

طراحی شبکه توزیع لجستیک شهری سبز با استفاده از نظریه ی صف

فرشاد سعیدی^۱، ابراهیم تیموری^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

^۲ دانشیار مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده

اخیراً شهرنشینی در دنیا گسترش سریعی داشته است و تعدادی از کلان شهرها با جمعیت بیشتر از ۱۰ میلیون ظاهر شده اند. مشکلات زیادی به دلیل جمعیت انبوه در کلان شهرها به وجود آمده است از جمله ازدحام ترافیک، آلودگی هوا، تصادفات و مصرف بالای انرژی. برای سیستم توزیع لجستیک و حمل و نقل شهری، به عنوان یک بخش مصرف کننده قابل توجه انرژی و آلوده کننده، صرفه جویی در انرژی و کاهش آلاینده ها بخصوص در کلان شهرهای با جمعیت انبوه بسیار مهم است. در این تحقیق، سعی بر این است که ضمن بیان مفاهیم و تعاریف مربوطه، بطور اجمالی، مطالعات قبلی صورت گرفته در حوزه ی مدل سازی لجستیک شهری بررسی گردیده و چالش ها و کمبودهای موجود شناسایی شود. سپس، با توجه به شکاف های تحقیقاتی موجود، یک مدل ریاضی دوهدفه جهت طراحی شبکه ی توزیع لجستیک شهری به منظور حداقل سازی هزینه های اقتصادی و زیست محیطی و نیز حداقل سازی زمان پاسخ ارایه گردیده است. تقاضای کالاها احتمالی در نظر گرفته شده و مدل سازی شبکه مبتنی بر نظریه ی صف است. همچنین در مدل ارایه شده از سیاست در نظر گرفتن مالیات بر کربن و نیز به کارگیری منابع با انتشار کربن پایین جهت استقرار در مراکز توزیع شهری استفاده شده است. در ادامه، به منظور صحت سنجی مدل یک مثال عددی تولید و نتایج حاصل از حل مدل با روش محدودیت افسیلون و نیز تحلیل حساسیت های لازم ارایه گردیده است. در نهایت، نتایج کلی تحقیق و پیشنهادات آتی که می توانند مورد توجه قرار گیرند بیان شده است.

واژه های کلیدی: لجستیک شهری، توزیع بار شهری، انتشار کربن، مراکز توزیع شهری، طراحی و برنامه ریزی شبکه، نظریه ی صف.

۱- مقدمه

بر طبق پژوهش سازمان ملل متحد، تقریباً یک‌دوم کل جمعیت هفت‌میلیاردی جهان در سال ۲۰۱۰ در مناطق شهری زندگی می‌کردند و تخمین زده می‌شود این رقم به بیش از ۶۰ درصد در سال ۲۰۳۰ و بیش از ۷۰ درصد در سال ۲۰۵۰ برسد. تعدادی از کلان‌شهرها با جمعیت بیشتر از ۱۰ میلیون ظاهر شده‌اند و مشکلات زیادی به دلیل جمعیت انبوه در کلان‌شهرها به وجود آمده است از جمله ازدحام ترافیک، آلودگی هوا، تصادفات و مصرف بالای انرژی. پیشرفت‌های لجستیکی مانند خرده‌فروشی به‌موقع و هوشمند، فروشندگان را علاقه‌مند به پایین نگه‌داشتن سطح موجودی می‌کند تا موجب صرفه‌جویی در هزینه انبارش گردد. این عوامل، تعداد تحویل‌های کالاها را افزایش و اندازه آن‌ها را کاهش داده‌اند که در نهایت منجر به افزایش تعداد کیلومترهایی شده است که وسایل نقلیه در مناطق شهری طی می‌کنند. وسایل نقلیه تحویل بار، بسته به نوع آلاینده‌ها، ۱۶ تا ۵۰ درصد موجب انتشار آلاینده‌های هوا می‌شوند. تمامی این مشکلات که به دلیل جابجایی کالاها در شهری به وجود آمده‌اند، ما را مجبور می‌سازند که درباره چگونگی طرح‌ریزی شهرهای خود تفکر کنیم تا این اثرات منفی را بدون به مخاطره انداختن نیازهای شهروندان به کالاها کاهش دهیم. برای پرداختن به این موضوعات چالش‌برانگیز، مفهوم لجستیک شهری مطرح شد (تانیگوچی و همکاران^۱، ۲۰۰۱). راهکارهای لجستیک شهری می‌توانند در حل این مشکلات پیچیده مؤثر باشند زیرا لجستیک شهری چندین هدف به علاوه رفتار چندین ذینفع را که در فعالیت‌های لجستیک شهری مشارکت دارند، در نظر می‌گیرد که فراهم‌کننده پایه‌های شهرهای پایدار و قابل‌زیست است (تانیگوچی و همکاران، ۲۰۱۴). در این راستا، چندین اقدام سیاستی با استفاده از مدل‌های زیادی در تعدادی از شهرهای جهان به اجرا درآمده و ارزیابی شده است (تانیگوچی و همکاران، ۲۰۱۵).

در این تحقیق، یک مدل ریاضی دوهدفه جهت طراحی شبکه‌ی توزیع لجستیک شهری به منظور حداقل‌سازی هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و نیز حداقل‌سازی زمان پاسخ‌ارایه گردیده است. ساختار شبکه به نحوی است که کالاها از طریق سه سطح منتقل خواهند شد؛ سطح اول مراکز لجستیکی اطراف شهر، سطح دوم مراکز توزیع در درون شهر و سطح سوم نیز پایانه‌های فروش، به عنوان نقاط تقاضا. در واقع هدف مسأله انتخاب تعدادی سایت ثابت برای احداث مراکز توزیع شهری است. علاوه بر آن، به تصمیم‌گیری در مورد اینکه ظرفیت مراکز توزیع به چه میزان باشد و اینکه تخصیص این مراکز توزیع به مراکز لجستیکی و تخصیص پایانه‌های فروش به مراکز توزیع باید چگونه باشد، نیاز خواهد بود. تقاضای کالاها احتمالی در نظر گرفته شده و مدل‌سازی شبکه مبتنی بر نظریه‌ی صف است. همچنین در مدل‌ارایه شده از سیاست در نظر گرفتن مالیات بر کربن و نیز به‌کارگیری منابع با انتشار کربن پایین جهت استقرار مراکز توزیع شهری استفاده شده است. به منظور صحت‌سنجی مدل یک مثال عددی تولید و نتایج حاصل از حل مدل با روش محدودیت اِپسیلون و نیز تحلیل حساسیت‌های لازم‌ارایه گردیده است. تحلیل نتایج تحقیق بیانگر آن است که مدل پیشنهادی در این مقاله در برآورده کردن اهداف خود بسیار کارا است. در نهایت، جمع‌بندی کلی و پیشنهادهای جهت تحقیقات آتی ارایه شده است.

۲- ادبیات تحقیق

اصطلاحات و تفاسیر بسیاری بجای یکدیگر استفاده شده تا این مفهوم را مورد بررسی قرار دهد (ولپرت و همکاران^۲، ۲۰۱۲)؛ بنابراین، لجستیک شهری باید در وسیع‌ترین مفهوم آن در نظر گرفته شود. مثال‌هایی برای روشن کردن گستره تفاسیر موجود ارایه شده است.

■ لجستیک شهری به حمل‌ونقل بار در مناطق شهری اشاره می‌کند و مشخصاً، جریان‌های باری وابسته به تأمین کالاها به مراکز شهری (بارسلو^۳، ۲۰۰۵).

^۱ Taniguchi et al

^۲ Wolpert et al

^۳ Barceló

- لجستیک شهری «مسیریابی و جابجایی کالا در سراسر حالت‌های حمل‌ونقل و نیز فعالیت‌های وابسته مانند انبارداری، تبادل اطلاعات برای مدیریت کالاها در هر یک از پایان سفرهای آن را در برمی‌گیرد» (یانگ^۱، ۲۰۰۵).
- لجستیک شهری مفهومی است که سعی در بهینه‌سازی سیستم‌های حمل‌ونقل شهری بار، با در نظر گرفتن تمام ذینفعان و جابجایی‌ها در مناطق شهری دارد (کرنیک و همکاران^۲، ۲۰۰۹).
- "هرگونه ارائه خدمات که به مدیریت بهینه جابجایی کالاها در شهرها کمک می‌کند (دابلاک^۳، ۲۰۰۷).
- فرایند بهینه‌سازی کامل لجستیک و فعالیت‌های حمل‌ونقلی توسط شرکت‌های خصوصی با کمک سیستم‌های اطلاعاتی پیشرفته در مناطق شهری با توجه به محیط ترافیکی، تراکم ترافیکی، ایمنی ترافیک و صرفه‌جویی انرژی در چهارچوب اقتصاد بازار" تعریف می‌شود (تانیگوچی و همکاران، ۲۰۰۱).
- اهداف لجستیک شهری را می‌توان به سه دسته‌ی اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تقسیم کرد (تانیگوچی و همکاران، ۲۰۱۵). از منظری دیگر، لجستیک شهری در رابطه با تحرک‌پذیری، پایداری، زیست‌پذیری و انعطاف‌پذیری نیز چندین هدف را دنبال می‌کند:
 - تحرک‌پذیری: جریان هموار و یکپارچه کالاها در راه‌اندازی سیستم‌های حرکتی کالاهای شهری موردنیاز است. کاهش تراکم ترافیک در نیل به این هدف مؤثر خواهد بود. افزایش قابلیت اطمینان حمل‌ونقل شهری کالا در رابطه با اتصال و زمان‌های سفر، همواره توسط شرکت‌های حمل‌ونقل و لجستیک درخواست می‌شود.
 - پایداری: اثرات منفی زیست‌محیطی مانند آلودگی هوا، آلودگی صوتی و ارتعاشات ناشی از کامیون‌ها باید به حداقل برسد.
 - زیست‌پذیری: مسائل امنیتی و ایمنی برای جوامع منطقه‌ای از بیشترین اهمیت برخوردارند، زیرا شهروندان در جستجوی شرایط زندگی سالم و آرامی هستند.
 - انعطاف‌پذیری: اخیراً انعطاف‌پذیری در بلایای طبیعی و انسانی اهمیت بیشتری یافته است. توزیع کمک‌های امدادی آب، غذا و کالاهای روزمره به مردم آواره در پناهگاه‌ها بعد از بلایا، نیاز به عملکرد کارآمد و سریع لجستیک بشردوستانه^۴ دارد.
- لجستیک شهری موضوع تازه‌ای است و برای اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط تنیگوچی^۵ مطرح گردید. از آن زمان تاکنون کارهای زیادی در این حوزه انجام گرفته و محققان و پژوهشگران زیادی به بیان دیدگاه‌ها و نقطه‌نظرات خود پرداخته‌اند؛ اما با این وجود، در خصوص مدل‌سازی ریاضی لجستیک شهری مدل‌های زیادی ارائه نشده‌اند و آن دسته از مدل‌های ارائه شده نیز چندان توسعه نیافته‌اند. به منظور مرور، بررسی و شناسایی ادبیات موضوع و مدل‌سازی‌های انجام گرفته در حوزه‌ی لجستیک شهری، چندین پژوهش و تحقیق مروری توسط محققان مختلف ارائه شده است که از جمله‌ی آنها می‌توان به کارهای اناند^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۲، پژوهش تنیگوچی و همکاران در سال ۲۰۱۴، مقاله‌ی اناند و همکاران در سال ۲۰۱۵، مقاله مونوزوری^۷ و پابلو^۸ در سال ۲۰۱۲ و کار وولپرت^۹ و ریوتر^{۱۰} در سال ۲۰۱۲ اشاره کرد.
- بیشتر مدل‌های ریاضی ارائه شده در مقالات اخیر به بررسی مسائل مسیریابی وسایل نقلیه در موارد مطالعاتی مختلف و با اهداف هزینه‌ای و زیست‌محیطی پرداخته‌اند. تعدادی از مقالات نیز، سعی در طراحی شبکه لجستیک شهری در مواقع بحران و فاجعه داشته‌اند و به نوعی موضوع لجستیک شهری را به لجستیک اورژانسی ارتباط داده‌اند (هی و همکاران^{۱۱}، ۲۰۰۱). سیستم‌های ترافیک معمولاً در نتیجه‌ی بحران مختل می‌شوند و راه‌های مؤثر ادامه‌ی خدمات توزیع باید برای حالت‌هایی که

1 Yang

2 Crainic et al

3 Dablanc

4 humanitarian logistics

5 Taniguchi

6 Anand

7 Muñuzuri

8 Pablo

9 Wolpert

10 Reuter

11 He et al.

ظرفیت سیستم ترافیک شهری کاهش می‌یابد تشخیص داده شود. البته، بهینه‌سازی مکان تسهیلات لجستیک در کلان‌شهرها نه تنها در وضعیت بحران مهم است بلکه در هر زمانی به دلیل تأثیر قدرتمند آن بر استفاده از زمین و جریان ترافیک و پیامدهای جانبی ناخواسته‌ای مانند تراکم ترافیک و آلودگی هوا نیز مهم است (دورن و میلر^۱، ۲۰۱۲).

بررسی مقالات موجود در این حوزه نشان می‌دهد بیشتر از نقطه‌نظر مدیران و مسؤولان شهری به مسائل نگاه شده است. همچنین اهداف پایدار و سبز در چند سال اخیر مورد توجه نویسندگان مقالات بوده که غالباً از برنامه‌ریزی خطی ریاضی برای مدل‌سازی مسائل استفاده کرده‌اند. از جمله‌ی این موارد می‌توان به کارهای جیانوا یانگ^۲ و همکارانش در سال ۲۰۱۳ و عبدالحمید متوکل^۳ و همکارانش در سال ۲۰۱۵ اشاره داشت.

به‌منظور پایدارسازی شهرها، پروژه‌ها و نوآوری‌های متعددی برای بهبود لجستیک شهری پیاده‌سازی شده‌اند. هدف اصلی آن‌ها، کاهش ترافیک موتوری و در نتیجه کاهش انتشار گازهای CO₂ و گازهای گلخانه‌ای در مناطق شهری بوده که این امر عمدتاً به سه روش صورت گرفته است: تثبیت جریان کالاها، وسایل نقلیه با آلایندگی کم و وضع مقررات قوانین کنترل دسترسی به مراکز شهری. تثبیت کالاها که عمدتاً مبتنی بر استفاده از یک مرکز توزیع است، به نظر می‌رسد راه‌حل مناسبی برای بهینه‌سازی تحویل نهایی در درون شهر باشد (تانگچی و همکاران، ۲۰۱۵). تسهیلات تثبیت برای مفاهیم لجستیک شهری، توسط برخی از نویسندگان بسیار مفید تلقی می‌شوند. باین‌حال، اصطلاح واحد و منسجمی وجود ندارد که این‌گونه تسهیلات تثبیتی را توصیف نماید. برای مثال کرینیک^۴ به مراکز توسعه شهری اشاره می‌کند، درحالی‌که دابلانس^۵ آن‌ها را پایانه‌های باری شهری می‌داند. علاوه بر این اصطلاحات دهکده توزیع و مراکز توزیع بار شهری نیز استفاده شده‌اند (تانگچی و همکاران، ۲۰۱۵).

۳- بیان مسأله و مدل‌سازی ریاضی

در شهر، تقاضاهای فروشگاه‌های زنجیره‌ای یا تجارت الکترونیک اغلب از طریق عملیات توزیع لجستیک شهری انجام می‌شود. این کار معمولاً، از طریق شرکت‌های لجستیکی طرف سوم (3PLs)^۶ انجام می‌گیرد. این شرکت‌ها کالاها را از مراکز لجستیکی (LC)^۷ که در اطراف شهر قرار گرفته‌اند جمع‌آوری می‌کنند و سپس آن‌ها را به منظور انجام فرآیندهای بیشتر (ذخیره‌سازی، بسته‌بندی، بارکدگذاری، برش، مخلوط کردن، ترکیب، بارگیری، تخلیه و غیره) به مراکز توزیع (DC)^۸ انتخابی انتقال می‌دهند. در نهایت این کالاها به طور وسیع بین پایانه‌های فروش (ST)^۹ توزیع می‌شوند.

در این تحقیق در مورد مسأله مکان‌یابی و تخصیص در شبکه توزیع لجستیک شهری تصمیم‌گیری خواهد شد. در واقع هدف مسأله انتخاب تعدادی سایت ثابت برای احداث مراکز توزیع شهری است. با توجه به محدودیت هزینه‌های سرمایه، تعدادی کمی از مراکز توزیع می‌توانند احداث شوند و از این مراکز فعال شده فقط تعدادی مشخص با حمایت‌های دولت با تسهیلات کم‌کربن مجهز خواهند شد (مانند تجهیزات گران‌قیمتی که گاز طبیعی مایع را به عنوان سوخت مصرف می‌کنند یا ساختارهای پیچیده‌تر در طراحی مراکز توزیع با نرخ بهینه کربن). علاوه بر آن، مانند مسائل رایج مکان‌یابی تسهیلات، به تصمیم‌گیری در مورد اینکه چه مقدار کالا از مراکز توزیع شهری باید به پایانه‌های فروش تحویل داده شود نیاز خواهد بود و اینکه تخصیص این پایانه‌ها به مراکز توزیع و تخصیص مراکز توزیع به مراکز لجستیکی باید چگونه باشد. همچنین با توجه به سیاست‌های مالیات بر کربن که از طرف دولت و مدیران شهری اعمال می‌شود، باید هزینه‌ی انتشار گازهای گلخانه‌ای حاصل از پردازش کالاها در

1 Duren and Miller

2 Jianhua Yang

3 Abdelhamid Moutaoukil

4 Crainic

5 Dablanc

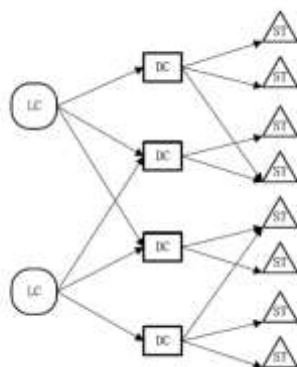
6 third-Party Logistics providers

7 Logistic Centers

8 Distribution Centers

9 Sales Terminals

مرکز توزیع و نیز عملیات حمل و نقل توسط وسایل نقلیه در شبکه در نظر گرفته شود. هدف نهایی کمینه کردن هزینه‌های عملیاتی کل و نیز کمینه کردن زمان پاسخ است. در این شبکه، گره‌های شبکه نقش سرور و کالاها نقش مشتری دارند. در گره‌های شبکه عملیاتی مانند تولید، ذخیره‌سازی، بسته‌بندی، بارکدگذاری، برش، مخلوط کردن، ترکیب، بارگیری، تخلیه، مرتب‌سازی، پردازش و تحویل انجام می‌گیرد. این خدمات به کالاها به عنوان مشتری ارایه می‌شود. شرایط حاکم بر مسأله همراه با عدم قطعیت است؛ تحت چنین شرایطی، تقاضا برای کالا و زمان خدمت‌دهی احتمالی در نظر گرفته شده است.



شکل شماره ۱. شبکه توزیع لجستیک شهری [۱۴]

۳-۱- علائم و پارامترها

I	مجموعه‌ی مراکز لجستیکی و اندیس $i \in I$
J	مجموعه‌ی سایت‌های کاندید شده جهت احداث مراکز توزیع شهری و اندیس $j \in J$
K	مجموعه‌ی پایانه‌های فروش (نقاط تقاضا) و اندیس $k \in K$
R	مجموعه‌ی کالاها یا محصولات و اندیس $r \in R$
TC	کل هزینه‌ی عملیاتی ^۱ در شبکه
RT	زمان پاسخ سیستم ^۲
D_k^r	تقاضای کالای نوع r مربوط به پایانه فروش k
d_{ij}	فاصله بین مرکز لجستیکی i و مرکز توزیع j
d_{jk}	فاصله بین مرکز توزیع j و پایانه فروش k
f_j	واحد هزینه ثابت احداث مرکز توزیع j
B	کل بودجه در دسترس جهت احداث مراکز توزیع شهری
v_j^r	واحد هزینه پردازش درون مرکز توزیع j برای کالای نوع r
t_j^r	واحد هزینه حمل و نقل کالای نوع r از مرکز توزیع j به هر پایانه‌ی فروش
s_i^r	واحد هزینه حمل و نقل کالای نوع r از مرکز لجستیکی i به هر مرکز توزیع
pe_j	واحد میزان انتشار کربن از همه مراحل پردازش در مرکز توزیع j
te_j	واحد میزان انتشار کربن وسایل نقلیه از مرکز توزیع j به هر پایانه فروش
e_i	واحد میزان انتشار کربن وسایل نقلیه از مرکز لجستیکی i به هر مرکز توزیع
U_i	ظرفیت تأمین کالا مربوط به مرکز لجستیکی i

1 Total Cost

2 Response Time

تعداد مراکز توزیع برنامه‌ریزی شده برای احداث	W
تعداد منابع با انتشار کربن پایین که باید به مراکز توزیع تخصیص یابد.	V
نرخ مالیات بر کربن	a
درصد کاهش انتشار کربن در هر مرکز توزیع که در آن منابع با کربن پایین در نظر گرفته شده است	b
آهنگ ورود تقاضا در گره‌های شبکه $(\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k)$	λ
آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه (μ_i, μ_j, μ_k)	μ
پارامتر یک توزیع نمایی منفی جهت بیان نرخ وقوع تقاضا	δ
حد پایین یک متغیر تصادفی توزیع یکنواخت که مقدار تقاضا را مشخص می‌کند	c
حد بالای یک متغیر تصادفی توزیع یکنواخت که مقدار تقاضا را مشخص می‌کند	d
زمان پاسخ سیستم برای کالای نوع I که از مرکز لجستیکی I از طریق مرکز توزیع J به پایانه‌ی فروش k می‌رسد.	t_{ijk}^r
میانگین زمان حضور کالای نوع I در سیستم	WT_{sys}^r
میانگین زمان انتظار کالا نوع I در صف	WT_q^r
میانگین تعداد کالا در سیستم	LR_{sys}
میانگین تعداد کالا در صف	LR_q
زمان حمل‌ونقل برای کالای نوع I از مرکز لجستیکی I به مرکز توزیع J	TR_{ij}^r
زمان حمل‌ونقل برای کالای نوع I از مرکز توزیع J به پایانه‌ی فروش k	TR_{jk}^r
میانگین سرعت حمل‌ونقل برای کالاهای نوع I که از مرکز لجستیکی I به مرکز توزیع J منتقل می‌شوند	v_{ij}^r
میانگین سرعت حمل‌ونقل برای کالاهای نوع I که از مرکز توزیع J به پایانه‌ی فروش k منتقل می‌شوند	v_{jk}^r

۳-۲- متغیرهای تصمیم

مقدار کالای نوع I که از مرکز لجستیکی I به مرکز توزیع J حمل می‌شود	x_{ij}^r
برابر ۱ اگر مرکز توزیع J راه‌اندازی شود در غیر این صورت برابر صفر	Z_j
ظرفیت پردازش طراحی شده در مرکز توزیع J	C_j
برابر ۱ اگر منابع با کربن پایین به مرکز توزیع J تخصیص یابد در غیر این صورت برابر صفر	P_j
برابر ۱ اگر کالای نوع I از مرکز لجستیکی I به مرکز توزیع J تحویل داده شود، در غیر این صورت برابر صفر	y_{ij}^r
برابر ۱ اگر کالای نوع I از مرکز توزیع J به پایانه‌ی فروش k تحویل داده شود در غیر این صورت برابر صفر	y_{jk}^r

۳-۳- مدل ریاضی

$$\begin{aligned}
 \text{Min } TC = & \left[\sum_j f_j C_j Z_j + \sum_j \sum_k \sum_r v_j^r E(D_k^r) y_{jk}^r + \sum_j \sum_k \sum_r t_j^r E(D_k^r) d_{jk} y_{jk}^r \right. \\
 & \left. + \sum_i \sum_j \sum_r s_i^r x_{ij}^r d_{ij} \right] \\
 & + a \left[\sum_j (1 - b P_j) p e_j \sum_k \sum_r E(D_k^r) y_{jk}^r + \sum_j \sum_k \sum_r t e_j E(D_k^r) d_{jk} y_{jk}^r \right. \\
 & \left. + \sum_i \sum_j \sum_r e_i x_{ij}^r d_{ij} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{Min } RT = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_r t_{ijk}^r \tag{2}$$

$$y_{ij}^r \leq Z_j \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \tag{3}$$

$$y_{jk}^r \leq Z_j \quad \forall j \in J, k \in K, r \in R \tag{4}$$

$$x_{ij}^r \leq M \cdot y_{ij}^r \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \tag{5}$$

$$P_j \leq Z_j \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$C_j \leq M \cdot Z_j \quad \forall j \in J \tag{7}$$

$$C_j \geq \sum_k \sum_r E(D_k^r) y_{jk}^r \quad \forall j \in J \tag{8}$$

$$\sum_j C_j \geq \sum_k \sum_r E(D_k^r) \tag{9}$$

$$C_j \geq \sum_i \sum_r x_{ij}^r \quad \forall j \in J \tag{10}$$

$$\sum_j C_j \geq \sum_i \sum_j \sum_r x_{ij}^r \tag{11}$$

$$\sum_j \sum_r x_{ij}^r \leq U_i \quad \forall i \in I \tag{12}$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r x_{ij}^r \leq \sum_i U_i \tag{13}$$

$$\sum_j E(D_k^r) y_{jk}^r \geq E(D_k^r) \quad \forall k \in K, r \in R \tag{14}$$

$$\sum_i x_{ij}^r \geq \sum_k E(D_k^r) y_{jk}^r \quad \forall j \in J, r \in R \tag{15}$$

$$\sum_i \sum_r x_{ij}^r \geq \sum_k \sum_r E(D_k^r) y_{jk}^r \quad \forall j \in J \tag{16}$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij}^r \geq \sum_j \sum_k E(D_k^r) y_{jk}^r \quad \forall r \in R \quad (17)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_r x_{ij}^r \geq \sum_k \sum_r E(D_k^r) \quad (18)$$

$$\sum_{j \in J} f_j z_j \leq B \quad \forall i, j, r \quad (19)$$

$$\sum_j z_j \leq W \quad (20)$$

$$\sum_j P_j \leq V \quad (21)$$

$$\sum_j \sum_r y_{ij}^r \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (22)$$

$$\sum_k \sum_r y_{jk}^r \geq z_j \quad \forall j \in J \quad (23)$$

$$\sum_i y_{ij}^r = z_j \quad \forall j \in J, r \in R \quad (24)$$

$$\sum_j y_{jk}^r = 1 \quad \forall k \in K, r \in R \quad (25)$$

$$t_{ijk}^r = WT_i^r + WT_j^r + WT_k^r + TR_{ij}^r + TR_{jk}^r \quad (26)$$

$$P_j y_{ij}^r, y_{jk}^r = 0, 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, r \in R \quad Z_j \quad (27)$$

$$x_{ij}^r \geq 0 \cap x_{ij}^r \in Z \quad \forall i \in I, j \in J, r \in R \quad (28)$$

$$C_j \geq 0 \cap C_j \in Z \quad \forall j \in J \quad (29)$$

تابع هدف اول کل هزینه‌ی عملیاتی را کمینه می‌کند. هزینه کل عملیات شامل دو بخش است. بخش اول هزینه کل عملیات بدون در نظر گرفتن هزینه مالیات بر کربن است. بخش دوم هزینه مالیات بر کربن است که به خاطر اجرای سیاست مالیات بر کربن تحمیل شده است. بخش اول شامل چهار آیتم است: هزینه ثابت ساخت مرکز توزیع، کل هزینه متغیر پردازش در مرکز توزیع، هزینه کل تحویل از مراکز توزیع به پایانه‌های فروش و هزینه کل حمل‌ونقل از مراکز لجستیکی به مراکز توزیع. بخش دوم شامل سه آیتم است. هزینه کربن ناشی از مراحل پردازش درون مرکز توزیع، هزینه تحویل از مرکز توزیع به پایانه فروش، و هزینه حمل‌ونقل از مرکز لجستیکی به مرکز توزیع. تابع هدف دوم نیز کل زمان پاسخ در شبکه را کمینه می‌کند.

محدودیت شماره‌ی (۳) و (۴) بیان می‌کنند تا زمانی که یک مرکز توزیع احداث نشده باشد، نمی‌تواند به فعالیت‌های توزیع بپیوندد. محدودیت شماره (۵) بیان می‌کند که فقط زمانی مقداری کالای مشخص از مرکز لجستیکی مشخص به مرکز توزیع مشخص تحویل داده خواهد شد که ارتباط بین آن مرکز لجستیکی و مرکز توزیع برقرار شده باشد. محدودیت شماره (۶) بیان می‌کند که فقط مراکز توزیع فعال شده با منابع و تجهیزات با کربن پایین مجهز خواهند شد. محدودیت شماره (۷) بیان می‌کند که تنها مراکز توزیع فعال شده دارای ظرفیت خواهند بود. محدودیت شماره (۸) بیان می‌کند که ظرفیت هر مرکز توزیع باید بزرگ‌تر یا مساوی کل جریان خروجی از آن باشد. محدودیت شماره (۹) بیان می‌کند که مجموع ظرفیت همه‌ی مراکز توزیع باید بزرگ‌تر یا مساوی مجموع کل تقاضاهای پایانه‌های فروش باشد. محدودیت شماره (۱۰) بیان می‌کند که ظرفیت هر مرکز توزیع باید بزرگ‌تر یا مساوی کل جریان ورودی به آن باشد؛ محدودیت شماره (۱۱) بیان می‌کند که مجموع ظرفیت همه‌ی مراکز توزیع باید بزرگ‌تر یا مساوی مجموع کل جریانی باشد که از همه‌ی مراکز لجستیکی به همه‌ی مراکز

توزیع منتقل می‌شود؛ یعنی مراکز توزیع برای جای گرفتن همه کالاهای حمل شده از مراکز لجستیکی به اندازه کافی بزرگ هستند. محدودیت‌های (۱۲) و (۱۳) به توانایی تأمین کالا توسط مرکز لجستیکی اشاره دارند؛ محدودیت شماره (۱۲) نشان می‌دهد که کل مقدار کالایی که از هر مرکز لجستیکی به مراکز توزیع منتقل می‌شود باید از ظرفیت آن مرکز لجستیکی کمتر باشد. محدودیت شماره (۱۳) نیز نشان می‌دهد که مجموع کل مقدار کالایی که از مراکز لجستیکی به مراکز توزیع منتقل می‌شود باید از مجموع ظرفیت مراکز لجستیکی کمتر باشد. محدودیت شماره (۱۴) بیان می‌کند که مجموع جریان‌های کالایی نوع مشخص I که از همه مراکز توزیع به هر پایانه‌ی فروش وارد می‌شود، باید تقاضای کالای نوع I آن پایانه‌ی فروش را برآورده سازد. محدودیت شماره (۱۵) نشان می‌دهد که به ازای هر کالا میزان جریان ورودی به هر مرکز توزیع بزرگ‌تر مساوی جریان خروجی از آن باشد. محدودیت شماره (۱۶) بیان می‌کند که کل جریان ورودی به یک مرکز توزیع بزرگ‌تر مساوی کل جریان خروجی از آن باشد. محدودیت شماره (۱۷) بیان می‌کند که به ازای هر کالا مجموع جریان‌هایی که از همه مراکز لجستیکی خارج می‌شود بزرگ‌تر مساوی مجموع تقاضاهای همه مراکز توزیع باشد. محدودیت شماره (۱۸) نشان می‌دهد که کل جریان‌های خروجی از مراکز لجستیکی باید کل میزان تقاضاهای پایانه‌های فروش را برآورده سازد. محدودیت شماره (۱۹) بیان می‌کند که مجموع هزینه‌ی ثابت مراکز توزیع فعال شده از مقدار بودجه‌ی در دسترس بیشتر نباشد. محدودیت شماره (۲۰) نشان می‌دهد که تعداد W مرکز توزیع احداث گردد و محدودیت شماره (۲۱) نیز بیان می‌کند که منابع با انتشار کربن پایین فقط به V مرکز توزیع فعال شده تخصیص یابد. محدودیت شماره (۲۲) تضمین می‌کند که همه مراکز لجستیکی به فعالیت‌های توزیع خواهند پیوست. محدودیت شماره (۲۳) بیان می‌کند که هیچ یک از مراکز توزیع فعال شده بدون ارتباط نباشد. محدودیت شماره (۲۴) نشان می‌دهد که هر مرکز توزیع تقاضای کالای نوع I خود را حداکثر از یک مرکز لجستیکی می‌تواند بگیرد. به همین ترتیب، محدودیت شماره (۲۵) نیز نشان می‌دهد که هر پایانه‌ی فروش تقاضای کالای نوع I خود را حداکثر از یک مرکز توزیع می‌تواند بگیرد. محدودیت شماره (۲۶) نشان می‌دهد که زمان پاسخ سیستم برای کالای نوع I که از مرکز لجستیکی i از طریق مرکز توزیع j به پایانه‌ی فروش k می‌رسد برابر است با زمان حضور آن کالا در سطوح اول تا سوم شبکه به علاوه‌ی زمان حمل و نقل آن کالا بین سطوح شبکه. لازم به ذکر است که کل زمان حضور در سیستم (WT_{sys}) با مجموع زمان حضور در سطوح اول تا سوم شبکه برابر است. محدودیت شماره (۲۷) بیان می‌کند که متغیرهای P_j, Z_j, y_{ij}^r و y_{jk}^r مقادیر صفر و یک را به خود می‌گیرند. محدودیت شماره (۲۸) نیز غیرمنفی بودن و عدد صحیح بودن متغیرهای x_{ij}^r و C_j را بیان می‌کند.

۳-۴- مدل صف مسأله

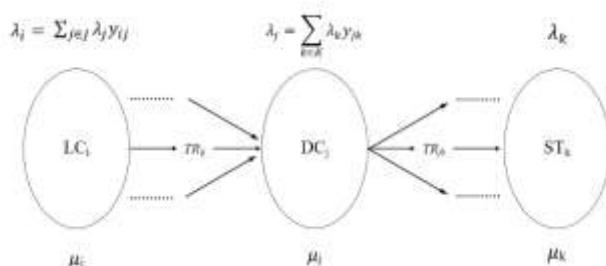
شبکه‌ی صف مورد بررسی یک شبکه‌ی سری-موازی است که از سه سطح تشکیل شده که در هر گره خدمت‌رسانی در شبکه، سیستم صف به صورت $M/M/1$ فرض شده و خدمت‌رسانی با توزیع نمایی با پارامتر μ انجام می‌شود و نظام آن FIFO است. فرض می‌شود تقاضا برای کالاها در نقطه‌ی تقاضا k از توزیع نمایی با پارامتر λ_k پیروی می‌کند. به دلیل اینکه هر کدام از مراکز توزیع، گروهی از نقاط تقاضا را خدمت‌رسانی می‌کند می‌توان گفت تقاضایی که هر کدام از این مراکز توزیع دارد (λ_j) ، برابر مجموع تقاضای کل خدمت‌گیرندگان پایین دست مربوط به آن است؛ بنابراین از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند.

$$\lambda_j = \sum_k \lambda_k y_{jk} \quad \forall j \in J \quad (30)$$

همچنین تقاضای کالا برای مراکز لجستیکی هم از توزیع نمایی پیروی می‌کند که پارامتر آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید.

$$\lambda_i = \sum_j \lambda_j y_{ij} = \sum_j \sum_k \lambda_k y_{ij} y_{jk} \quad \forall i \in I \quad (31)$$

بنابراین شکل شماتیک شبکه به صورت زیر است:



شکل ۲. سیستم صف شبکه توزیع لجستیک شهری

در این مدل، تقاضای کالا توسط دو شاخص وقوع درخواست و مقدار درخواست در هر بار وقوع بیان می‌شود. فرض شده است وقوع درخواست هر کالا متغیر تصادفی U دارای توزیع نمایی با تابع چگالی $f_u(u)$ و اندازه درخواست در هر بار متغیر تصادفی V دارای توزیع یکنواخت با تابع چگالی $f_v(v)$ دارد. از آنجا این دو متغیر تصادفی از هم مستقل‌اند روابط زیر برقرار است:

$$f_U(u) = \begin{cases} \delta e^{-\delta u}, & u \geq 0 \\ 0, & u < 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$f_V(v) = \begin{cases} \frac{1}{d-c}, & c < v < d \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad (33)$$

$$E(D) = E(UV) = E(U)E(V) = \frac{c+d}{2\delta} \quad (34)$$

بنابراین، در مدل چندکالایی مربوط به این تحقیق داریم:

$$E(D_k^r) = \frac{c_k^r + d_k^r}{2\delta_k^r} \quad (35)$$

تقاضای کالای نوع r پایانه‌های فروش از توزیع نمایی با پارامتر λ_k^r پیروی می‌کند. نرخ بهره‌وری و روابط زیر برقرار است:

$$\lambda_k^r = \frac{1}{E(D_k^r)} = \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} \quad (36)$$

$$\rho = \frac{\lambda_k^r}{\mu_k} = \frac{1}{\mu_k E(D_k^r)} = \frac{2\delta_k^r}{\mu_k (c_k^r + d_k^r)} \quad (37)$$

با توجه به مباحث نظریه صف، شاخص‌های مدل صف $M/M/1$ نیز به قرار زیر هستند:

$$f_{wt}(t) = (\mu - \lambda)e^{-(\mu-\lambda)t} \quad (38)$$

$$F_{WT}(t) = P(WT \leq t) = \int_0^t (\mu - \lambda)e^{-(\mu-\lambda)t} dt = 1 - e^{-(\mu-\lambda)t} \quad (39)$$

$$WT = E(WT) = \int_0^{\infty} f_{wt}(t)tdt = \int_0^{\infty} (\mu - \lambda)e^{-(\mu-\lambda)t}tdt = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (40)$$

$$WT_q = WT - \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (41)$$

$$LR = \lambda WT = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (42)$$

$$LR_q = \lambda WT_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (43)$$

با توجه به مباحث و روابط مورد اشاره، در راستای ادامه‌ی بحث در مورد مدل صف مسأله‌ی این تحقیق، رابطه (۴۴) میانگین مدت زمان ماندن در سیستم را در سه مرحله‌ی شبکه نشان می‌دهد. روابط (۴۵)، (۴۶) و (۴۷) به ترتیب میانگین زمان انتظار در صف، میانگین تعداد کالا در سیستم و میانگین تعداد کالا حاضر در صف را نشان می‌دهند.

$$\begin{aligned} WT_{sys} &= \sum_r \sum_i WT_i^R + \sum_r \sum_j WT_j^R + \sum_r \sum_k WT_k^R \\ &= \sum_r \sum_i \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} + \sum_r \sum_j \frac{1}{\mu_j - \lambda_j} + \sum_r \sum_k \frac{1}{\mu_k - \lambda_k} \\ &= \sum_r \sum_i \frac{1}{\mu_i - \sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r} + \sum_r \sum_j \frac{1}{\mu_j - \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r} \\ &\quad + \sum_r \sum_k \frac{1}{\mu_k - \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} WT_q &= \sum_r \sum_i \frac{\lambda_i}{\mu_i(\mu_i - \lambda_i)} + \sum_r \sum_j \frac{\lambda_j}{\mu_j(\mu_j - \lambda_j)} + \sum_r \sum_k \frac{\lambda_k}{\mu_k(\mu_k - \lambda_k)} \\ &= \sum_r \sum_i \frac{\sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r}{\mu_i \left(\mu_i - \sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r \right)} + \sum_r \sum_j \frac{\sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r}{\mu_j \left(\mu_j - \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r \right)} \\ &\quad + \sum_r \sum_k \frac{\frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}}{\mu_k \left(\mu_k - \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} \right)} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} LR_{sys} &= \sum_r \sum_i \frac{\lambda_i}{(\mu_i - \lambda_i)} + \sum_r \sum_j \frac{\lambda_j}{(\mu_j - \lambda_j)} + \sum_r \sum_k \frac{\lambda_k}{(\mu_k - \lambda_k)} \\ &= \sum_r \sum_i \frac{\sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r}{\left(\mu_i - \sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r \right)} + \sum_r \sum_j \frac{\sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r}{\left(\mu_j - \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r \right)} \\ &\quad + \sum_r \sum_k \frac{\frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}}{\left(\mu_k - \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} \right)} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned}
 LR_q &= \sum_r \sum_i \frac{\lambda_i^2}{\mu_i(\mu_i - \lambda_i)} + \sum_r \sum_j \frac{\lambda_j^2}{\mu_j(\mu_j - \lambda_j)} + \sum_r \sum_k \frac{\lambda_k^2}{\mu_k(\mu_k - \lambda_k)} \\
 &= \sum_r \sum_i \frac{\left(\sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r\right)^2}{\mu_i \left(\mu_i - \sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r\right)} + \sum_r \sum_j \frac{\left(\sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r\right)^2}{\mu_j \left(\mu_j - \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r\right)} \\
 &\quad + \sum_r \sum_k \frac{\left(\frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}\right)^2}{\mu_k \left(\mu_k - \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}\right)}
 \end{aligned} \tag{۴۷}$$

با توجه به مباحث فوق، تابع هدف دوم مسأله یعنی زمان پاسخگویی بود بطور کلی از تجمیع پنج قسمت به وجود می‌آید:

$$\min RT = WT_{sys} + \sum_r \sum_i \sum_j TR_{ij}^r y_{ij}^r + \sum_r \sum_j \sum_k TR_{jk}^r y_{jk}^r \tag{۴۸}$$

با جایگذاری، تابع زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned}
 \min RT &= \sum_r \sum_i \frac{1}{\mu_i - \sum_j \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{ij}^r y_{jk}^r} + \sum_r \sum_j \frac{1}{\mu_j - \sum_k \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r} y_{jk}^r} \\
 &\quad + \sum_r \sum_k \frac{1}{\mu_k - \frac{2\delta_k^r}{c_k^r + d_k^r}} + \sum_r \sum_i \sum_j TR_{ij}^r y_{ij}^r + \sum_r \sum_j \sum_k TR_{jk}^r y_{jk}^r
 \end{aligned} \tag{۴۹}$$

۴- مثال عددی

در این قسمت به منظور صحت‌سنجی مدل ریاضی ارائه شده به حل مسأله با یک مثال عددی پرداخته خواهد شد. فرض می‌شود شبکه‌ی مورد نظر متشکل از تعداد ۸ مرکز لجستیکی، تعداد ۱۰ مکان کاندید شده جهت احداث مراکز توزیع شهری و تعداد ۱۵ پایانه‌ی فروش به عنوان نقاط تقاضا است. همچنین تعداد کالاها برابر ۳ در نظر گرفته می‌شود. فواصل بین مراکز لجستیکی و نقاط کاندید شده برای احداث مراکز توزیع و فواصل بین مراکز توزیع و پایانه‌های فروش به ترتیب دارای توزیع یکنواخت بین ۲۰ تا ۸۰ کیلومتر و ۱ تا ۱۰ کیلومتر فرض می‌شود. همچنین به ازای واحد ظرفیت، هزینه‌ی ثابت احداث مراکز توزیع بطور یکنواخت بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ واحد پولی و هزینه‌ی متغیر پردازش درون مراکز توزیع نیز بطور یکنواخت بین ۱۰ تا ۲۰ واحد پولی است. حداکثر بودجه‌ی در دسترس جهت احداث مراکز توزیع ۳۰۰۰۰ واحد پولی و طبق برنامه حداکثر تعداد ۵ مرکز توزیع احداث خواهد شد که با توجه به محدودیت‌های سرمایه فقط ۲ مرکز توزیع با تجهیزات کم‌کربن مجهز خواهد شد. درصد کاهش انتشار کربن در هر مرکز توزیع که در آن منابع با کربن پایین در نظر گرفته شده است ۵۰٪ است. همچنین نرخ مالیات بر کربن برابر ۳۰٪ در نظر گرفته شد.

آهنگ خدمت‌دهی در سطوح اول تا سوم شبکه به ترتیب برابر با ۱۲، ۸ و ۴ و وقوع تقاضا در پایانه‌های فروش دارای توزیع نمایی با پارامتر δ است که مقادیر آن به طور یکنواخت بین ۳ تا ۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین حد پایین و بالای یک تابع توزیع یکنواخت که مقدار تقاضای هر کالا را مشخص می‌کند به ترتیب ۴۰ و ۸۰ فرض می‌شود. میانگین سرعت وسایل حمل‌ونقل در سطح اول شبکه ۳۰ و در سطح دوم شبکه برابر با ۲۰ کیلومتر در ساعت است. طبیعی است که زمان حمل‌ونقل بین سطوح شبکه برابر است با فواصل نقاط شبکه تقسیم بر سرعت متوسط. سایر پارامترها در جدول ۱ مقاداردهی شده‌اند:

جدول ۱. مقدار سایر پارامترهای مثال عددی

یکنواخت بین ۱۰ تا ۲۰ واحد پولی بر واحد کالا	v_j^r
یکنواخت بین ۴ تا ۵ واحد پولی بر واحد کالا و واحد مسافت	t_j^r
یکنواخت بین ۲ تا ۴ واحد پولی بر واحد کالا و واحد مسافت	s_i^r
یکنواخت بین ۱۰۰ تا ۶۰۰ واحد انتشار کربن بر واحد کالا	pe_j
یکنواخت بین ۰.۵ تا ۳ واحد انتشار کربن بر واحد کالا و واحد مسافت	te_j
یکنواخت بین ۱ تا ۲ واحد انتشار کربن بر واحد کالا و واحد مسافت	e_i
یکنواخت بین ۱ هزار تا ۲ هزار واحد کالا	U_i

با در نظر گرفتن مقادیر فوق، در ادامه به شرح نتایج حل مدل با روش محدودیت اپسیلون و با حل‌کننده‌ی BARON در نرم‌افزار GAMS، پرداخته می‌شود. روش محدودیت اپسیلون مبتنی بر تبدیل مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه به یک مسأله‌ی بهینه‌سازی تک‌هدفه است. این روش یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است که در هر مرحله با انتقال تمامی توابع هدف به جز یکی از آن‌ها به محدودیت‌ها به حل این نوع مسائل می‌پردازد. در واقع، در این روش یکی از اهداف مسأله به عنوان هدف اصلی نسبت به اهداف دیگر به عنوان محدودیت که در اصطلاح محدودیت اپسیلون نامیده می‌شود، بهینه می‌گردد [۱۶]، [۱۷]. این روش نخستین بار توسط همیز^۱ و همکاران توسعه داده شد [۱۸] و جزئیات آن در تحقیق چانکوک^۲ و همیز تشریح شده است [۱۹]. در مسأله پیشنهادی این تحقیق هدف اول یعنی کل هزینه‌ی عملیاتی به عنوان هدف اصلی و هدف دوم یعنی زمان پاسخ به عنوان هدف فرعی مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ بنابراین با توجه به روش محدودیت اپسیلون فرمول‌بندی اهداف به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min TC} \quad (54)$$

$$RT \leq \varepsilon \quad (59)$$

به منظور تعیین نقاط پارتو، ابتدا هر یک از توابع هدف به صورت جداگانه حل می‌شوند. نتایج کار در جدول ۲ گزارش شده است.

جدول ۲. نتایج حل مدل با هر یک از توابع هدف بصورت جداگانه

نوع اهداف	TC	RT	Z_j	P_j	WT_q	LR_q
Min TC	3706702.610	37.519	2, 3, 8	2, 3	8.235	5.061
Min RT	10583940.000	31.703	1, 2, 6	1, 2	8.589	2.094

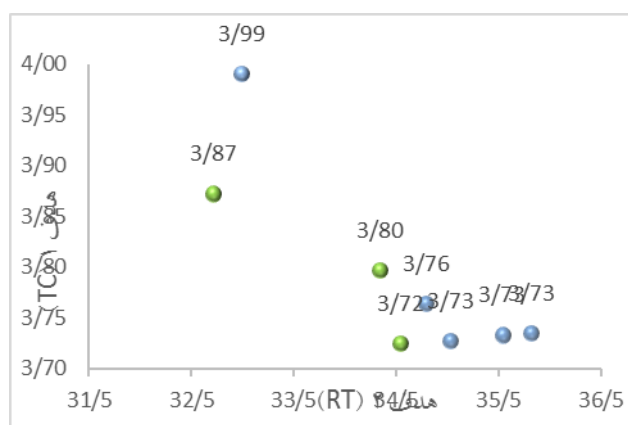
مقدار ایده‌آل تابع هدف اول ۳۷۰۶۷۰۲.۶۱۰ است و بدترین مقدار تابع هدف دوم نیز برابر ۳۷.۵۱۹ است و مسأله جواب بهینه‌ی چندگانه ندارد. لذا جوابی وجود ندارد که راه‌حل بهینه‌ی فوق را مغلوب کند. در ادامه، بر اساس روش محدودیت اپسیلون و با $\Delta=0.5$ نقاط بهینه‌ی مسأله تولید می‌گردد. سپس بهترین جواب‌های یافته شده یعنی جواب‌های پارتویی نامغلوب برای توابع هدف ارائه می‌شود. در تکرارهای متوالی روش محدودیت اپسیلون، ۱۰ جواب برای مسأله به دست آمده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است. مقادیر توابع هدف ارائه شده در سطر اول و آخر این جدول، مقادیر ایده‌آل و حوضیض را برای دو تابع هدف نشان می‌دهد.

1 Haimes
2 Chankong

جدول ۳. نتایج حل مدل به ازای مقادیر مختلف اپسیلون

ردیف	مقدار اپسیلون (ε)	هدف ۱ (TC)	هدف ۲ (RT)
1	-	3706702.610	37.519
2	37.019	3734731.98	35.817
3	36.519	3724240.95	34.542
4	36.019	3732468.74	35.540
5	35.519	3727184.93	35.817
6	35.019	3763387.52	34.542
7	34.519	3796109.93	35.54
8	34.019	3989644.42	35.031
9	33.519	3871823.28	34.791
10	-	10583940.000	31.703

شکل ۳ نقاط مغلوب و نامغلوب بدون حضور مقادیر ایده‌آل و حوضیض توابع هدف را نشان می‌دهد. نقاط آبی‌رنگ توسط نقاط سبزرنگ مغلوب شده‌اند.



شکل ۳. نقاط مغلوب و نامغلوب

شکل زیر همه‌ی نقاط پارتو و مؤثر را بعد از حذف نقاط مغلوب نشان می‌دهد؛ بنابراین، تعداد جواب‌های پارتو به دست آمده برای این مسأله با $\Delta=0.5$ برابر پنج نقطه است.

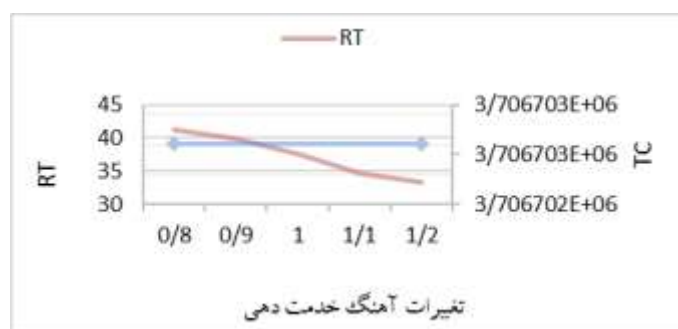


شکل ۴. نقاط پارتویی مسأله

انتخاب یکی از نقاط مؤثر برای اجرا، براساس اولویت‌های تصمیم‌گیرندگان و ذینفعان انجام می‌گیرد. نکته‌ی حائز اهمیت در مورد مجموعه نقاط مؤثر به دست آمده از روش محدودیت اِپسیلون، کامل و دقیق بودن این مجموعه است. به عبارتی، در صورتی که از سایر روش‌های حل مسائل چندهدفه برای مدل ریاضی استفاده شود، راه‌حل نهایی این روش‌ها، یکی از راه‌حل‌های مؤثری خواهد بود که با روش محدودیت اِپسیلون به دست آمده‌اند.

۵- تحلیل حساسیت

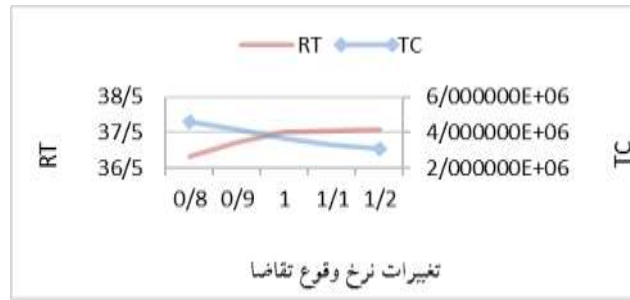
در این بخش، به منظور بررسی صحت و رفتار مدل ریاضی و پی بردن به تأثیر تغییرات پارامترهای مدل بر مسأله‌ی مورد نظر، آنالیز حساسیت بر روی مثال عددی ارائه شده انجام می‌شود. برای این کار تأثیر تغییرات کاهش و افزایش ۲۰ درصدی پارامترهایی شامل آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه (H)، نرخ وقوع تقاضا (δ) و نرخ مالیات بر کربن (a) بر روی توابع هدف و معیارهای شبکه‌ی صف در نظر گرفته می‌شوند. اگرچه ممکن است سایر پارامترهای مدل نیز بر میزان توابع هدف اثرگذار باشند، با این وجود، تنها پارامترهای اساسی بیان شده جهت بررسی صحت و رفتار مدل در نظر گرفته شده‌اند. برای انجام تحلیل حساسیت، تابع هدف اول به عنوان تابع هدف اصلی مدنظر قرار گرفته است. شکل ۵، تأثیر مقادیر مختلف آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه را بر روی میزان توابع هدف و معیارهای شبکه‌ی صف نشان می‌دهد.



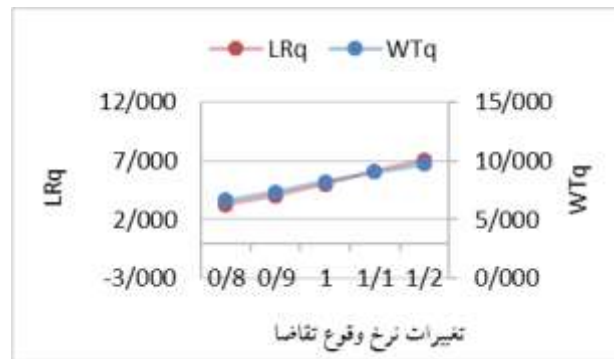
شکل ۵. تأثیر تغییرات آهنگ خدمت‌دهی بر توابع هدف

همانطور که انتظار می‌رود، با تغییر آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه در میزان تابع هدف اول یعنی کل هزینه‌های عملیاتی تغییری ایجاد نمی‌شود. چرا که در اساس این تابع هدف به آهنگ خدمت‌دهی وابسته نیست. این امر به وضوح در معادله‌ی تابع هدف اول پیداست؛ اما با افزایش آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه تابع هدف دوم یعنی زمان پاسخ کاهش پیدا می‌کند. واضح است که هر چقدر کالاها در گره‌های شبکه با سرعت بیشتری خدمت ببینند زمان حضورشان در سیستم کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از زمان پاسخ نیز کاسته می‌شود. مجموع آنچه گفته شد صحت رفتار مدل را نشان می‌دهد. همچنین لازم به ذکر است که از این امر می‌توان یک استراتژی مناسب اتخاذ کرد و آن اینکه چنانچه مایل باشیم بدون افزایش هزینه‌ها زمان پاسخ در شبکه را کاهش دهیم، با توجه به آنچه بیان شد، یکی از استراتژی‌های پیش‌رو افزایش آهنگ خدمت‌دهی در گره‌های شبکه است.

شکل‌های ۶ و ۷، تأثیر مقادیر مختلف نرخ وقوع تقاضا را بر روی میزان توابع هدف و معیارهای شبکه‌ی صف نشان می‌دهد.



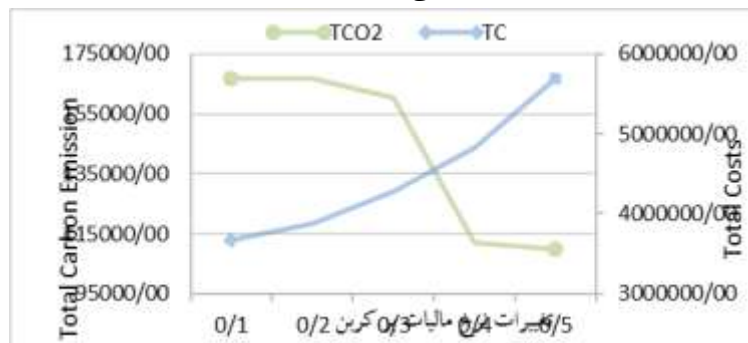
شکل ۶. تأثیر تغییرات نرخ وقوع تقاضا بر توابع هدف



شکل ۷. تأثیر تغییرات نرخ وقوع تقاضا بر شاخص‌های صف

همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش نرخ وقوع تقاضا، میانگین تقاضا کاهش یافته و در نتیجه آهنگ ورود تقاضا افزایش می‌یابد. با افزایش میانگین تقاضا هزینه‌های عملیاتی کل افزایش پیدا می‌کند. با توجه به طبیعت مسأله و معادله‌ی تابع هدف اول، این امر به وضوح قابل درک است. همچنین، افزایش میانگین تقاضا، باعث کاهش در تابع هدف دوم یعنی زمان پاسخ می‌شود. این امری طبیعی است؛ زیرا هر چقدر میانگین تقاضا بالا رود، آهنگ ورود تقاضا (λ) کاهش یافته و عبارت $\frac{1}{\mu-\lambda}$ که بیانگر زمان حضور در سیستم است کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه انتظار می‌رود زمان حضور در شبکه نیز کاهش یابد. همچنین، افزایش نرخ وقوع تقاضا باعث افزایش زمان انتظار در صف و نیز افزایش میانگین طول صف می‌شود که قابل پیش‌بینی بود. مجموع آنچه گفته شد صحت رفتار مدل را نشان می‌دهد.

در ادامه، به منظور بررسی جداگانه تأثیر تغییرات نرخ مالیات بر کربن بر روی هزینه‌های عملیاتی و میزان انتشار کربن، تابع هدف اول مدل ریاضی را بصورت $TC = TC_1 + a * TC_2$ می‌نویسیم. TC_1 کل هزینه‌های عملیاتی بدون احتساب هزینه‌های مالیات بر کربن و TC_2 کل میزان انتشار کربن را در شبکه نشان می‌دهد. شکل ۸، تأثیر مقادیر مختلف نرخ مالیات بر کربن را بر روی میزان توابع هدف و معیارهای شبکه‌ی صف نشان می‌دهد.



شکل ۸. تأثیر تغییرات نرخ مالیات بر کربن بر هزینه‌ها و میزان انتشار کربن

همانطور که در شکل فوق نمایش داده شده است، با افزایش نرخ مالیات بر کربن هزینه‌های عملیاتی کل از آنجایی که با نرخ مالیات بر کربن رابطه‌ی مستقیم دارد، افزایش پیدا می‌کند؛ اما هم‌زمان میزان انتشار کربن در شبکه کاهش پیدا می‌کند که این امر تأثیر مناسب سیاست مالیات بر کربن را نشان می‌دهد. در مجموع صحت مدل اثبات می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

برای سیستم توزیع لجستیک و حمل‌ونقل شهری، به عنوان یک بخش مصرف‌کننده قابل توجه انرژی و آلوده‌کننده، صرفه‌جویی در انرژی و کاهش آلاینده‌ها بخصوص در کلان‌شهرهای با جمعیت انبوه بسیار مهم است. هم‌زمان، در برخی موارد نیاز است تقاضای کالاها در مناطق شهری به سرعت برآورده شود که این امر در مواقع بحران و در مورد کالاهای اضطراری برجسته می‌شود. در این مقاله، مسأله‌ی طراحی و برنامه‌ریزی شبکه‌ی توزیع لجستیک شهری سبز با استفاده از نظریه‌ی صف به صورت یک مدل دو هدفه‌ی چندکالایی و با در نظر گرفتن ظرفیت مراکز و تسهیلات، مورد بررسی قرار گرفت. هدف اول به منظور کمینه کردن هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی و هدف دوم به منظور کمینه کردن زمان پاسخ طراحی شدند. مهمترین نوآوری‌های تحقیق، از یک طرف، به‌کارگیری تئوری صف در طراحی شبکه‌ی توزیع لجستیک شهری به منظور ارتقای دقت، انعطاف‌پذیری و کاربردپذیری در مدل‌سازی‌های لجستیک شهری و از طرف دیگر به‌کارگیری سیاست مالیات بر کربن و نیز سیاست تشویقی تخصیص منابع با کربن پایین به مراکز توزیع به منظور کاهش میزان انتشار آلاینده‌ها است. به منظور بررسی صحت رفتار مدل یک مثال عددی تولید و نتایج حل آن با استفاده از روش محدودیت افسیلون ارائه گردید. همچنین بر روی برخی از پارامترهای اساسی مدل تحلیل حساسیت انجام گرفت. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن سیاست مالیات بر کربن منجر به کاهش میزان انتشار آن می‌شود. زمینه‌های تحقیقاتی بالقوه که در راستای توسعه‌ی مدل ریاضی ارائه شده، می‌توانند مورد بررسی قرار گیرند، به صورت زیر پیشنهاد می‌شوند:

- ۱- مدل ارائه شده در این تحقیق، گره‌های شبکه را به صورت سیستم صف $M/M/1$ در نظر گرفته است. می‌توان این ایده را مطرح کرد که سیستم صف از نوع متفاوتی باشد؛
- ۲- تلفیق مسأله‌ی این تحقیق با مسائل مسیریابی و وسیله‌ی نقلیه به عنوان یک ایده‌ی مناسب می‌تواند مطرح شود.
- ۳- مسأله بصورت چند دوره‌ای و پویا دیده شود.
- ۴- با توجه به اینکه یکی از ویژگی‌های مهم مسیرهای درون شهری متعامد بودن آن‌هاست، می‌توان این ایده را مطرح کرد که در مدل‌های توسعه‌یافته‌ی آتی از این نوع فواصل به جای فواصل مستقیم استفاده شود.
- ۵- از آنجایی که مسائل مشابه مسأله‌ی این تحقیق، از نوع مسائل NP-hard هستند، به هنگام به‌کارگیری آن‌ها در موارد واقعی، ممکن است روش‌های حل دقیق مانند روش محدودیت افسیلون خیلی کارا و سریع نباشند؛ لذا لازم است روش‌های فرا ابتکاری برای حل ارائه شوند.

منابع

1. Anand, N., et al., City Logistics Modeling Efforts: Trends and Gaps - A Review. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012. 39: p. 101-115.
2. Anand, N., et al., Relevance of City Logistics Modelling Efforts: A Review. Transport Reviews, 2015. 35(6): p. 701-719.
3. Bérubé, J.F., M. Gendreau, and J.Y. Potvin, An exact ϵ -constraint method for bi-objective combinatorial optimization problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits. European Journal of Operational Research, 2009. 194(1): p. 39-50.

4. Chankong, V. and Y.Y. Haimes, *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*. 1983, New York: Elsevier Science Publishing Co.
5. Crainic, T.G., N. Ricciardi, and G. Storchi, *Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems*. *Transportation Science*, 2009. 43(4): p. 432-454.
6. Dablanc, L., *Goods Transport in Large European Cities: Difficult to Organize, Difficult to Modernize*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007. 41(No. 3): p. 280-285.
7. Duren, R.M. and C.E. Miller, *Measuring the carbon emissions of megacities*. *Nature Climate Change*, 2012. 2: p. 560-562.
8. Ehrgott, M., *Multicriteria optimization*. Vol. 2. 2005, Berlin: Springer.
9. Haimes, Y.Y., L.S. Ladson, and D.A. Wismer, *Bicriterion formulation of problems of integrated system identification and system optimization*. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, 1971. 3: p. 296-297.
10. He, X., et al., *Improving Emergency Goods Transportation Performance in Metropolitan Areas under Multi-echelon Queuing Conditions*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2013. 96: p. 2466-2479.
11. J Barceló, H.G., S. Pardo, *Combining Vehicle Routing Models and Microscopic Traffic Simulation to Model and Evaluating City Logistics Applications*. *European Transport Conference, Strasbourg, France, 2005*: p. 326-334.
12. Moutaoukil, A., G. Neubert, and R. Derrouiche, *Urban Freight Distribution: The impact of delivery time on sustainability*. *IFAC-PapersOnLine*, 2015. 48(3): p. 2368-2373.
13. Muñuzuri, J. and P. Cortés, *Recent advances and future trends in city logistics*. *Journal of Computational Science*, 2012. 3(4): p. 191-192.
14. Taniguchi, E. and R.G. Thompson, *City Logistics-Mapping the Future*. Taylor & Francis Group, 2015.
15. Taniguchi, E., et al., *CITY LOGISTICS: NETWORK MODELLING AND INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS*. Elsevier Science, 2001.
16. Taniguchi, E., R.G. Thompson, and T. Yamada, *Recent Trends and Innovations in Modelling City Logistics*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2014. 125: p. 4-14.
17. W Qiu, F.Y., D. Yang, *City Logistics in China: An Overview*. In *Recent Advances in City Logistics* (E. Taniguchi and R. G. Thompson, eds.). Elsevier, New York, 2005: p. 417-427.
18. Wolpert, S. and C. Reuter, *Status Quo of City Logistics in Scientific Literature*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2012. 2269: p. 110-116.
19. Yang, J., J. Guo, and S. Ma, *Low-carbon city logistics distribution network design with resource deployment*. *Journal of Cleaner Production*, 2013.

Green City Logistics Distribution Network Design Using Queuing Theory

Farshad Saeedi¹, Ebrahim Teimoury²

¹ MSc Student of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology

² Associate Professor of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology

Abstract

Recently urbanization experienced a rapid growth and a number of metropolises with population exceeding 10 million have appeared. Because of high population lots of problems appeared, such as traffic jam, air pollution, accidents and high energy consumption. For city logistics distribution and urban transportation system as a remarkable energy consumer and polluter, saving energy and decreasing the pollutants specifically in metropolises with dense population is very important. In this research we tried to concisely present the relevant concepts and definitions as well as analyzing the previous studies on city logistics modeling and understanding challenges and deficiencies. Paying attention to the gaps in existing research, a bi-objective mathematical model is presented for minimizing the economical and environmental expenses and also for minimizing the response time. The potential demand of goods is considered and network modeling is based on queue theory. The presented model has incorporated the carbon tax and sources with low carbon emission have been utilized in city distribution centers. Then a numerical example is generated in order to verify the model, and the results of solving the model using ϵ -Constraint method and sensitivity analysis are presented. Finally the overall results of the research and future studies that can be considered are stated.

Keywords: City logistics, Urban freight distribution, Carbon emissions, City Distribution Centers, Network designing and planning, Queuing theory
