوغان و میلر- هوکس، ۲۰۱۲) و (گائور و مودگال، ۲۰۱۳).

این مسأله در مرور گسترده ای که توسط (لین و دیگران، ۲۰۱۴) بر ادبیات موضوع انجام گرفت به سه دسته عمده تقسیم گردید: G-VRP که با بهینه سازی مصرف انرژی در حمل و نقل سر و کار دارد، PRP^۵ که کمینه سازی میزان آلودگی و نشر گازهای گلخانه ای را مد نظر قرار می دهد و VRPRL^۶ که بر جنبه توزیع در لجستیک معکوس متمرکز است.

مسأله PRP علاوه بر اهداف معمول اقتصادی مسأله VRP، با هدف کمینه سازی میزان نشر گازهای آلاینده در سالهای اخیر به وفور مورد مطالعه پژوهشگران بوده است: (فیگلیوزی، ۲۰۱۲) و (فرانچسکتی و دیگران، ۲۰۱۳). (بکتاش و لاپورت، ۲۰۱۱) یک مسأله PRP را با هدف کمینه کردن همزمان هزینه کل مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه ای با هزینه دستمزد راننده‌ها ارائه نمودند. (دمیر و دیگران، ۲۰۱۲) مسأله ارائه شده قبلی را با افزودن محدودیت سرعت گسترش دادند؛ آنها همچنین توسعه دیگری بر مسأله PRP با هدف کمینه کردن میزان مصرف سوخت و مجموع زمانهای طی شده بر کل مسیرها معرفی نمودند (دمیر و دیگران، ۲۰۱۴). (کک و دیگران، ۲۰۱۵) یک الگوریتم تکاملی ترکیبی را برای حداقل نمودن هزینه‌های مصرف سوخت، انتشار گاز دی اکسید کربن (CO₂)، کل دستمزد رانندگان و مجموع هزینه‌های ثابت در ناوگانی ناهمگن ارائه دادند. (فیگلیوزی، ۲۰۱۰) علاوه بر هزینه خودروها و هزینه انتشار، مجموع مسافت طی شده و نیز زمان‌های طی شده بر مسیر را کمینه نمود. از جدیدترین تلاش‌ها در این حوزه می توان به مسأله زمانبندی و مسیریابی وسیله نقلیه سبز یا GVRSP^۷ که در سال ۲۰۱۵ توسط (ژیانو و کوناک، ۲۰۱۵) معرفی شد اشاره کرد. آنها تابعی چند هدفه را با هدف اصلی حداقل نمودن انتشار گاز CO₂ ارائه کرده و آنرا با رویکردی سلسله مراتبی حل نمودند.

1 Vehicle routing problem (VRP)

2 Combinatorial

3 Non-deterministic polynomial time-Hard

4 Green VRP

5 Pollution routing problem

6 VRP with reverse logistics

7 Green vehicle routing and scheduling problem

پژوهش پیش رو به توسعه مسأله زمانبندی و مسیریابی وسایل نقلیه سبز به منظور ایجاد موازنه‌ای میان هزینه‌های محیطی و عملیاتی با هدف کمینه کردن همزمان آنها خواهد پرداخت. در این مقاله ملاحظات محیط زیستی در قالب کمینه کردن میزان انتشار گاز CO₂ و بیشینه کردن میزان جمع‌آوری کالاهای مرجوعی در چارچوب لجستیک معکوس مد نظر قرار گرفته اند. ناوگان حمل و نقل متشکل از خودروهای ناهمگن^۱ می‌باشد. زودکرد و دیرکرد در برآورده ساختن تقاضای مشتریان منجر به در نظر گرفتن جریمه‌ای متناسب با اهمیت آنان خواهد شد (جریمه وزنی)؛ همچنین برای محاسبه سرعت وسایل نقلیه از الگوهای ترافیکی وابسته به زمان^۲ استفاده می‌گردد. بر طبق این الگوها فرض بر این است که افق برنامه ریزی به تعدادی بازه زمانی برابر تقسیم می‌گردد. در عمل، سرعت حرکت وسایل نقلیه در محیط‌های شهری و بعضاً برون شهری، بسته به تراکم ترافیک که در ساعات مختلف روز متفاوت می‌باشد متغیر است. بدین سبب در تحقیق حاضر سرعت حرکت وسایل نقلیه در هر بازه زمانی بر هر کمان (فاصله میان دو گره) ثابت و برابر میانگین سرعت حرکت طی آن بازه زمانی بر آن کمان می‌باشد.

۲- مدل پیشنهادی

در این بخش مدل ریاضی پیشنهادی در قالب یک مسأله برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط ارائه می‌گردد. در ادامه پیش از ارائه مدل، نخست به معرفی مفروضات مسأله، اندیس‌ها، پارامترهای ورودی و متغیرهای تصمیم‌گیری پرداخته می‌شود.

۲-۱- مفروضات مسأله

- ناوگان حمل و نقل متشکل از خودروهای ناهمگن می‌باشد.
- تنها یک نوع کالا عرضه می‌گردد؛ تقاضای همه مشتری‌ها قطعی بوده و همگی باید برآورده گردد.
- در سرویس دهی به مشتریان تنها می‌توان از وسایل نقلیه موجود استفاده کرد.
- تقاضای هر مشتری باید توسط یک وسیله نقلیه و در یک ملاقات برآورده گردد.
- هیچ کدام از تقاضاهای مشتری‌ها نباید بیشتر از ظرفیت مجاز برای سرویس دهنده‌ها باشد. به عبارت دیگر برای هر $1 \leq i \leq n$ حداقل یک عدد i وجود داشته باشد به طوری که تقاضای مشتری i ام کوچکتر یا مساوی با ظرفیت وسیله نقلیه i ام می‌باشد ($Q_i \leq C_i$).
- هیچ وسیله نقلیه‌ای مجاز نیست در طول مسیر بیش از ظرفیت خود بارگذاری کند.
- هر وسیله نقلیه در ابتدا و انتهای مسیر خود باید در انبار (گره صفر) باشد.
- هر وسیله نقلیه مجاز است یک کمان را در چند بازه زمانی طی کند.
- وسایل نقلیه در هر گره مجاز به توقف می‌باشند، اما در صورت جدا شدن از هر گره و شروع به حرکت بر یک کمان این اجازه را نخواهند داشت و باید کمان مذکور را بدون وقفه تا انتها طی نمایند.
- سرعت هر وسیله نقلیه بر هر کمان وابسته به بازه زمانی حرکت وسیله نقلیه بر آن کمان می‌باشد.
- سرعت هر وسیله نقلیه در هر بازه زمانی بر هر کمان ثابت و برابر میانگین سرعت حرکت در آن بازه زمانی بر کمان مورد نظر می‌باشد.
- وزن وسایل نقلیه در طی مسیر، بسته به میزان بار در حال حمل متغیر می‌باشد.
- هر گونه زودکرد و یا دیرکرد در خدمات رسانی به مشتریان منجر به جریمه‌هایی متناسب با وزن آنان می‌گردد.

۲-۲- اندیس‌ها

- i : اندیس گره‌ها (انبار با صفر نشان داده می‌شود)، $i = 0, 1, \dots, n$

1 Heterogeneous

2 Time-dependent traffic patterns

- l : اندیس نوع وسیله نقلیه، $l = 1, 2, \dots, p$
- k : اندیس هر بازه زمانی، $k = 1, 2, \dots, m$

۲-۳- پارامترهای ورودی

- N : مجموعه همه گره ها شامل انبار، $i \in N$ ؛ (انبار با $i = 0$ نشان داده می شود).
 - A : مجموعه کمان ها که هر کدام از دو گره تشکیل می شوند، $(i, j) \in A, \forall i, j \in N, i \neq j$
 - N_l : تعداد وسائل نقلیه نوع l ام، $l \in P$
 - C_l : ظرفیت وسیله نقلیه نوع l ام
 - W_l : وزن وسیله نقلیه نوع l ام
 - Q_i : مقدار (تعداد) تقاضای مشتری i ام
 - D_{ij} : مسافت کمان (i, j)
 - K : مجموعه بازه های زمانی، $k \in K$
 - ε_{ij}^{lk} : نرخ نشر گاز CO_2 به ازای واحد مسافت پیموده شده بر کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام، (g/km)
 - LC_{ij}^{lk} : فاکتور تصحیح بار برای وسیله نقلیه نوع l ام که در بازه زمانی k ام بر کمان (i, j) حرکت می کند
 - φ_i : ضریب جریمه دیرکرد برای مشتری i ام
 - δ_i : ضریب جریمه زودکرد برای مشتری i ام
 - α_l : هزینه متغیر طی یک واحد مسافت توسط وسیله نقلیه نوع l ام
 - c : هزینه واحد مصرف سوخت
 - ω : هزینه واحد انتشار گاز CO_2
 - F_l : هزینه ثابت وسیله نقلیه نوع l ام
 - LD : حداقل مسافت مورد نیاز جهت طی شدن، اگر کمان (i, j) برای پیموده شدن توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام انتخاب گردد
 - v_{ij}^k : سرعت ثابت حرکت وسائل نقلیه بر کمان (i, j) در بازه زمانی k ام
 - s_{1i} : زمان تخلیه واحد بار در گره i ام
 - s_{2i} : زمان بارگیری واحد بار در گره i ام
 - b_k : زمان شروع بازه زمانی k ام
 - e_k : زمان اتمام بازه زمانی k ام
 - DT_i : موعد تحویل کالا مشتری i ام
 - β : سود حاصل از مرجوع نمودن یک واحد کالا
 - R_i : میزان کالاهای قابل مرجوع شدن از گره i ام
 - w : وزن یک واحد کالا
 - M : یک عدد بسیار بزرگ
- ۲-۴- متغیرهای تصمیم گیری
- Z : مقدار تابع هدف

- X_{ij}^l : اگر کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام پیموده شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر
- x_{ij}^{lk} : اگر کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام پیموده شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر
- y_{ij}^l : مقدار (تعداد) کالاهای جدیدی که وسیله نقلیه نوع l ام هنگام سفر بر کمان (i, j) حمل می کند
- r_{ij}^l : مقدار (تعداد) کالاهای مرجوعی که وسیله نقلیه نوع l ام هنگام سفر بر کمان (i, j) حمل می کند
- BIN_{ij}^l : اگر r_{ij}^l بزرگتر از صفر باشد برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر
- d_{ij}^{lk} : مسافت طی شده از کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام
- t_{ij}^{lk} : زمان سفر بر کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام
- l_i : زمان خروج (جدا شدن) وسیله نقلیه از گره i ام
- a_i : زمان ورود وسیله نقلیه به گره i ام
- T_i : میزان دیرکرد در گره i ام
- E_i : میزان زودکرد در گره i ام
- ρ_{ij}^l : نرخ مصرف سوخت وسیله نقلیه نوع l ام به ازای واحد مسافت طی شده بر کمان (i, j)
- y_i : میزان کالای مرجوعی جمع آوری شده از گره i ام

۲-۵- مدل ریاضی

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^m (\varepsilon_{i0}^{lk} \cdot (1 - BIN_{i0}^l) \cdot d_{i0}^{lk} + \varepsilon_{i0}^{lk} \cdot BIN_{i0}^l \cdot LC_{i0}^{lk} \cdot d_{i0}^{lk} + \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij}^{lk} \cdot LC_{ij}^{lk} \cdot d_{ij}^{lk}) \cdot \omega \\ & + \sum_{l=1}^p \sum_{j=1}^n F_l \cdot X_{0j}^l + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{l=1}^p \sum_{k=1}^m (\alpha_l + c \cdot \rho_{ij}^l) \cdot d_{ij}^{lk} - \beta \cdot \sum_{i=0}^n y_i + \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot T_i \\ & + \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot E_i \end{aligned} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n X_{ij}^l = 1 \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n X_{ij}^l = 1 \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ij}^l - \sum_{i=0}^n X_{ji}^l = 0 \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall l \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{0j}^l \leq N_l \quad \forall l \in P \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ij}^l - \sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n y_{ji}^l = Q_j \quad \forall j \in N \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$Q_j \cdot X_{ij}^l \leq y_{ij}^l \leq (C_l - Q_i) \cdot X_{ij}^l \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n r_{ji}^l - \sum_{l=1}^p \sum_{i=0}^n r_{ij}^l = y_j \quad \forall j \in N \setminus \{0\}, \forall l \in P \quad (8)$$

$$r_{ij}^l \leq (C_l - Q_j) \cdot X_{ij}^l \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P \quad (9)$$

$$y_{ij}^l + r_{ij}^l \leq C_l \quad \forall i, j \in N, i \neq j, \forall l \in P \quad (10)$$

$$y_i \leq R_i \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$X_{ij}^l \geq x_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (12)$$

$$X_{ij}^l \leq \sum_{k=1}^m x_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P \quad (13)$$

$$D_{ij} \cdot X_{ij}^l = \sum_{k=1}^m d_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P \quad (14)$$

$$LD \cdot x_{ij}^{lk} \leq d_{ij}^{lk} \leq D_{ij} \cdot x_{ij}^{lk} \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (15)$$

$$t_{ij}^{lk} = d_{ij}^{lk} / v_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (16)$$

$$l_i \leq e_k \cdot x_{ij}^{lk} - t_{ij}^{lk} + e_m \cdot (1 - x_{ij}^{lk}) \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (17)$$

$$a_j \geq b_k \cdot x_{ij}^{lk} + t_{ij}^{lk} - e_m \cdot (1 - x_{ij}^{lk}) \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P, \forall k \in K \quad (18)$$

$$a_i + s_{1i} \cdot Q_i + s_{2i} \cdot y_i \leq l_i \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (19)$$

$$a_0 \leq e_m \quad (20)$$

$$a_j \geq l_i + \sum_{k=1}^m t_{ij}^{lk} - e_m \cdot (1 - X_{ij}^l) \quad \forall (i, j) \in A, \forall l \in P \quad (21)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n t_{ij}^{ik} \leq e_k - b_k \quad \forall l \in P, \forall k \in K \quad (22)$$

$$x_{jj'}^{ik} \leq 2 - x_{ij}^{ik'} - X_{ij}^l \quad \forall i, j, j' \in N \setminus \{0\}, \forall l \in P, \forall k, k' \in K; k < k' \quad (23)$$

$$T_i = \max(a_i - DT_i, 0) \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (24)$$

$$E_i = \max(DT_i - a_i, 0) \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (25)$$

$$r_{ij}^l \geq BRY_{i0}^l \quad \forall i \in N, j = 0, \forall l \in P \quad (26)$$

$$X_{ij}^l \geq BRY_{i0}^l \quad \forall i \in N, j = 0, \forall l \in P \quad (27)$$

$$r_{ij}^l \cdot X_{ij}^l \leq BRY_{ij}^l \cdot M \quad \forall i \in N, j = 0, \forall l \in P \quad (28)$$

$$X_{ij}^l, x_{ij}^{ik}, BRY_{i0}^l \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A, l \in P, k \in K \quad (29)$$

$$y_{ij}^l, d_{ij}^{lk}, t_{ij}^{lk}, l_i, a_i, T_i, E_i \geq 0 \quad \forall i, j \in N, l \in P, k \in K \quad (30)$$

تابع هدف پیشنهادی (رابطه ۱) به دنبال کمینه سازی همزمان هزینه های محیطی و عملیاتی می باشد. از اینرو جمله اول این تابع، میزان هزینه مجموع نشر گاز دی اکسید کربن توسط ناوگان حمل و نقل را کمینه می نماید؛ جمله دوم هزینه های ثابت ناوگان حمل و نقل را محاسبه می نماید. جمله سوم با کمینه کردن هزینه های متغیر ناوگان از جمله هزینه مصرف سوخت به طور همزمان به منظور بهینه سازی هزینه های عملیاتی و محیطی مورد استفاده قرار می گیرد. جمله چهارم کل سود ناشی از مرجوع نمودن کالاهای بازگشتی را بدست می دهد و در نهایت عبارات پنجم و ششم به ترتیب سعی در کمینه سازی مجموع دیرکردها و زودکردها در راستای تحویل به موقع تقاضا به مشتری ها و به تبع آن کاهش هزینه های عملیاتی ناشی از عدم تحویل به هنگام کالاها دارند. محدودیت های (۲) و (۳) به ترتیب تضمین می کنند هر گره به جز مبدأ تنها یک ورودی و تنها یک خروجی داشته باشد. محدودیت (۴) ابراز می دارد هر وسیله نقلیه ای که به گره j (ام $j \neq 0$) وارد می شود حتماً باید از آن خارج شود. این قید در واقع پیوستگی مسیرها را تضمین می کند. رابطه (۵) محدودیت تعداد وسائل نقلیه از هر نوع را نشان می دهد. محدودیت (۶) ضمانت می کند که تقاضای هر مشتری حتماً به طور کامل برآورده شود. قید (۷) نشان می دهد که محدودیت ظرفیت هر وسیله نقلیه برای حمل تقاضای مشتری ها رعایت می شود. محدودیت (۸) میزان کالای جمع آوری شده از هر مشتری را تعیین می کند. محدودیت (۹) تضمین کننده رعایت ظرفیت هر وسیله نقلیه برای حمل کالاهای مرجوعی می باشد. محدودیت (۱۰) تضمین می کند که مجموع بار در حال حمل توسط هر وسیله نقلیه بر هر کمان نباید بیش از ظرفیت آن وسیله باشد. قید (۱۱) حد بالای میزان کالای جمع آوری شده از هر مشتری را مشخص می کند. محدودیت (۱۲) عنوان می کند که برای طی شدن مسیر (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام، نخست باید این مسیر برای پیموده شدن توسط وسیله نقلیه نوع l ام انتخاب گردد. محدودیت (۱۳) بیان می کند در صورتی که مسیر (i, j) برای پیموده شدن توسط وسیله نقلیه نوع l ام انتخاب گردد این مسیر می تواند در حداقل یک و حداکثر K بازه زمانی طی شود. دو محدودیت اخیر به همراه هم متغیرهای X_{ij}^l و x_{ij}^{ik} را با یکدیگر سازگار می کنند. محدودیت (۱۴) تضمین می کند که اگر مسیری برای پیموده شدن توسط یک نوع وسیله نقلیه انتخاب گردد، آن مسیر حتماً باید تا انتها طی شود. قید (۱۵) متغیر d_{ij}^{lk} را با متغیر x_{ij}^{ik} سازگار می کند؛ همچنین حداقل و حداکثر مسافتی که می تواند طی شود در

صورتی که مسیر (i, j) برای پیموده شدن توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام انتخاب گردد را مشخص می نماید. محدودیت (۱۶) زمان سفر بر کمان (i, j) توسط وسیله نقلیه نوع l ام در بازه زمانی k ام را تعیین می کند. محدودیت های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب زمان های خروج وسیله نقلیه از هر گره و نیز ورود آن به هر گره را در هر کدام از بازه های زمانی مشخص می نمایند. محدودیت (۱۹) اطمینان حاصل می کند که زمان خروج از هر گره حتماً پس از زمان ورود به آن به علاوه زمان سرویس دهی به مشتری در آن گره باشد. زمان سرویس دهی در هر گره برابر مجموع زمانهای تخلیه و بارگیری در آن گره می باشد. قید (۲۰) بیان می کند که زمان بازگشت به انبار نباید از زمان اتمام آخرین بازه زمانی تجاوز نماید. محدودیت (۲۱) زمان ورود به گره j ام را محاسبه می کند. سه محدودیت اخیر به همراه یکدیگر از ایجاد زیر تورها^۱ جلوگیری خواهند کرد. محدودیت (۲۲) ضمانت می کند که هر بازه زمانی بیش از اندازه مورد استفاده قرار نگیرد. محدودیت (۲۳) نشان می دهد اگر وسیله نقلیه l ام در بازه زمانی k' کمان (i, j) را طی نماید، نمی تواند کمانهایی که مبدأ آنها گره j ام می باشد را در بازه زمانی k ام بطوریکه $k < k'$ باشد را بپیماید. از محدودیت های (۲۴) و (۲۵) به ترتیب برای محاسبه میزان دیرکرد و زودکرد در تحویل تقاضا به هر مشتری استفاده می گردد. سه قید (۲۶-۲۸) به اتفاق هم مقدار متغیر باینری BRY_{i0}^l را حساب می کنند. با توجه به رابطه مورد استفاده برای محاسبه میزان انتشار گاز CO_2 در پژوهش حاضر، یکی از عوامل تأثیرگذار در میزان نشر، وجود یا عدم وجود بار در وسیله نقلیه در حال حرکت می باشد. از اینرو و با توجه به مفروضات مسأله امکان عدم وجود بار تنها بر آخرین کمان از هر مسیر یعنی کمانی که منتهی به مبدأ می شود وجود خواهد داشت؛ بدین سبب برای محاسبه صحیح میزان گاز منتشر شده و هزینه متناظر با آن، تعریف متغیر باینری نامبرده برای ایجاد تمایز میان حالت های وجود و یا عدم وجود بار در وسائل نقلیه بر کمان های منتهی به مبدأ ضروری می باشد. و در نهایت روابط (۲۹) و (۳۰) دامنه متغیرهای تصمیم را مشخص می کنند.

۲-۶- محاسبه میزان نشر گاز CO_2

در تحقیق پیش رو روش محاسبه نشر حمل و نقل و مصرف انرژی (MEET) که توسط (هیگمن و دیگران، ۱۹۹۹) برای وسائل نقلیه سنگین معرفی و توسعه داده شده مبنای محاسبه میزان نشر گاز CO_2 قرار گرفته است. تابع رگرسیون معرفی شده در این روش عبارت است از:

$$\varepsilon = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (a)$$

که در آن ε نرخ نشر بر حسب گرم بر کیلومتر برای یک وسیله نقلیه بدون بار (و یا یک اتوبوس یا مینی بوس با بار میانگین) بر جاده ای با شیب ۰٪ می باشد. K ثابت، $a-f$ ضرایب و v میانگین سرعت وسیله نقلیه بر حسب کیلومتر بر ساعت می باشد. (هیگمن و دیگران، ۱۹۹۹) همچنین ثابت ها و ضرایب بکار رفته در این تابع را برای چهار دامنه مختلف از وزن کل وسائل نقلیه سنگین (۷.۵-۳.۵ تن، ۱۶-۷.۵ تن، ۳۲-۱۶ تن، ۴۰-۳۲ تن) محاسبه نموده است. بر اساس روش (MEET) میزان نشر بدست آمده از رابطه (a) با توجه به شیب جاده، میزان بار و مسافت طی شده به صورت زیر اصلاح می گردد:

$$F = \varepsilon \cdot GC \cdot LC \cdot D \quad (b)$$

که در آن F نرخ نشر اصلاح شده، GC ضریب تصحیح شیب، LC ضریب تصحیح بار و D مسافت طی شده می باشند. از آنجایی که در این تحقیق شیب جاده ۰٪ (شرایط استاندارد) در نظر گرفته شده رابطه (b) برای واحد مسافت ($D=1$) به صورت ذیل بیان خواهد گردید:

1 Sub-tours

$$F = \varepsilon \cdot LC \quad (c)$$

در نتیجه نرخ نشر اصلاح شده برای وسیله نقلیه حامل بار (F)، برابر خواهد بود با نرخ نشر اولیه برای وسیله نقلیه خالی (ε) ضربدر ضریب تصحیح بار (LC) که بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$LC = \kappa + ny + py^2 + qy^3 + rv + sv^2 + tv^3 + \frac{u}{v} \quad (d)$$

در رابطه فوق LC ضریب تصحیح بار، κ ثابت، $n - u$ ضرایب، γ درصد شیب جاده و v میانگین سرعت وسیله نقلیه بر حسب کیلومتر بر ساعت می باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق شیب جاده ۰٪ در نظر گرفته شده رابطه (d) به صورت زیر در نظر گرفته خواهد شد:

$$LC = \kappa + rv + sv^2 + tv^3 + \frac{u}{v} \quad (e)$$

همچنین ثابت و ضرایب بکار گرفته شده در این رابطه نیز برای چهار گروه وزنی متفاوت از وسائل نقلیه سنگین که پیشتر از آنها نام برده شد توسط (هیگمن و دیگران، ۱۹۹۹) مشخص گردیده است.

۲-۷- محاسبه میزان مصرف سوخت

(ژیائو و دیگران، ۲۰۱۲) با استفاده از داده های آماری گزارش منتشر شده توسط وزارت کشور، زیرساخت، حمل و نقل و گردشگری ژاپن نتیجه گرفته اند که میزان مسافت طی شده توسط وسیله نقلیه به ازای واحد حجم سوخت با وزن وسیله نقلیه نسبت عکس دارد. آنها با استفاده از این داده ها یک رابطه رگرسیون خطی را برای محاسبه نرخ مصرف سوخت توسط وسیله نقلیه بر اساس وزن آن فرمولبندی نمودند:

$$Y = 0.0000793X - 0.026 \quad (f)$$

در این رابطه که در تحقیق حاضر مبنای محاسبه میزان مصرف سوخت قرار گرفته است X وزن وسیله نقلیه به کیلوگرم و Y نرخ مصرف سوخت بر حسب لیتر بر کیلوگرم می باشد. لازم به ذکر است برای هر وسیله نقلیه بر هر کمان، X شامل وزن خودرو به علاوه وزن مجموع کالاهایی (اعم از جدید یا بازگشتی) که در حال حمل آنان است می باشد.

۳- اعتبارسنجی

به منظور درک بهتر مدل پیشنهادی و اثبات درستی آن، در این بخش نتایج حاصل از حل یک مثال بدیهی ارائه شده، در سه مرحله بررسی و با یکدیگر مقایسه می گردند. برای کدنویسی و حل این مثال از نرم افزار LINGO 9.0 استفاده شده است. مدل ارائه شده در این تحقیق، برای برنامه ریزی و زمانبندی ناوگان حمل و نقل به طور همزمان و در چارچوب مسأله ای سبز

فرمولبندی شده است؛ بدین معنی که محدودیت های مدل با وجود ارتباط تنگاتنگ با یکدیگر از سه بخش مجزا از هم تشکیل شده اند: (۱) محدودیت های مرتبط با برنامه ریزی، (۲) محدودیت های مرتبط با زمانبندی و (۳) محدودیت های مربوط به هزینه های محیطی. با توجه به این موضوع، به منظور اعتبارسنجی و احراز صحت کارکرد فرمولبندی ارائه شده، مدل ریاضی پیشنهادی را به زیر-مدلهایی^۱ مستقل از هم ساده سازی^۲ نموده، در هر مرحله صحت هر کدام از زیر-مسائل^۳ را به طور جداگانه نشان داده و در نهایت صحیح بودن مدل ریاضی مسئله اصلی را اثبات می نماییم. در این راستا، در ادامه برای اثبات درستی بخش برنامه ریزی مدل، آنرا به مدل مسیریابی وسائل نقلیه شامل مدیریت بازگشتی ها تقلیل می دهیم و مسئله جدید را (۱-۳) می نامیم. پس از اطمینان یافتن از صحت کارکرد بخش مسیریابی مدل، آنرا در چارچوب سبز بررسی می کنیم (مسئله ۲-۳)؛ و سرانجام با افزودن باقیمانده جملات تابع هدف و محدودیت ها صحت مدل ریاضی پیشنهادی را در قالب کامل آن یعنی مسیریابی و زمانبندی توأمان (مسئله ۳-۳) مورد ارزیابی قرار می دهیم. جملات تابع هدف، محدودیت ها و روابط مورد استفاده در هر کدام از این مسائل در جدول (۱) دسته بندی گردیده اند.

جدول شماره ۱. مشخصات زیر-مدل های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی مدل

زیر مدل	جملات تابع هدف	محدودیت ها	روابط
مسئله ۱-۳	۲,۳,۴	۲-۱۱, ۲۹-۳۰	f
مسئله ۲-۳	۱,۲,۳,۴	۲-۱۱, ۲۶-۳۰	a, d, f
مسئله ۳-۳	۱,۲,۳,۴,۵,۶	۲-۳۰	a, d, f

در ادامه داده های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی در جدول (۲) فهرست شده اند. نتایج حاصل از حل مسئله ۱-۳ در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به ظرفیت وسائل نقلیه موجود در ناوگان حمل و نقل، مشهود است که تنها یک راه برای تأمین تمامی تقاضاها وجود دارد و آن همانگونه که در جواب نیز مشاهده می شود تخصیص مشتری های اول و سوم به وسائل نقلیه نوع اول و مشتری چهارم به وسیله نقلیه نوع دوم می باشد. در نتیجه مسیره های ۰-۱-۰ و ۰-۳-۰ (از چپ به راست) به طور حتم شکل خواهند گرفت. از میان مسیره های احتمالی ۰-۲-۴-۰ و ۰-۴-۲-۰ یکی باید انتخاب گردد. با توجه به ماهیت تابع هدف که همزمان با تأمین تقاضاها در پی حداکثر کردن سود حاصل از بازگشت کالاهای مرجوعی نیز می باشد، انتخاب مسیر ۰-۴-۲-۰ که در حل مدل پیشنهادی نیز مشاهده می گردد یگانه انتخاب بهینه است.

جدول شماره ۲. داده های مورد استفاده جهت اعتبارسنجی مدل

$i=1, \dots, 5$ (مبدأ $i=1$)		$\varphi_i=0, 100, 200, 300, 200$	
$l=1, 2$	$k=1, 2$	$\delta_i=0, 50, 100, 150, 100$	
$N_i=2, 1$	$LD=5$	$S_{1i}=0, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001$	
$W_i=4000, 8000$		$S_{2i}=0, 0.001, 0.001, 0.001, 0.001$	
$C_i=400, 800$		$b_k=0, 2$	$e_k=2, 4$
$F_i=1000, 2000$		$L_k=(e_k-b_k)=2, 2$	

1 Sub-models

2 Relaxation

3 Sub-problems

$Q_i = 0, 350, 300, 400, 460$		$DT_i = 0, 0.75, 0.75, 3, 1.5$	
$R_i = 0, 30, 520, 420, 40$		$D_{ij} =$ ۰ ۱۰ ۱۰ ۲۰ ۱۵ ۱۰ ۰ ۱۵ ۱۵ ۳۰ ۱۰ ۱۵ ۰ ۱۵ ۱۵ ۲۰ ۱۵ ۱۵ ۰ ۳۰ ۱۵ ۳۰ ۱۵ ۳۰ ۰	
$\alpha = 2.5, 4$	$c = 10$		
$\beta = 100$	$w = 10$		
$\omega = 0.3$	$M = 10^8$		
$v_{ij}^k =$ ۰.۰۰۱ ۰.۰۰۱ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۸۰ ۰.۰۰۱ ۰.۰۰۱ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۵۰ ۰.۰۰۱ ۰.۰۰۱ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۵۰ ۰.۰۰۱ ۰.۰۰۱ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۵۰ ۶۰ ۸۰ ۶۰ ۸۰ ۰.۰۰۱ ۰.۰۰۱			

همانگونه که مشاهده می گردد وجود دو متغیر y_i و ρ_{ij}^l به ترتیب در جملات دوم و سوم تابع هدف مسأله ۳-۱ که اولی سعی در حداکثر نمودن میزان کالاهای مرجوعی جمع آوری شده و دومی سعی در کاهش این میزان دارند در تقابل با یکدیگر می باشد. بنابراین انتظار می رود که با کاهش قابل ملاحظه مقدار β مقادیر y_i ها نیز کاهش یابد. بدین سبب در چندین تکرار هر بار مقدار β را کاهش داده تا نتایج حاصل از این تغییر را بر مقادیر بهینه بازگشتی ها مشاهده نماییم. نتایج حاصل از این آزمایش به روشنی صحت عملکرد این دو جمله از تابع هدف در تعامل با یکدیگر را به اثبات می رساند. همچنین همانگونه که از نتایج موجود در جدول (۳) پیداست، محدودیت های ۲ الی ۱۱ همگی به درستی وظایف مربوطه را انجام داده و به دقت فرمولبندی شده اند.

جدول شماره ۳. نمایش عددی جواب مسأله (۳-۱)

$X_{01}^1 = 1$	$y_{01}^1 = 350$	$r_{01}^1 = 0$	مسیر ۰-۱-۰
$X_{10}^1 = 1$	$y_{10}^1 = 0$	$r_{10}^1 = 30$	
$X_{03}^1 = 1$	$y_{03}^1 = 400$	$r_{03}^1 = 0$	مسیر ۰-۳-۰
$X_{30}^1 = 1$	$y_{30}^1 = 0$	$r_{30}^1 = 400$	
$X_{04}^2 = 1$	$y_{04}^2 = 760$	$r_{04}^2 = 0$	مسیر ۰-۴-۲-۰
$X_{42}^2 = 1$	$y_{42}^2 = 300$	$r_{42}^2 = 40$	
$X_{20}^2 = 1$	$y_{20}^2 = 0$	$r_{20}^2 = 560$	

با افزودن بخش های دیگری به مسأله ۳-۱ (به جدول (۱) رجوع گردد)، اکنون نوبت به ارزیابی مسأله ۳-۲ یا همان مسیریابی وسائل نقلیه در چارچوب ملاحظات سبز می رسد. با توجه به ماهیت جمله اضافه شده به تابع هدف انتظار می رود با ثابت نگه داشتن پارامتر β و افزایش پارامتر ω مقادیر y_i کاهش یابند. با انجام این آزمایش همانگونه که قابل پیش بینی است با افزایش چشمگیر هزینه های ناشی از نشر گاز دی اکسید کربن که وابسته به حمل بار می باشند از یک طرف و ثابت نگه داشتن عایدی حاصل از کالاهای بازگشتی از سوی دیگر تمایل به عدم مرجوع نمودن این کالاها بیشتر می شود.

سرانجام با افزودن باقیمانده جملات تابع هدف و محدودیت ها، صحت مدل ریاضی پیشنهادی را در قالب کامل آن یعنی مسیریابی و زمانبندی وسائل نقلیه سبز (مسأله ۳-۳) بررسی می نماییم. نتایج بدست آمده از حل مدل در جداول ۴ و ۵ به نمایش در آمده است.

جدول شماره ۴. جواب های مسأله مسیریابی و زمانبندی همزمان (۱)

$x(i, j, l)$	$x(i, j, l, k)$	$d(i, j, l, k)$
$x(0,1,1) = 1$	$x(0,1,1,2) = 1$	$d(0,1,1,2) = 10$
$x(0,3,1) = 1$	$x(0,3,1,2) = 1$	$d(0,3,1,2) = 20$
$x(0,4,2) = 1$	$x(0,4,2,1) = 1$	$d(0,4,2,1) = 15$
$x(1,0,1) = 1$	$x(1,0,1,2) = 1$	$d(1,0,1,2) = 10$
$x(2,0,2) = 1$	$x(2,0,2,1) = 1$	$d(2,0,2,1) = 10$

جدول شماره ۴ (ادامه). جواب های مسأله مسیریابی و زمانبندی همزمان (۱)

$x(3,0,1) = 1$	$x(3,0,1,2) = 1$	$d(3,0,1,2) = 20$
$x(4,2,2) = 1$	$x(4,2,2,1) = 1$	$d(4,2,2,1) = 15$
$t(i, j, l, k)$	$y(i, j, l)$	$r(i, j, l)$
$t(0,1,1,2) = 0.125$	$y(0,1,1) = 350$	$r(0,1,1) = 0$
$t(0,3,1,2) = 0.4$	$y(0,3,1) = 400$	$r(0,3,1) = 0$
$t(0,4,2,1) = 0.25$	$y(0,4,2) = 760$	$r(0,4,2) = 0$
$t(1,0,1,2) = 0.125$	$y(1,0,1) = 0$	$r(1,0,1) = 0$
$t(2,0,2,1) = 0.167$	$y(2,0,2) = 0$	$r(2,0,2) = 560$

$t(3,0,1,2) = 0.25$	$y(3,0,1) = 0$	$r(3,0,1) = 400$
$t(4,2,2,1) = 0.25$	$y(4,2,2) = 300$	$r(4,2,2) = 40$

جدول شماره ۵. جواب های مسأله مسیریابی و زمانبندی همزمان (۲)

i	l_i	a_i	E_i	T_i
۰	۴	۰	۰	۰
۱	۲.۱۲۵	۳.۸۷۵	۰	۱.۳۷۵
۲	۱	۱.۸۳۳	۰	۰.۲۵
۳	۲.۹۵	۳.۷۵	۰.۰۵	۰
۴	۰.۲۵	۰.۷۵	۱.۲۵	۰

همانطور که قابل پیش بینی است جوابهای این مسأله در بخش مسیریابی هیچ تفاوتی با مسأله (۱-۳) ندارد. با افزوده شدن اندیس k در مسأله اصلی و با توجه به جواب های بدست آمده، صحت عملکرد محدودیت های وابسته به بازه های زمانی که در این مرحله به مسأله اضافه شدند قابل مشاهده می باشد. و در نهایت جهت ارزیابی جملات پنجم و ششم تابع هدف، با ثابت نگه داشتن تمامی ضرایب مورد استفاده در این تابع، یکبار φ_i ها و بار دیگر δ_i ها را بطور قبل ملاحظه ای افزایش می دهیم. همانطور که انتظار می رود در نوبت اول $\sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot T_i$ و در نوبت دوم $\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot E_i$ برابر با صفر خواهند شد. همچنین با افزایش φ_2 در برابر φ_4 و با توجه به مقادیر $DT_2 = 0.75$ و $DT_4 = 1.5$ ، مطابق انتظار تنها تغییر ممکن در مسیریابی مسأله رخ خواهد داد و مسیر $0-2-4-0$ به عنوان مسیر جدید بهینه جایگزین مسیر $0-4-2-0$ خواهد شد. مقایسه میان سه مثال ارائه شده یعنی مسأله مسیریابی، مسأله مسیریابی سبز و مسأله مسیریابی و زمانبندی سبز نمونه ای از مقایسه نتایج مسائل متعدد حل شده در اندازه کوچک از این دست می باشد که در نهایت نشان می دهد که مدل ریاضی ارائه شده به صورت صحیح و مناسب فرمولبندی شده است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق مسأله مسیریابی و زمانبندی وسائل نقلیه سبز با ناوگان ناهمگن شامل لجستیک معکوس در قالب کالاهای مرجوعی به همراه زودکرد و دیرکرد وزنی با هدف ایجاد توازن میان اهداف عملیاتی و محیطی و نیز کمینه کردن همزمان آنها مورد بررسی قرار گرفت. این مسأله در قالب یک مدل برنامه ریزی غیر خطی عدد صحیح مختلط فرمولبندی و سپس مسأله ای در ابعاد کوچک با استفاده از نرم افزار LINGO 9.0 در فرایندی سه مرحله ای حل و اعتبارسنجی گردید که با توجه به نتایج بدست آمده، صحت و درستی مدل پیشنهادی احراز گشت. از آنجایی که اکثر مسائل دنیای واقعی مسائلی در ابعاد بزرگ هستند، در جهت هر چه کاربردی تر شدن مدل ارائه شده استفاده از الگوریتم های فراابتکاری و نیز الگوریتم های ترکیبی برای حل مسائل با ابعاد بزرگتر در مطالعات آتی پیشنهاد می گردد. همچنین در طرح مسأله مواردی همچون در نظر گرفتن

انبارهای چندگانه^۱، داشتن چند نوع کالای متفاوت، وجود انبارهای موقت و سکوها^۲ باراندازی^۳ در طول مسیر و نیز امکان تأمین تقاضای هر مشتری با بیش از یک بار ملاقات توسط ناوگان حمل و نقل می تواند دستمایه تحقیقات آینده قرار گیرند. در نهایت توسعه مسأله از یک سیستم لجستیکی تک سطحی به یک زنجیره تأمین چند سطحی، گسترشی مناسب و کاربردی برای مسأله حاضر خواهد بود.

منابع

1. A.Franceschetti, D. Honhon, T.V. Woensel, G. Laporte, T. Bektas. The time-dependent pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 56, (2013), 265–293.
2. A.J. Hickman, D. Hassel, R. Joumard, Z. Samaras, S. Sorenson. “Methodology for calculating transportation emissions and energy consumption”, *Transport research laboratory*, 22, (1999), 69–73.
3. Ç. Koç, T. Bektaş, O. Jabali, G. Laporte. A hybrid evolutionary algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with time windows. *Computers & Operations Research*, 64, (2015), 11.27.
4. C. Lin, K.L Choy, G.T.S. Ho, S.H Chung, H.Y Lam. Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4)(p1), (2014), 1118–1138.
5. D. R. Gaur, A. Mudgal, R. R. Singh. Routing vehicles to minimize fuel consumption. *Operations Research Letters*, 41(6), (2013), 576–580.
6. E. Demir, T. Bektaş, G. Laporte. An adaptive large neighborhood search heuristic for the Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 223(2), (2012), 346–359.
7. E. Demir, T. Bektaş, G. Laporte. The bi-objective Pollution-Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, 232(3), (2014), 464–478.
8. G. B. Dantzig, J. H. Ramser. The truck dispatching problem. *Management Science*, 6(1), (1959), 80-91.
9. I. Kara, B.Y. Kara, M.K. Yetis. Energy minimizing vehicle routing problem. *Combinatorial Optimization and Applications*, 4616, (2007), 62–71.
10. J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2), (1981). 221–227.
11. J. M. Bloemhof-Ruwaard, P. Van Beek, L. Hordijk, L. N. Van Wassenhove. Interactions between operational research and environmental management. *European Journal of Operational Research*, 85(2), (1995), 229–243.
12. M.A. Figliozzi. The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3), (2012), 616-636.
13. M.A. Figliozzi. Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2197, (2010) 1–7.

1 Multi-depot
2 Cross-docks

14. M.A. Figliozzi. Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2197, (2010) 1–7.
15. S. E. Daniel, D. C. Diakoulaki, C.P. Pappis. Operations research and environmental planning. *European Journal of Operational Research*, 102(2), (1997), 248–263.
16. S. Erdoğan, E. Miller-Hooks. A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), (2012), 100–114.
17. T. Bektas, G. Laporte. The Pollution-Routing Problem. *Transportation Research Part B*, 45(8), (2011), 1232–1250.
18. The ministry of land, infrastructure, transport and tourism of Japan website, (accessed 02.08.16). <http://www.mlit.go.jp/common/000037099.pdf>
19. Y. Xiao, A. Konak. A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing & scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness. *Applied Soft Computing*, 34, (2015), 372–388.
20. Y. Xiao, Q. Zhao, I. Kaku, Y. Xu. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(7), (2012), 1419–1431.

Green vehicle routing and scheduling problem with heterogeneous fleet including reverse logistics in the form of returned goods

Reza Alizadeh Foroutan*, Javad Rezaeian*, Iraj Mahdavi*

**Department of Industrial Engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran*

Abstract

Vehicle routing problem (VRP) is about finding optimal routes for a fixed fleet of vehicles in order that they can meet the demands of a set of given customers by traveling through those paths. This problem and its numerous expands are one of the most important and most applicable problems of transportation and logistics realm, either from theoretical or practical point of view. It has always been interested by scholars and industry owners. In this research, green vehicle routing and scheduling problem with heterogeneous fleet considering returned goods along with weighted earliness and tardiness has been studied to establish a trade-off between operational and environmental costs and to minimize both simultaneously. In this regard, first, a mixed integer non-linear programming (MINLP) model was proposed; and then, its accuracy and correct functioning were evaluated by solving an example with evident answer using LINGO 9.0.

Keywords: Green vehicle routing and scheduling, Heterogeneous fleet, Reverse logistics, Time-dependent traffic patterns, Weighted earliness and tardiness
