International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2017)

December 2017, Volume 28, Number 4
Pp 525- 542

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Design & Analysis of a Capacitated Multi-Part Hub Network Using the Proposed Genetic Algorithm

Mehdi Bashiri* & Mahdiyeh Shiri

Mehdi Bashiri, *Professor of Industrial Eng., Department of Industrial engineering, Shahed University*
Mahdiyeh Shiri, *MSc student of Industrial Eng., Department of Industrial engineering, Shahed University*

Keywords

Multi-part hub network;
Single Window;
Capacitated part;
Genetic algorithm;
Transportation network

ABSTRACT

The ultimate aim of the hub location problem is to transfer flows among different distribution networks by least cost. Moreover, in current competitive world, implementing repetitive tasks by corresponding administrative agencies will increase both processing time and transportation costs significantly. One of the best possible solutions for this problem is, however, considering a single window which is in this paper, referred to as a multi-part hub. In this case, the design of a multi-part hub network not only decreases the traffic flow, but also reduces transportation and establishment costs in the network. Also, due to lack of resources in real world situations, different parts of the network are assumed to be capacitated. Hence, in this paper, the design of a capacitated multi-part hub network considering exterior and interior designs is addressed. The main aim of this network is to optimize network and activities' total cost. This problem is then solved using the CPLEX solver of Gams software. Furthermore, the large-scale problems are examined through the proposed genetic algorithm. Finally, the model validation and solution approach performance are analyzed by applying some numerical examples from Turkish network data set. The results indicate that while the proposed network provides more services than the classic network, it diminishes transportation costs and distances between hubs significantly.

© 2017 IUST Publication, IJIEPM Vol. 28, No. 4, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۸، زمستان ۱۳۹۶
صفحـــه ۵۲۶-۵۴۲

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

طراحی و تحلیل شبکه محور چند بخشی ظرفیت‌دار و حل آن با الگوریتم پیشنهادی ژنتیک

مهدی بشیری* و مهدیه شیری

کلمات کلیدی

طراحی شبکه محور چند بخشی، پنجره واحد، بخش ظرفیت‌دار، الگوریتم ژنتیک، شبکه حمل و نقل.

چکیده:

هدف مسئله مکان‌یابی محور، برقراری جریان در شبکه‌های مختلف توزیع به بهترین شکل ممکن می‌باشد. همچنین در دنیای پرشتاب امروزی، انجام کارهای مختلف در دستگاه‌های مختلف، علاوه بر وقت‌گیر بودن و هدردادن زمان، هزینه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. در این میان، یکی از بهترین رویکردهای ممکن برای حل چنین مشکلی، استقرار یک پنجره واحد (**Single Window**) می‌باشد که در این مطالعه با عنوان محور چند بخشی نام برده می‌شود. این شبکه می‌تواند با استقرار چند محور مجاور در یک واحد، باعث کاهش ترافیک جریان، هزینه های انتقال و احداث در شبکه گردد. همچنین با توجه به محدودیت منابع در دنیای واقعی، بخش‌های شبکه بصورت ظرفیت‌دار فرض شده اند. از این‌رو، در این تحقیق به طراحی شبکه محور چند بخشی ظرفیت‌دار با ملاحظه طراحی شبکه (طراحی بیرونی) و طراحی اجزاء محور (طراحی داخلی) پرداخته می‌شود. هدف اصلی از ارائه این مسئله، کاهش هزینه‌ها و ارائه شبکه‌ای کارا و منظم جهت خدمت به نقاط مختلف است. این مسئله با استفاده از حل‌کننده سیپلکس در نرم‌افزار گمس حل گردیده و الگوریتم پیشنهادی ژنتیک برای حل مسئله در اندازه‌های بزرگ‌تر پیشنهاد شده است. در ادامه، اعتبارسنجی مدل با استفاده از چند مثال عددی از داده‌های شبکه ترکیه بررسی و عملکرد روش حل نیز ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که شبکه پیشنهادی، علاوه بر این‌که از امکان دسترسی به محورها و خدمت‌دهی بیشتری نسبت به شبکه کلاسیک برخوردار است، هزینه‌ها را نیز به شدت کاهش می‌دهد.

۱. مقدمه

محور[1]ها تسهیلاتی هستند که به عنوان مراکز انتقال‌دهنده در سیستم‌های توزیع به کار برده می‌شوند. در این سیستم‌ها نقاط به صورت زوج مبدأ و مقصد وجود دارند و بین آنها جریان مبادله می‌شود[۱] . در طراحی شبکه، ارتباط مستقیم میان دو به دو نقاط بسیار هزینه‌بر و بی‌نظم است بنابراین از تسهیلات محور استفاده می‌گردد.

در شبکه محور، سه عنصر جمع‌آوری، انتقال و توزیع وجود دارد [۲]. در مسائل مکان‌یابی محور، هدف کلی، یافتن مکان مناسب محورها، تخصیص نقاط غیرمحور به محور و تعیین مسیرهای انتقال کالا بین مبادی و مقاصد است به طوری که هزینه‌های احداث و حمل و نقل حداقل گردد [۳]. در بیشتر مسائل مکان‌یابی محور، نقاط مذکور صرفا به‌عنوان نقطه انتقال هستند در حالی‌که در مسائل واقعی می‌توانند وظایفی مانند عملیات تکمیلی روی محصولات را بر عهده داشته باشند [۴]. همچنین در دنیای پرشتاب امروزی، توجه به عامل سرعت که در انجام مکاتبات، مبادله اطلاعات و کاهش زمان تشریفاتی گمرکی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تجارت دارد، ضروری به نظر می‌رسد. در این شرایط، نبود مکانیزم‌های تسهیل‌کننده، می‌تواند به عنوان مانعی در توسعه تجارت عمل‌کند و فرصت‌های زیادی را از دسترس بخش تجاری خارج سازد. انجام کارهای مختلف در نواحی گوناگون، علاوه بر وقت‌گیر بودن و هدردادن زمان، هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. در این میان، یکی از بهترین رویکردهای ممکن برای حل چنین مشکلی،

تاریخ وصول: ۹۴/۴/۳۱

تاریخ تصویب: ۹۵/۱۰/۲۸

مهدیه شیری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه شاهد

***نویسنده مسئول مقاله: مهدی بشیری** ، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه شاهد، bashiri@shahed.ac.ir

استقرار یک پنجره واحد است. بنابراین مسئله مکان‌یابی محور چند بخشی به عنوان یک پنجره واحد و یکی از زمینه‌های توسعه مدل-های محور مورد بررسی قرار می گیرد که تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است در عین حالی که دارای کاربرد عملیاتی تری است. از سوی دیگر، در مطالعاتی که تا کنون در خصوص مسئله مکان یابی محور انجام شده است، غالبا طراحی شبکه و مکان یابی محور و تخصیص ها مدنظر بوده است و طراحی، صرفا بخش بیرونی محور (طراحی بیرونی) را شامل بوده است، لیکن در این مطالعه، طراحی بخش های داخل محور (طراحی درونی) همراه با طراحی بیرونی نیز مدنظر قرار گرفته است. طراحی همزمان درونی و بیرونی محور و آثار بهبود اقتصادی شبکه که در این مطالعه نشان داده شده است، از دیگر جنبه هایی است که ضرورت و اهمیت این مطالعه را نشان می دهد.

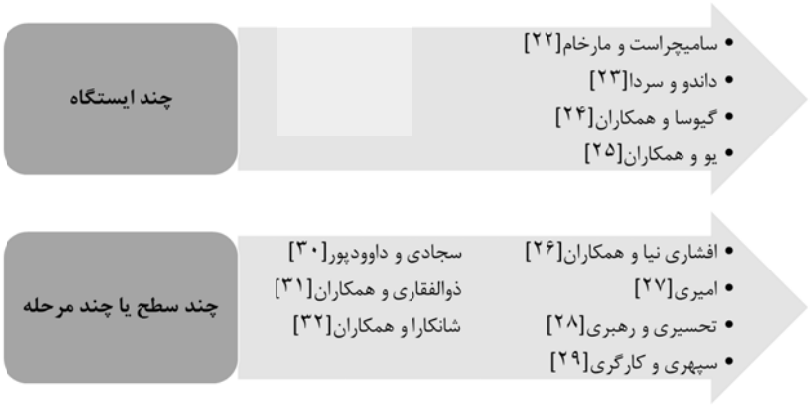
این مقاله در چند قسمت تدوین شده است: ابتدا در قسمت دوم، ادبیات موضوع مرور شده است. تعریف مسئله و مدل‌سازی که شامل مفروضات، مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم و مدل-سازی ریاضی مسئله است، در قسمت سوم آورده شده است. در قسمت چهارم اعتبارسنجی مدل پیشنهادی با استفاده از چند مثال عددی نشان داده شده است، همچنین در این قسمت الگوریتم پیشنهادی ژنتیک مورد ارزیابی قرار گرفت. در قسمت پایانی نیز به نتیجه‌گیری و پیشنهاد تحقیقات آتی برای توسعه مدل پرداخته شده است.

۲. پیشینه تحقیق

صنعت ارتباطات از راه دور یکی از قدیمی‌ترین کاربران شبکه محور به نظر می‌رسد، همچنین سیستم‌های لجستیک، صنعت هواپیمایی و شرکت‌های پستی نیز یکی از مهمترین کاربران مفهوم شبکه‌های محور هستند. امروزه زمینه‌های متعدد دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند از مزیت مفهوم شبکه محور بهره گیرند، مانند صنعت دریایی، کمپانی‌های حمل و نقل، حمل و نقل عمومی و شبکه‌های تحویل پیام. اولین مطالعه در زمینه مکان‌یابی محور که در آن فرمول‌بندی ریاضی و روش حل آورده شد، توسط اوکلی[۵] ارائه گردید. تا سال ۱۹۹۴ مسائل مکان‌یابی محور بدون ظرفیت در نظر گرفته می‌شد، تا این‌که آیکین [۶] برای اولین بار محدودیت ظرفیت را تعریف نمود. در ادبیات موضوع نیز ظرفیت‌هایی برای عملکرد سیستم مطرح شده است، همانند ماریانو و سرا [۷]، که طول صف انتظار برای پرواز و فرود هواپیماها را جزء ظرفیت‌های مدل مطرح کردند. ساساکیو فوکوشیما [۸] محدودیت ظرفیت را برای مراکز محور و ارتباطات بین مراکز محور و غیر محور به‌کار بردند. در ادامه، کاستا و همکاران [۹] ظرفیت را به عنوان یک هدف در مدل ارائه کردند، به طوری که زمان انتقال جریان مواد به حداقل برسد. آنها همچنین حداکثر زمان خدمت دهی را حداقل کردند. کوریا و همکاران [۱۰] مدلی دارای سطوح چندگانه ظرفیت را برای مکان‌یابی محور به همراه روش حلی برای آن پیشنهاد کردند. **قدسی و همکاران** [۱۱] مدل مکان‌یابی محور پوششی با تخصیص یگانه و دارای محدودیت ظرفیت مراکز محور را ارائه دادند و مسئله خود را با یک الگوریتم ابتکاری بر اساس الگوریتم استعماری حل نمودند. کریمی و بشیری [۱۲] مسئله مکان‌یابی محور پوششی کامل چند لایه با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت را مطرح و مسئله را با یک الگوریتم شبیه سازی تبریدی حل کردند. در ادامه، رزمی و رحمن نیا [۱۳] به طراحی شبکه توزیع محصولات کارخانه با استفاده از مدل محور میانی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت مراکز توزیع و سطح سرویس‌دهی پرداختند. غفاری نسب و همکاران [۱۴] یک شبکه لجستیکی با در نظر گرفتن ظرفیت غیرقطعی طراحی کردند و مسئله را با روش بهینه-سازی استوار حل نمودند. در ادامه، عیدی و میرآخورلی [۱۵] مدلی ارائه دادند که هدف آن یافتن مکان محور ها و تخصیص گره های غیر محور به گره های محور می باشد، بطوریکه زمان سفر بین هر جفت از گره های مبدأ و مقصد از محدودیت پوشش تجاوز نکند. سپس یک الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به عنوان راه حل مدل ارائه شده، مورد مطالعه و توسعه قرار دادند. همچنین، اکبری پور و همکاران [۱۶] یک الگوریتم فرا ابتکاری جدید و مقاوم در چارچوب الگوریتم ترکیبی ژنتیک - تبرید شبیه‌سازی شده را به منظور حل مسئله مکان‌یابی تسهیلات محور با تخصیص یگانه و ظرفیت نامحدود توسعه دادند. در الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، از الگوریتم ژنتیک در جهت تشکیل تعدادی از راه‌حل‌های آغازین متنوع استفاده شده است. در مطالعه دیگر، بزرگی امیری و همکاران [۱۷] خدمات امدادی شامل۰ تخلیه‌ی افراد مصدوم و افراد سالم به مکان‌های امن و در صورت لزوم انتقال آن‌ها به تسهیلات درمانی را مدل‌سازی کردند. این مدل، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی خطی عدد صحیح مختلط برای مکان‌یابی نقاط انتقال و پناهگاه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت بر روی هریک از تسهیلات موجود در شبکه است. ارکات و عطایی [۱۸] یک شبکه‌ی توزیع سه سطحی شامل یک تأمین‌کننده‌ی اصلی، چند مرکز توزیع بالقوه و تعدادی مشتری، مورد مطالعه قرار دادند. ابتدا یک مدل ریاضی جدید با هدف کمینه کردن مجموع هزینه‌های مکان‌یابی، تخصیص، مسیریابی و کنترل موجودی توسعه دادند و سپس با توجه به پیچیدگی محاسباتی مسئله، برای حل آن از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک استفاده نمودند.

در مسئله مکان‌یابی محور مدل‌های جدیدی ارائه شده که سعی در توسعه این گونه مسائل جهت استفاده در مثال‌های کاربردی داشته‌اند، از جمله: لین و لی [۱۹] بازی رقابتی بر روی یک شبکه محور طراحی کردند. اشفاق و ساکس [۴] برای اولین بار یک شبکه لجستیک چند وجهی متفاوت با شبکه سنتی ارائه دادند. کوریا و

همکاران [۲۰] سطوح ظرفیت‌دار برای مسئله تک تخصیصی مکان-یابی محور در نظر گرفتند. همچنین، آلومور و همکاران [۳] برای اولین‌بار شبکه مکان‌یابی محور چند حالته را معرفی کردند و به طور همزمان هزینه و زمان سفر را در نظر گرفتند. اخیراً نیز گلاره و همکاران [۲۱] یک مدل ریاضی برای مسئله مکان‌یابی محور چند تخصیصی و چند دوره‌ایی بدون ظرفیت با محدودیت بودجه ارائه دادند. همچنین، با مرور ادبیات می توان مطالعاتی در زمینه-های دیگر شامل مفاهیمی مشابه محور چند بخشی و تحت عناوین دیگری یافت که یک دسته‌بندی از این گونه مسائل در شکل۱. آورده شده است. در نتیجه می توان گفت که تاکنون در زمینه مکان‌یابی محور، مدل محور چند بخشی ارائه نشده است. بنابراین ارائه مدلی جدید جهت کاهش هزینه‌های مسئله مکان‌یابی محور ضروری به نظر می‌رسد. در مطالعه پیش‌رو سعی بر این است که یک مدل مکان‌یابی محورچند بخشی دارای ظرفیت محدود، ارائه گردد.



شکل۱. دسته‌بندی مسائل مشابه مسئله محور چند بخشی

۳. تعریف مسئله و مدل‌سازی

طراحی شبکه محور جزء مسائل مهم مطالعاتی و کاربردی در حوزه مکان‌یابی تسهیلات می‌باشد. هدف از اجرای این مدل‌سازی تشکیل شبکه‌ای با تعداد محور کمتر و کاهش مراحل عملیاتی در گره ها به منظور کاهش ترافیک، زمان و هزینه هاست که در این مدل، هزینه ها مد نظر قرار گرفته است. در این مدل‌سازی مراحل عملیاتی بر روی کالاها، تنها یکبار و در یک پنجره واحد انجام می شود و در هر بخش از محور، یک عملیات متفاوت و تکمیل کننده بخش قبلی صورت می گیرد. در این مدل، فرض شده که شبکه تنها شامل یک نوع محصول است و بر روی هر محصول ارسالی، بخش اول عملیات در محور اول و بخش آخر عملیاتی در محور دوم اعمال می گردد و تصمیم گیری بخش های میانی بر عهده مدل است. همچنین با توجه به محدودیت منابع در دنیای واقعی، ظرفیت بخش ها به صورت محدود در نظر گرفته شده است. از این رو به طراحی یک شبکه محور چند بخشی ظرفیت‌دار پرداخته می-شود. در این شبکه، مکان‌یابی تسهیلات و تخصیص گره‌های غیر محور به محور چند بخشی با در نظر گرفتن ادغام محورهای مشابه و تعیین بخش مناسب برای آن‌ها، پرداخته می‌شود. هدف اصلی از ارائه این مسئله، کاهش هزینه‌ها و ارائه شبکه‌ای کارا تر جهت خدمت دهی به نقاط مختلف است. به عبارت دیگر، استفاده از مدل پیشنهادی برای شبکه های پر ترافیک، می تواند مزایایی از جمله کاهش ازدحام و ترافیک را بهمراه داشته باشد. از دیگر مزایای آن، می توان به کاهش تعداد منابع لازم برای اجرای عملیات داخل هر محور اشاره کرد. از سوی دیگر، طراحی همزمان شبکه (طراحی خارجی) و طراحی داخل محور (طراحی داخلی) از دیگر مزایای مدل پیشنهادی در این تحقیق است. مدل پایه این مطالعه از مقاله آلومور و همکاران[۲۲] بر گرفته شده است. مابقی مفروضات مسئله بدین صورت می‌باشد که:

۱. در این مسئله شبکه به صورت کامل فرض شده است و ارتباط مستقیم میان گره‌ها وجود ندارد.
۲. استفاده از ارتباطات بین محوری نسبت به ارتباطات غیرمحور به محور ارزان‌تر است.
۳. هر گره دقیقاً به یک محور تخصیص داده می‌شود وتعداد محورهایی که باید تأسیس شوند برابر p است.
۴. تعداد بخش‌های موجود هر محور برابر s است و بین بخش‌ها توالی عملیات وجود دارد.
۵. حداقل تعداد بخش‌های فعال مکمل در حداکثر دو محور، بایستی برابر با s باشد.

عملیات هر بخش از هر محور با بخش‌های دیگر از آن محور متفاوت است.

یک کالای ارسالی بایستی تمامی مراحل تکمیلی (عملیاتی) که در بخش‌های متوالی صورت می‌گیرد را طی کند.

در هر محور بایستی حداقل یک بخش فعال باشد.

مجموعه‌ها:

N	مجموعه نقاط موجود $\{i,j,k,l\} \in N$
S	مجموعه بخش‌های محور چند بخشی $\{n,m,q,h\} \in S$

پارامترها:

W_{ij}	تقاضا برای سفر از گره i به گره j
W'_{ij}	پارامتر نشاندهنده وجود تقاضا بین زوج نقاط (در صورت وجود تقاضا برای سفر از گره i به گره j برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است)
C_{ij}	هزینه انتقال واحد جریان از گره i به گره j به ازای هر واحد مسافت
FZ_{kl}	هزینه احداث محور لینک بین دو محور k و l
FP_{kn}	هزینه احداث و راه‌اندازی بخش nام محور kام
F_k	هزینه احداث جایگاه محور چند بخشی kام (بدون در نظر گرفتن هزینه احداث بخش)
cp_{nm}	هزینه انتقال از بخش nام به بخش mام
cap_{kn}	ظرفیت بخش nام محور kام
P	تعداد محورهای مستقر
α_{nm}	نرخ تخفیف برای سفر از بخش n محور اول به بخش m محور بعدی $(0 \leq \alpha_{nm} \leq 1)$

متغیرها:

X_{ik}	در صورت تخصیص گره i به محور k برابر یک و در غیر این صورت، صفر است (اگر متغیر X_{kk} مقدار یک بگیرد، یعنی در مکان گره kام محور تأسیس شده است).
Y_{ijkl}	در صورتی که جریان بین دو گره i و j از طریق محور k و l عبور کند، برابر یک و در غیر این صورت، صفر است.
YY_{knlm}	در صورتی که جریان از بخش nام محور kام به بخش mام محور lام برود، برابر یک و در غیر این صورت، صفر است.
F_{ijknlm}	در صورتی که جریان بین دو گره i و j از طریق بخش n محور k به بخش m محور l منتقل گردد، برابر یک و در غیر این صورت، صفر است.
Z_{kl}	در صورت تخصیص محور k به محور l برابر یک و در غیر این صورت، صفر است.
ZZ_{kn}	در صورت فعال بودن بخش nام محور kام برابر یک و در غیر این صورت برابر صفر است.
CC_{ij}	هزینه انتقال واحد جریان از گره i به گره j به ازای کل مسافت طی شده در شبکه

مدل‌سازی مسئله :

$$min\ obj = \sum_k F_k X_{kk} + \sum_k \sum_{l>k} FZ_{kl} Z_{kl} + \sum_k \sum_n FP_{kn}\, ZZ_{kn} + \sum_i \sum_{j>i} W_{ij}\, CC_{ij} + \sum_i \sum_{j\neq i} \sum_k \sum_l \sum_n \sum_{m=n+1} F_{ijknlm} \quad (a)(b)(c)(d)(e) \quad (1)$$

$$\sum_k X_{kk} = p \quad (2)$$

$$\sum_{k} X_{ik} = 1 \qquad \forall i \in I \tag{3}$$

$$X_{ik} \le X_{kk} \qquad \forall i \in I, k \in K \tag{4}$$

$$X_{jl} \le X_{ll} \qquad \forall j \in J, l \in L \tag{5}$$

$$Z_{kl} \le X_{kk} \qquad \forall k \in K, l \in L, k < l \tag{6}$$

$$Z_{kl} \le X_{ll} \qquad \forall k \in K, l \in L, k < l \tag{7}$$

$$Y_{ijkl} + Y_{ijlk} \le Z_{kl} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, k < l, i \ne j \tag{8}$$

$$\sum_{l \ne k} Y_{ijkl} - \sum_{l \ne k} Y_{ijlk} = X_{ik} - X_{jk} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, i \ne j \tag{9}$$

$$CC_{ij} = \sum_{k} C_{ik} X_{ik} + \sum_{k} \sum_{l} \alpha_{nm}\, C_{kl} Cp_{nm} F_{ijknlm} + \sum_{k} C_{kj}\, X_{jk} \qquad \forall i \in I, j \in J, i \ne j \tag{10}$$

$$ZZ_{kn} \le X_{kk} \qquad \forall k \in K, n \in S \tag{11}$$

$$ZZ_{lm} \le X_{ll} \qquad \forall l \in L, m \in M \tag{12}$$

$$YY_{knlm} \le ZZ_{kn} \qquad \forall k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, m = n + 1 \tag{13}$$

$$YY_{knlm} \le ZZ_{lm} \qquad \forall k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, m = n + 1 \tag{14}$$

$$YY_{knlm} \le Z_{kl} \qquad \forall k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, k < l, m = n + 1 \tag{15}$$

$$F_{ijknlm} \le X_{ik} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, i \ne j, m = n + 1 \tag{16}$$

$$F_{ijknlm} \le X_{jl} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, i \ne j, m = n + 1 \tag{17}$$

$$F_{ijknlm} \le YY_{knlm} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, i \ne j, m = n + 1 \tag{18}$$

$$\sum_{n} ZZ_{kn} \ge X_{kk} \qquad \forall k \in K \tag{19}$$

$$\sum_{k} ZZ_{kn} \ge 1 \qquad \forall n \in S \tag{20}$$

$$Y_{ijlk} \le \sum_{n} \sum_{m=n+1} F_{ijknlm} \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, i \ne j \tag{21}$$

$$\sum_{h<m} ZZ_{kh} + \sum_{q \ge m} ZZ_{lq} \ge F_{ijknlm} \cdot |S| \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, n \in S, m \in M, i \ne j, m = n + 1 \tag{22}$$

$$\sum_{k} \sum_{l} Y_{ijkl} \ge W'_{ij} \qquad \forall i \in I, j \in J, i \ne j \tag{23}$$

$$\sum_{k} \sum_{l} Y_{ijkl} \le W_{ij} \qquad \forall i \in I, j \in J, i \ne j \tag{24}$$

$$\sum_{i} \sum_{j} \sum_{l} \sum_{m} W_{ij} F_{ijknlm} \le cap_{kn} \qquad \forall k \in K, n \in S, n = m - 1 \tag{25}$$

$$X_{ik}, Y_{ijkl}, F_{ijknlm}, Z_{kl}, ZZ_{kn}, YY_{knlm} \in \{0,1\} \tag{26}$$

رابطه (۱)، تابع هدف مسئله که در پنج قسمت مجزا آورده شده است که به ترتیب هزینه احداث جایگاه محور چند بخشی (a)، هزینه احداث لینک بین محورها (b)، هزینه احداث بخش‌های فعال از محورهای چند بخشی (c)، هزینه حمل و نقل (d) و هزینه مجموع جریانات (e)، را نشان می‌دهند. هدف، حداقل‌سازی کل هزینه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های مربوطه است. روابط (۲) تا (۱۰) محدودیت‌های مربوط به مدل پایه محور کلاسیک از مطالعه

آلومور و همکاران[۲۲] می‌باشند. روابط (۱۱) و (۱۲) تضمین می‌کنند که بخش‌های یک گره در صورت محور بودن آن گره، می‌توانند فعال گردند. روابط (۱۳) و (۱۴) نشان می‌دهند که جریان در صورتی از دو بخش متوالی عبور می‌کند که دو بخش موجود بر سر مسیر، فعال باشند. رابطه (۱۵) بیان می‌کند که جریان در صورتی از دو بخش متوالی از دو محور عبور می‌کند که لینک بین دو محور برقرار باشد. روابط (۱۶) و (۱۷) تضمین می‌کنند که اگر جریان بین دو گره منتقل گردد، بایستی یک گره به محور اول و گره دیگر به محور دوم تخصیص یابد. رابطه (۱۸) نشان می‌دهد که انتقال جریان از مبدأ به مقصد از طریق دو بخش از دو محور در صورتی امکان‌پذیر است که ارتباط بین آن دو برقرار باشد. روابط (۱۹) و (۲۰) به ترتیب بیان می‌کنند که هر محور حداقل یک بخش فعال دارد و هر بخش حداقل در یک محور، فعال است. رابطه (۲۱) نشان می‌دهد که حداکثر جریاناتی که از مبدأ به مقصد از طریق یک یا دو محور می‌گذرد، برابر کل جریانات عبوری از دو بخش متوالی در مسیر است. رابطه (۲۲) تضمین می کند که بین هر مبدا و مقصد کلیه عملیات تکمیلی در بخش‌ها میانی محور انجام می پذیرد. روابط (۲۳) و (۲۴) تضمین می‌کنند در صورتی که جریان مراسلات بین دو گره وجود داشته باشد، مسیر بین این دو گره برقرار می شود. رابطه (۲۵) مربوط به محدودیت ظرفیت هر بخش از محور چند بخشی می‌باشد. در مدل پیشنهادی، تعداد متغیرها، $(sn^2)\binom{n}{2}+(s+1)n^2+sn$ و تعداد محدودیت‌ها $((4s-2)n^2+3)\binom{n}{2}+(3s+1)n^2+2sn+s$ می باشد. در مدل‌سازی فوق با بررسی انجام شده، برخی از متغیرها قابلیت حذف شدن بدون تاثیر منفی بر عملکرد مدل را دارند، از این‌رو متغیرهای تصمیم YY_{knlm} و Y_{ijkl} به‌عنوان متغیرهای حذفی (همچنین با تغییراتی در مدل اصلی) تشخیص داده شدند. با این کار زمان حل و پیچیدگی مسئله کمتر شده است و به مدلی کاراتر تبدیل می‌گردد. مدل نهایی ارائه شده به صورت زیر تغییر می‌یابد:

(1)-(7), (10)-(12), (16)-(17), (19)-(20), (22),(25)

$$\sum_{n}\sum_{m=n+1} F_{ijknlm}+\sum_{n}\sum_{m=n-1} F_{ijlmkn}\,Y_{ijlk}\le Z_{kl} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L, k<l, i\neq j \qquad (27)$$

$$\sum_{l\neq k}\sum_{n}\sum_{m=n+1} F_{ijknlm}-\sum_{l\neq k}\sum_{n}\sum_{m=n-1} F_{ijlmkn}=X_{ik}-X_{jk} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, i\neq j \qquad (28)$$

$$F_{ijknlm}\le ZZ_{kn} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L, n\in S, m\in M, i\neq j, m=n+1 \qquad (29)$$

$$F_{ijknlm}\le ZZ_{lm} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L, n\in S, m\in M, i\neq j, m=n+1 \qquad (30)$$

$$F_{ijknlm}\le Z_{kl} \quad \forall i\in I, j\in J, k\in K, l\in L, n\in S, m\in M, i\neq j, k<l, m=n+1 \qquad (31)$$

$$\sum_{k}\sum_{l}\sum_{n}\sum_{m=n-1} F_{ijlmkn}\ge W'_{ij} \quad \forall i\in I, j\in J, i\neq j \qquad (32)$$

$$\sum_{k}\sum_{l}\sum_{n}\sum_{m=n-1} F_{ijlmkn}\le W_{ij} \quad \forall i\in I, j\in J, i\neq j \qquad (33)$$

$$X_{ik}, F_{ijknlm}, Z_{kl}, ZZ_{kn}\in\{0,1\} \qquad (34)$$

پس از ساده سازی مدل، تعداد $n^2\binom{n}{2}+(s-1)n^2+n$ متغیر و $(sn^2-3)\binom{n}{2}$ محدودیت از مدل پیشنهادی حذف می‌گردد که به همین نسبت از پیچیدگی و زمان حل مسئله کاسته می شود.

۴. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و تحلیل حساسیت داده ها

پس از معرفی مدل پیشنهادی، لازم است ابتدا صحت مدل ارائه شده مورد ارزیابی قرار گیرد. یکی از روش‌هایی که به کمک آن می‌توان اعتبار مدل ارائه شده را بررسی کرد، به کارگیری مدل

مذکور برای یک مثال از پیش حل شده می‌باشد. بر همین اساس در این پژوهش سعی شده با به کارگیری مثال‌های مختلف، صحت مدل ارائه شده از طریق بررسی رفتار منطقی مدل، ارزیابی گردد. از طرفی پس از بررسی صحت مدل، لازم است کارایی مدل پیشنهادی با مقایسه نتایج بدست آمده از آن و مدل‌های پیشین (با داده‌های مشابه) مورد ارزیابی قرار گیرد. در نهایت با انجام تحلیل حساسیت های مختلف به کمک تغییر هدفمند برخی از پارامترها در مثال‌های گوناگون، درک بهتری از عملکرد مدل پیشنهادی ارائه می شود. از همین رو، این قسمت شامل دو بخش است که در بخش اول، صحت و کارایی مدل پیشنهادی به کمک مثال کاربردی از داده‌های واقعی شبکه ترکیه، بررسی شده است. در بخش دوم، تحلیل داده ها در اندازه بزرگتر با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی ژنتیک انجام گرفته است. پارامترهای مورد نیاز این تحقیق که در داده های ترکیه موجود نمی باشند، به صورت تصادفی با تابع توزیع یکنواخت بین ۱۰۰ تا ۳۵۰، تولید و در مثال‌های متنوع استفاده شده اند.

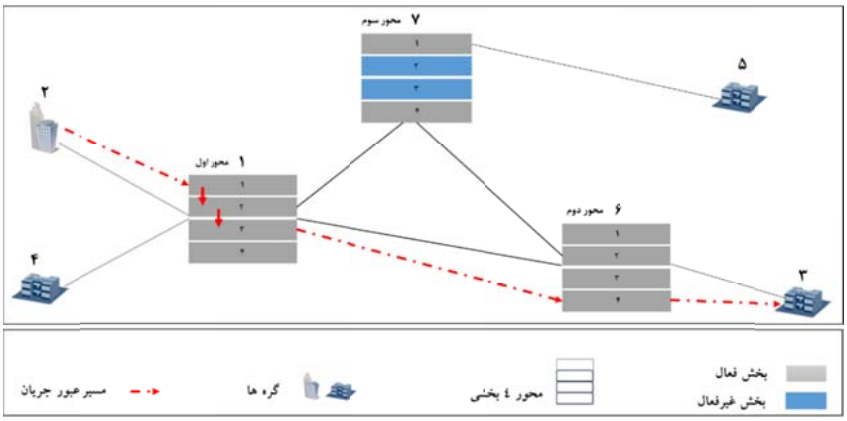
۱-۴. کارایی مدل پیشنهادی

مثال کاربردی که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است، صادرات و واردات شرکت‌های دارویی می‌باشد. از آنجایی که هزینه-های اتلافی و زمان در امور مختلف از جمله گمرک و سایر عملیات تکمیلی برای صادرات و واردات، قابل توجه است وجود واحدی مشترک تحت عنوان پنجره‌ی واحد، جهت رسیدگی به این امور ضروری است. پنجره واحد سیستمی است که به تجار یک منطقه، این امکان را می‌دهد تا اطلاعات و عملیات را برای طی الزامات قانونی مرتبط با صادرات و واردات به یک واحد مشترک ارائه دهند. به عبارت دیگر، پنجره واحد تمام سازمان‌های متناظر که وظیفه صدور مجوزهای قانونی دارند، از جمله گمرک، بنادر و دریانوردی، بیمه، راه و ترابری، توسعه تجارت و غیره را در یک گره تجمیع نموده و مجوزهای مربوط به صادرات و واردات یکپارچه تنظیم و صادر می شوند. با در نظر گرفتن این پنجره، می‌توان هزینه و زمان تشریفات گمرکی و سایر عملیات تکمیلی را کاهش داد و همچنین تجارت کالا تسهیل می‌یابد. در حال حاضر بسیاری از دولت‌ها به دنبال ایجاد یک پایگاه واحد برای امور مختلف از جمله واردات و صادرات در مناطق قطبی خود با اهداف کاهش هزینه‌ها، تسریع در امور اظهار، ترخیص کالا، تخصیص موثر و کاراتر منابع، افزایش شفافیت درآمدی و بهبود بازده تجاری هستند (شیراوژن[۳۳]). تقسیم‌بندی بخش‌های عملیاتی شرکت‌های صادراتی و وارداتی دارو بعنوان یک مثال موردی در جدول ۱. آورده شده است.

جدول ۱. تقسیم‌بندی بخش‌های عملیاتی شرکت صادراتی و وارداتی دارو

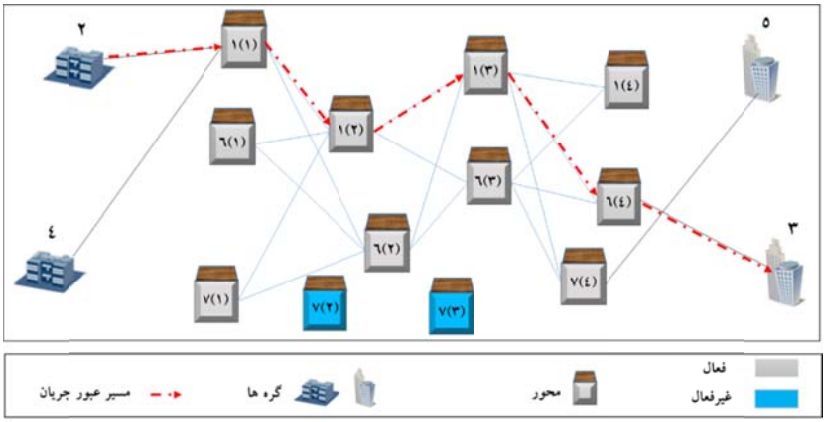
بخش	نام بخش	عملیات
۱	پذیرش اطلاعات و اظهارنامه	دریافت اطلاعات و اظهار نامه و بررسی آن، دریافت مدارک مورد نیاز و هزینه‌های پذیرش اظهار نامه، ثبت نهایی اظهار نامه
۲	واحد آزمایشگاهی	کنترل و ارزیابی داروی ارسالی
۳	واحد فنی	رفع عیب، بسته بندی انواع داروها، دسته بندی بسته‌های دارو
۴	واحد ترخیص	محاسبه هزینه گمرکی مربوط به داروی ارسالی، اخذ هزینه گمرکی، ارسال محموله دارو

شکل۲. شامل هفت شرکت صادراتی و وارداتی دارو است که از بین آن‌ها، سه شرکت به عنوان محور چهار بخشی (طبق جدول۱.) انتخاب شده اند، تمام بخش‌های محور اول و دوم فعال بوده و در محور سوم، تنها بخش اول و چهارم که غیر متوالی می‌باشند، فعال هستند. بنابراین به دلیل توالی عملیات بین بخش‌ها، کالا نمی‌تواند از هر دو بخش فعال این محور (بخش های ۱ و۴ از محور سوم) عبور کند و بایستی از بخش اول خدمت دریافت کند و برای دریافت مابقی خدمات متوالی به محوری دیگر انتقال یابد و یا اینکه خدمات بخش های یک، دو و سه را از محور دیگر دریافت کرده باشد و برای دریافت خدمت چهارم به بخش ۴ از محور سوم مراجعه کند.



شکل ۲. شبکه پیشنهادی شرکت‌های صادراتی و وارداتی دارو

اگر کالا جهت ارسال و تکمیل مراحل عملیاتی خود از مکان‌های مجزا و دور از هم عبور کند، در چنین شرایطی نه تنها هزینه ها به شدت افزایش می‌یابد بلکه شبکه‌ای بی نظم و پر ترافیک ایجاد می‌گردد که به نظر منطقی نمی‌باشد. شکل۳. یک شبکه زنجیره‌ای را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از چنین تصوری است. به عبارت دیگر شبکه شکل۳ جایگزینی برای شبکه شکل ۲ است با این تفاوت که شبکه شکل ۳ از کارایی بسیار پایینی برخوردار است. خطوط قرمز در هر دو شکل یک مسیر را در دو شبکه نشان می دهند. در این مسیر مشخص شده، شرکت ۳ از شرکت ۲ تقاضای کالا دارد. در شبکه پیشنهادی، کالا به محور اول انتقال یافته است و پس از انجام عملیات ۱، ۲ و ۳ به بخش چهارم از محور دوم، جهت تکمیل مراحل عملیاتی انتقال می یابد و سپس به شرکت ۳ ارسال می گردد، اما در شبکه زنجیره ایی عملیات مراحل ۱تا ۳ در سه محور مجزا و دور از هم انجام می گیرد و برای تکمیل عملیات (مرحله آخر) نیز به محور دیگری انتقال می یابد و در نهایت به مقصد می رسد. همانطور که در شکل مشخص است شبکه ای شلوغ و پر ترافیک با زمان انتقال بیشتر و هزینه بر خواهیم داشت. همانطور که می دانیم، نظام گمرکی ایران از نظر شاخص مدت زمان صادرات و واردات کالا با برخی از کشورهای پیشرفته فاصله‌ی چشمگیری دارد. لذا وجود پنجره واحدی، جهت تکمیل مراحل گمرکی در حداقل زمان ممکن، به نفع واردکننده، تولیدکننده، صادرکننده، دولت، امنیت و سلامت کار خواهد بود.



شکل ۳. شبکه زنجیره‌ای کلاسیک

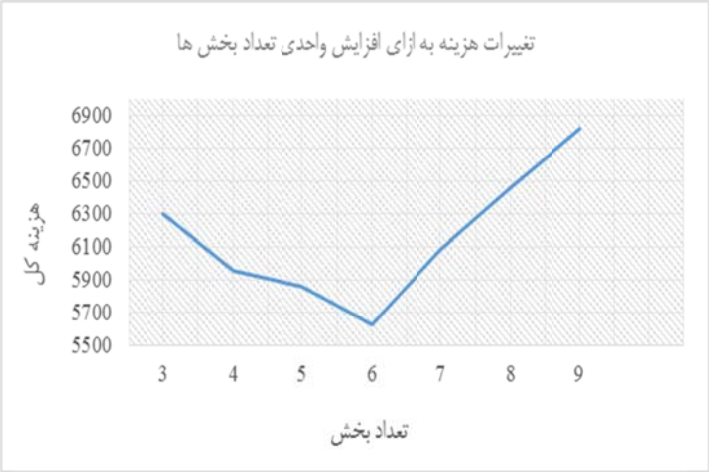
در این قسمت به مقایسه شبکه زنجیره‌ای کلاسیک با شبکه پیشنهادی می پردازیم. در صورتی می‌توان شبکه پیشنهادی را با شبکه زنجیره‌ای مقایسه نمود که طول زنجیره آن (مابین دو گره مبدأ و مقصد) با تعداد بخش‌های شبکه پیشنهادی برابر باشد. با اعمال این شرط نتایج جدول۲. بدست آمده و نشان می‌دهد که با افزایش تعداد محورهای چند بخشی در شبکه پیشنهادی در مقایسه با افزایش تعداد زنجیره‌های شبکه زنجیره‌ای کلاسیک، هزینه‌ی کمتری جهت طراحی و راه‌اندازی شبکه نیاز است و همچنین شبکه‌ای منظم‌تر احداث می گردد. شکل۴. نمایشی از اثر افزایش تعداد بخش‌ها بر روی مقدار تابع هدف می‌باشد و نشان می‌دهد که با افزایش تعداد بخش‌ها هزینه‌های شبکه زنجیره‌ای کلاسیک بسیار بیشتر از شبکه پیشنهادی می‌گردد.

جدول ۲. مقایسه شبکه پیشنهادی با شبکه زنجیره‌ای کلاسیک

شبکه زنجیره‌ای کلاسیک (طول زنجیره ۴)				شبکه پیشنهادی(۴ بخشی)			
تعداد گره	تعداد زنجیره	زنجیره‌های فعال	هزینه شبکه زنجیره‌ای	تعداد گره	تعداد محور	محورها	تعداد بخش‌های فعال شده	هزینه شبکه پیشنهادی
۱۳	۲	۱۰-۹-۸-۶ ۱۳-۹-۸-۷ ۱۰-۹-۸-۱	۷۴۳۹	۷	۲	۶ ۷ ۱	۶	۳۶۴۰,۸۴۶
۱۶	۳	۱۳-۱۲-۱۱-۶ ۱۶-۱۲-۱۱-۷ ۱۰-۹-۸-۱	۱۱۲۱۷	۷	۳	۶ ۷ ۱	۱۰	۵۹۵۳,۸۲۸
۱۹	۴	۱۳-۱۸-۱۷-۳ ۱۶-۱۵-۱۴-۶ ۱۹-۱۸-۱۷-۷	۱۷۳۶۵	۷	۴	۳ ۶ ۷	۱۴	۸۱۲۱,۶۰۵

شکل ۴. اثر افزایش تعداد گره‌ها بر روی مقدار تابع هدف دو شبکه پیشنهادی و کلاسیک

در ادامه به تعیین رابطه بین تعداد بخش‌های محور چند بخشی و کل هزینه‌های مسئله پیشنهادی می پردازیم. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد بخش‌ها تا حد معینی، هزینه های شبکه کاهش می یابند اما با افزایش بیش از آن حد، هزینه روند افزایشی خواهد داشت. این افزایش هزینه به دلیل نیاز حداقل سرمایه لازم برای احداث و راه اندازی تسهیلات هر بخش می باشد. شکل۵. تغییرات تابع هزینه مسئله پیشنهادی به‌ازای افزایش تعداد بخش‌ها را نشان می‌دهد که آستانه تعداد بخش‌ها در این مثال عددی برابر با ۶ بدست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود از آن به بعد، هزینه کل سیر صعودی دارد.

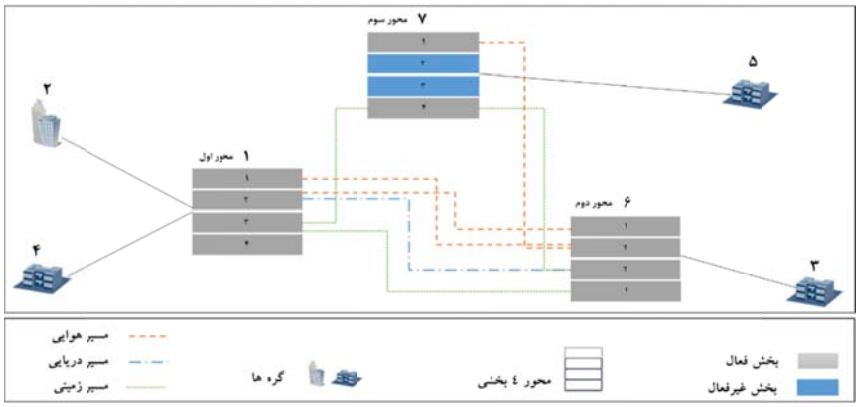


شکل ۵. تغییرات تابع هدف مسئله پیشنهادی به‌ازای افزایش تعداد بخش‌ها

در ادامه، تحلیل حساسیت بر روی میزان تخفیف انواع مسیرهای حمل و نقل بین بخش‌های متوالی از دو محور انجام گرفته و نتایج آن در جدول۳. آورده شده است. در این قسمت سه نوع مسیر هوایی، دریایی و زمینی بین بخش‌های متوالی در نظر گرفته شده که هر مسیر دارای درصد تخفیف از پیش تعیین شده می باشد. نتایج نشان می‌دهد که تا حد ممکن از مسیری که تخفیف بیشتری دارد، جریان بیشتری عبور می‌کند که این مسئله بدیهی است و اعتبار مدل را تضمین می کند. در مثال حل شده، مسیر هوایی با تخفیف بیشتر، حجم جریان عبوری بیشتری به خود اختصاص داده است. همچنین این تحلیل در صورت تک مسیر بودن شبکه نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل۶. انواع مسیرهای حمل و نقل بین بخش‌های متوالی از دو محور نشان داده شده است.

جدول ۳. اثر تخفیف انواع مسیرهای حمل و نقل بین بخش‌های متوالی از دو محور بر روی حجم جریانات عبوری و هزینه ها (تعداد گره ۷ ، تعداد محور ۳ و تعداد بخش ۴)

تعداد متغیر	تعداد محدودیت	حالت	α_{nm}	حجم جریانات عبوری	هزینه شبکه پیشنهادی
۳۲۰۶	۱۱۱۱۳	مسیر هوایی۱-۲	۰,۵۰	۵۱۱۸۷۹	۵۹۲۱,۸۱۱
		مسیر دریایی۲-۳	۰,۷۰	۱۳۴۷۰۵	
		مسیر زمینی۳-۴	۰,۹۵	۴۸۴۹۳۸	
		مسیر هوایی۱-۲		۴۰۴۱۱۵	۵۸۴۷,۱۲۶
		مسیر هوایی۲-۳	۰,۵۰	۱۶۱۶۴۶	
		مسیر هوایی۳-۴		۵۶۵۷۶۱	
		مسیر دریایی۱-۲		۴۸۴۹۳۸	۵۹۰۳,۲۸۵
		مسیر دریایی۲-۳	۰,۷۰	۸۰۸۲۳	
		مسیر دریایی۳-۴		۵۶۵۷۶۱	
		مسیر زمینی۱-۲		۶۷۳۵۲۵	۵۹۷۳,۴۸۴
		مسیر زمینی۲-۳	۰,۹۵	۵۳۸۸۲	
		مسیر زمینی۳-۴		۴۰۴۱۱۵	



شکل ۶. شبکه پیشنهادی با انواع مسیرهای بین بخش‌های متوالی از دو محور

حال با حذف محدودیت دوم (تعداد محورها ثابت و برابر p)، یکبار دیگر اعتبار مدل را می سنجیم. ۵ سناریو برای هزینه احداث محورها در نظر می گیریم تا تأثیر تغییرات هزینه احداث محور بر روی تعداد محورها، نشان داده شود. سناریوها به ترتیب افزایش هزینه احداث محورها شماره گذاری شده‌اند (سناریو ۱ کمترین هزینه احداث و سناریو ۵ بیشترین هزینه احداث را دارند). نتایج در جدول۴. آورده شده و نشان می‌دهد که با افزایش هزینه احداث محورها، دو حالت اتفاق می‌افتد: (۱) گرهی دیگر با هزینه احداث کمتر به عنوان محور انتخاب و احداث می‌شود، (۲) تا حد ممکن تعداد محورهای احداثی کاهش می‌یابد و حتی در این صورت نیز ممکنه است هزینه ها نسبت به قبل افزایش داشته باشند.

جدول ۴. نتایج حاصل از افزایش هزینه های احداث محورها در شبکه پیشنهادی با حذف محدودیت ۲ (تعداد گره۷ ، تعداد بخش ۴)

سناریو	تعداد متغیر	تعداد محدودیت	تعداد محور	محور	تعداد بخش‌های فعال شده شبکه	هزینه شبکه پیشنهادی
۱			۵	۵و۴،۳،۲،۱	۱۸	۸۷۶۹
۲			۵	۷و۶،۵،۳،۲	۱۸	۱۰۶۵۱
۳	۳۲۰۶	۱۱۱۱۳	۳	۵و۱،۴	۱۰	۱۱۹۲۸
۴			۳	۶و۴،۱	۱۲	۱۴۱۵۵
۵			۲	۴و۱	۸	۱۵۷۷۶

در جدول۵. سه سناریو مشابه قسمت قبلی در نظر گرفته شده است با این تفاوت که در این قسمت هزینه احداث بخش های داخل محورها افزایش می یابد. نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش مجموع هزینه های احداث بخش‌ها، شبکه به منظور کاهش هزینه‌های کل، ترجیح می‌دهد هزینه حمل و نقل بیشتری نسبت به قبل متحمل شود و در عوض تعداد محورهای چند بخشی هزینه بر کمتری را احداث کند.

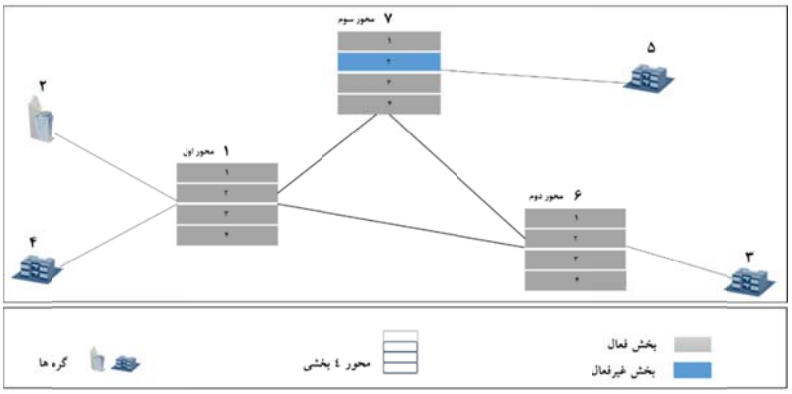
جدول۵. نتایج حاصل از افزایش هزینه احداث بخش‌های محور پیشنهادی با حذف محدودیت ۲ (تعداد گره۷ ، تعداد بخش ۴)

سناریو	تعداد محورها	محورها	بخش‌های فعال	هزینه شبکه پیشنهادی
۱	۵	۵و۴،۲،۱	۱ تا ۴	۸۷۶۹
		۳	۴و۱	
۲	۳	۷و۴	۱ تا ۴	۱۷۰۵۰
		۵	۴و۱	
۳	۲	۷و۴	۱ تا ۴	۲۱۲۸۶

در این قسمت محدودیت ظرفیت به مدل پیشنهادی اضافه شده و اعتبارسنجی و تحلیل حساسیت مدل در جدول۶ آورده شده است. با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت، بخش یا بخش‌های غیر فعال، در صورت مواجهه با کمبود ظرفیت فعال می گردند. در این تحلیل، سناریو ها به ترتیب کاهش ظرفیت بخش‌ها (سناریو ۱ بیشتر ظرفیت و سناریو ۷ کمترین ظرفیت) آورده شده است. با کاهش ظرفیت، محور ها و بخش های فعال در صورت عدم پوشش تقاضا غیر فعال می شوند و دو حالت ممکن است: (۱) از ظرفیت مازاد دیگر بخش ها جهت پاسخگویی به تقاضا استفاده گردد. (۲) بخش یا محور کم هزینه تری احداث گردد که پاسخگوی آن تقاضا باشد. به عنوان مثال، شکل۷. نشان می‌دهد که با کاهش ظرفیت بخش ها، بخش سوم در محور سوم (گره ۷) که قبلا در سناریو ۵ غیر فعال بود، فعال گردید.

جدول ۶. نتایج حاصل از ظرفیت‌دار شدن شبکه پیشنهادی (تعداد محور ۳ ، تعداد بخش ۴)

تعداد گره	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	سناریو	ظرفیت (Cap) (U توزیع یکنواخت)	محورها	بخش‌های فعال	هزینه شبکه پیشنهادی
			۱	بینهایت	۱	۱و۴	۳۸۵۷۸
					۲و۳	۱ تا ۴	
			۲	U(۲۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)	۱و۲	۱ تا ۴	۳۸۸۶۶
					۳	۱و۲و۴	
۵	۸۱۵	۲۹۲۹		کاهش Cap(۲,۲)	۱و۵	۱ تا ۴	
			۳	کاهش Cap(۲,۳)	۳	۱و۲و۴	۵۰۱۱۶
				مابقی U(۲۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)			
				کاهش Cap(۳,۲)			
			۴	Cap(۳,۳)	۲،۱و۴	۱ تا ۴	۵۰۳۶۸
				مابقی U(۲۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)			
			۵	بینهایت	۱و۶	۱ تا ۴	۵۹۵۳
					۷	۱و۴	
۷	۳۲۰۶	۱۱۱۱۳	۶	U(۲۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)	۱و۶	۱ تا ۴	۶۲۲۶
					۷	۱و۳و۴	
				کاهش Cap(۷,۱)	۱	۱و۴	
			۷	Cap(۷,۲)	۳و۶	۱ تا ۴	۶۴۸۸
				Cap(۷,۳)			
				مابقی U(۲۵۰۰۰,۳۰۰۰۰)			



شکل ۷. شبکه پیشنهادی با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت بخش‌ها در سناریو۶ از جدول ۶

با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت همانند قبل، دو حالت ممکن است اتفاق بیافتد: (۱) بخش یا بخش‌های غیر فعال، در صورت مواجهه با کمبود ظرفیت فعال می گردند و از آن‌ها جهت خدمت-دهی و ارسال به گره‌های مبدأ و مقصد استفاده می گردد. (۲) تعداد محورهای احداثی افزایش می‌یابند. جدول۷، نتایج حاصل از شبکه پیشنهادی ظرفیت‌دار با حذف محدودیت ۲ را نشان می‌دهد. در سناریو دوم با کاهش ظرفیت در بخش های محور چهارم، این محور غیرفعال شد و از گره های ۶ و ۷ به عنوان محور استفاده می گردد. همچنین در سناریو سوم، با کاهش ظرفیت در بخش های محور اول، این محور نیز غیر فعال و هیچ محوری جایگزین نمی شود زیرا بخش های محور های دیگر پاسخگوی تقاضای بیشتری هستند.

جدول ۷. نتایج حاصل از شبکه پیشنهادی ظرفیت‌دار با حذف محدودیت ۲ (تعداد گره۷ ، تعداد بخش ۴)

سناریو	ظرفیت	تعداد محور	محورها	بخش‌های فعال	هزینه شبکه پیشنهادی
۱	توزیع یکنواخت	۵	۵و۴،۲،۱	۱ تا ۴	۸۷۶۹
			۳	۴و۱	
۲	کاهش ظرفیت در بخش‌های محور ۱ و ۴	۶	۱	۴و۱	۹۱۳۸
			۷و۶،۵،۳،۲	۱ تا ۴	
۳	کاهش ظرفیت بخش‌های محوراول	۴	۴و۳،۲	۱ تا ۴	۹۴۹۵
			۵	۴و۱	

۲-۴. تحلیل داده‌ها با استفاده از روش حل فرا ابتکاری

با عنایت به آنکه مسئله محور یک مسئله Np-Hard است، با افزایش اندازه مسئله، حل مسئله با روش حل دقیق بسیار زمان‌بر و حتی در اندازه‌های نسبتا بزرگ غیرممکن است، بنابراین حل مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ضروری می باشد. جدول۸. زمان حل دو روش دقیق و الگوریتم فرا ابتکاری پیشنهادی برای این مسئله را نشان می‌دهد که اختلاف چشم‌گیری با یکدیگر دارند. در ادامه جزئیات الگوریتم طراحی شده آورده می شود.

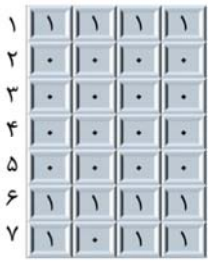
جدول ۸. مقایسه زمان حل مسئله پیشنهادی با دو روش دقیق و فرا ابتکاری پیشنهادی (تعداد محور ۳ ، تعداد بخش ۴)

تعداد گره	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	زمان حل دقیق	زمان حل الگوریتم فراابتکاری
۵	۸۱۵	۲۹۲۹	۰۰:۱۳,۰۳۵	۰۰:۰۰,۳۰۳
۷	۳۰۸۷	۱۱۱۱۳	۰۰:۵۱,۹۳۸	۰۰:۰۰,۳۵۸
۱۰	۱۳۷۳۰	۴۶۶۵۴	۱۶:۴۸,۴۰۷	۰۰:۰۰,۴۵۸
۱۲	۲۸۸۳۶	۹۷۴۰۸	۱۷:۰۲,۳۱۵	۰۰:۰۰,۵۴۶

مسئله پیشنهادی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک، حل شده است. این الگوریتم از طبیعت و نظریه تکامل داروین الهام گرفته است و بر اساس میزان مطلوبیت اعضای جمعیت نسل بعدی مشخص می‌گردد. گام‌ها و اجزاء الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به صورت زیر می‌باشند:

گام اول: نمایش جواب‌های اولیه به صورت کروموزوم می‌باشد. در شکل۸. ساختار جواب مربوط به مکان‌یابی و تخصیص مسئله پیشنهادی آورده شده است، همچنین در شکل۹. ساختار جواب بخش‌های محورها نمایش داده شده است. ساختار اول نشان می دهد که گره‌های ۱، ۶ و ۷ به عنوان محور چند بخشی انتخاب شده‌اند و گره‌های ۲ و ۴ به محور چند بخشی ۱، گره ۳ به محور چند بخشی ۶ و گره ۵ به محور چند بخشی ۷ تخصیص داده شده اند. ساختار دوم نشان می دهد که بخش‌های همه محورها به جز بخش دوم از محور هفتم فعال هستند و گره های غیر محور(۲تا ۵) بخشی ندارند که بخواهد فعال باشد. در الگوریتم پیشنهادی ژنتیک، عملگرها تنها بر روی ساختار جواب مربوط به مکان‌یابی و تخصیص، اعمال می‌گردند و بهینه سازی برای ساختار دوم بصورت جستجوی حریصانه انجام می شود.

شکل ۸. ساختار جواب مکان‌یابی و تخصیص مسئله پیشنهادی



شکل ۹. ساختار جواب بخش‌های محورها

گام دوم: در این گام از عملگر تقاطع استفاده می‌شود، به گونه‌ای که از بین کروموزوم‌های جمعیت اولیه دو کروموزوم از طریق چرخ گردان به عنوان والدین برتر انتخاب می‌گردند، سپس از تقاطع تک نقطه‌ای تصادفی جهت تعیین نقطه تقاطع بین دو کروموزوم استفاده می‌گردد. این عملگر باعث حفظ تشابه بین والد و والدین می‌گردد زیرا بخشی از ژن‌های والدین را در خود حفظ می‌کند.

گام سوم: در گام آخر از عملگر جهش استفاده می‌گردد. این عملگر ابتدا دو ژن از کروموزوم را به تصادف انتخاب می‌کند و سپس محتوای آن ژن‌ها را تغییر می‌دهد.

پس از پایان تمامی تکرارهای الگوریتم، برترین کروموزوم بر حسب مطلوبیت مشخص می‌شود. نتـایج حل مسئله پیشنهادی با استفاده از روش حل فرا ابتکاری در اندازه‌های متوسط و بزرگ در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده است:

جدول ۹. نتایج حاصل از افزایش تعداد بخش‌های شبکه پیشنهادی در اندازه متوسط (۲۰ گره و ۶ محور)

حالت	تعداد بخش‌ها	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	هزینه شبکه پیشنهادی	زمان حل الگوریتم
۱	۴	۲۲۸۸۶۰	۷۶۶۵۰۴	۲۵۲۹۵	۰۰:۰۱,۴۶۰
۲	۶	۳۸۰۹۰۰	۱۲۲۴۹۸۶	۲۰۹۵۵	۰۰:۰۱,۵۰۶
۳	۸	۵۳۲۹۴۰	۱۶۸۳۴۶۸	۲۷۶۹۶	۰۰:۰۱,۷۷۱
۴	۱۰	۶۸۴۹۸۰	۲۱۴۱۹۵۰	۳۰۱۷۱	۰۰:۰۱,۹۱۲

جدول ۱۰. نتایج حاصل از افزایش تعداد گره‌های شبکه پیشنهادی در اندازه های مختلف (۶ محور و ۶ بخش)

حالت	تعداد گره	تعداد متغیرها	تعداد محدودیت‌ها	هزینه شبکه پیشنهادی	زمان حل الگوریتم
۱	۲۰	۳۸۰۹۰۰	۱۲۲۴۹۸۶	۲۰۹۹۵	۰۰:۰۱,۵۰۶
۲	۵۰	۱۵۳۱۷۷۵۰	۴۹۰۵۵۴۵۶	۱۰۵۸۶۰	۰۰:۰۳,۶۹۳
۳	۸۱	۱۰۶۳۰۱۷۲۷	۳۴۰۲۶۷۳۱۷	۱۹۲۹۱۲	۰۰:۰۴,۱۴۲

همانطور که از جدول۹. مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده در اندازه‌های کوچک با دو روش حل دقیق و فرا ابتکاری مشابه بوده و این نتیجه نشان دهنده کارایی مناسب الگوریتم ژنتیک پیشنهادی است. جدول۱۰. نیز نتایج حل مسئله با استفاده از روش فرا ابتکاری در اندازه های کوچک، متوسط و بزرگ را گزارش می‌دهد که با افزایش اندازه مسئله، علاوه بر افزایش شدید تعداد متغیرها و محدودیت ها، هزینه و زمان حل مسئله نیز افزایش می یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات تحقیقات آتی

طراحی شبکه محور جزء مسائل مهم مطالعاتی و کاربردی در حوزه مکانیابی تسهیلات می باشد. از نوآوری های اصلی این مقاله می توان به طراحی همزمان شبکه محور (طراحی خارجی) و طراحی اجزاء داخلی محور (طراحی داخلی)، اشاره کرد. پیشنهاد مدل ریاضی متناظر که همزمان تصمیمات مورد اشاره را با در نظر گرفتن ملاحظات مربوطه اتخاذ نماید از دیگر نوآوری های این تحقیق می باشد. همچنین محاسبات عددی مختلف و تحلیل های حساسیت انجام شده در خصوص اهمیت و تاثیر مدل پیشنهادی را می توان بخش دیگری از نوآوری های این تحقیق اشاره نمود. در نهایت، طراحی الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله، مشتمل بر طراحی کروموزوم، طراحی عملگرها و موارد مرتبط از دیگر نوآوری های این مطالعه به شمار می رود. همچنین مقاله ارائه شده می تواند پاسخگوی مناسبی برای سوالات زیر باشد:

۱. آیا ایجاد مدل مکانیابی محور چند بخشی کارایی مسئله را افزایش می دهد؟

ایجاد شبکه ای با محورهای چند بخشی، ترافیک و بی نظمی و همچنین هزینه ها را به شدت کاهش می دهد. از طرف دیگر

محورهای کلاسیک تنها وظیفه انتقال کالا را بر عهده دارند (مگر اینکه هر محور از شبکه کلاسیک به صورت زنجیرهای و هر محور یک عملیات انجام دهد که باعث ترافیک و بی نظمی در کل شبکه می‌گردد)، در حالی‌که مدل پیشنهادی علاوه بر انتقال کالا، عملیات تکمیلی را نیز بر عهده دارد در نتیجه از ایجاد تسهیلات در تمامی نقاط برای اعمال این عملیات تکمیلی، جلوگیری به عمل می آید. همچنین احداث شبکه در برخی مواقع که با کمبود ظرفیت بخش مواجهیم با استفاده از ظرفیت دیگر بخش ها امکانپذیر است.

۲. مسئله مکانیابی محور چند بخشی چگونه مدل‌سازی می‌شود و بر چه مبنایی می‌باشد؟

مدل پیشنهادی یک مدل MINLP خطی شده است. در این مدل، در هر بخش محور یک عملیات متفاوت و تکمیل کننده بخش قبلی انجام می گیرد. فرض شده که شبکه تنها شامل یک نوع محصول است و بر روی هر محصول ارسالی، بخش اول عملیات در محور اول و بخش آخر عملیاتی در محور دوم اعمال می‌گردد و تصمیم‌گیری بخش‌های میانی بر عهده مدل ارائه شده است.

مدل ارائه شده در پی یافتن شبکه ای با محورهای چند بخشی است که بخش های فعال و تخصیص های آن را بگونه ای انتخاب نماید که حداقل هزینه ها را برای سیستم لحاظ نماید که در مثال های عددی نیز به صورت دقیق مشخص گردید. برای سنجش عملکرد مدل پیشنهادی ، این مدل با مدل کلاسیک برای داده‌های شبکه ترکیه مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی، هزینه های کمتری به شبکه تحمیل می کند. در این مسئله با افزایش تعداد گره‌ها، حل این مدل از طریق نرم افزارهای بهینه-سازی دقیق، بسیار زمان‌بر است و این فرایند را تقریبا غیر ممکن می‌سازد. از این رو، از الگوریتم پیشنهادی ژنتیک استفاده شد که یکی از روش‌های فرا ابتکاری آشنا در بهینه‌سازی است. در ادامه مدل با استفاده از روش حل فرا ابتکاری پیشنهادی در سایزهای مختلف حل گردید و در زمان بسیار کمتری به یک جواب مناسب رسید. پیاده سازی این مدل در شبکه‌های تجاری به خصوص در گمرک یکی از مهم‌ترین کاربردهای این مسئله است. پژوهش انجام شده با نواقصی همراه بود، بنابراین پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه می‌گردد:

- ✓ در مدل پیشنهادی، برای سادگی مطلب فرض شده است که یک نوع کالا یا خدمت به نقاط ارائه می‌شود. حال آنکه در عمل ممکن است نقاط به طور همزمان به چندین نوع کالا نیاز داشته باشند. بنابراین ارائه مدلی تحت عنوان مکانیابی محور چند بخشی عملیاتی متناظر با تنوع کالا مفید به نظر می رسد.
- ✓ در نظر گرفتن احتمال های مختلف جهت بروز خرابی در محورها (یا بخشهای محور)، مسئله را واقعی تر می نماید.
- ✓ تعریف مدل های غیر قطعی با در نظر گرفتن تغییر پارامترها در دوره های زمانی و تعریف آنها در قالب برنامه ریزی پویا.

مــراجع

[1] Qu, Bo, and Kerui Weng. "Path relinking approach for multiple allocation hub maximal covering problem." *Computers & Mathematics with Applications* Vol. 57, No. 11, pp. 1890-1894, 2009.

[2] Campbell, J.F., "Integer programming formulations of discrete hub location problems." *European Journal of Operational Research*, Vol. 72, No. 2, pp. 387-405, 1994.

[3] Alumur, Sibel A., Bahar Y. Kara, and Oya E. Karasan. "Multimodal hub location and hub network design." *Omega* 40, No. 6 pp. 927-939, 2012.

[4] Ishfaq, Rafay, and Charles R. Sox. "Design of intermodal logistics networks with hub delays." *European Journal of Operational Research* 220. Vol. 3, pp. 629-641, 2012.

[5] O'kelly, Morton E. "The location of interacting hub facilities." *Transportation science* 20, No. 2, pp. 92-106, 1986.

[6] Aykin, Turgut. "Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem." *European Journal of Operational Research* 79, No. 3, pp. 501-523, 1994.

[7] Marianov, Vladimir, and Daniel Serra. "Location models for airline hubs behaving as M/D/c queues." *Computers & Operations Research* 30, No. 7, pp. 983-1003, 2003.

[8] Sasaki, Mihiro, and Masao Fukushima. "On the hub-and-spoke model with arc capacity constraints." *Journal of the Operations Research Society of Japan-Keiei Kagaku* 46, No. 4, pp. 409-428, 2003.

[9] da Graça Costa, Maria, Maria Eugénia Captivo, and João Clímaco. "Capacitated single allocation hub location problem—A bi-criteria approach." *Computers &*

Operations Research 35, No. 11, pp. 3671-3695, 2008.

[10] Correia, Isabel, Stefan Nickel, and Francisco Saldanha-da-Gama. "The capacitated single-allocation hub location problem revisited: A note on a classical formulation." *European Journal of Operational Research* 207, No. 1 pp. 92-96, 2010.

[11] Ghodsi, Reza, Mehrdad Mohammadi, and Hamideh Rostami. "Hub covering location problem under capacity constraints." In *Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation (AMS), 2010 Fourth Asia International Conference on*, pp. 204-208. IEEE, 2010.

[۱۲] کریمی، حسین و بشیری، مهدی. (۱۳۹۲). مکان‌یابی محور پوششی کامل چند لایه با تخصیص یگانه. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۲۹، ۱۲۵-۱۱۷.

[۱۳] رزمی، جعفری و رحمن‌نیا، فهیمه. (۱۳۹۳). طراحی شبکخ توزیع محصولات کارخانه با استفاده از مدل"مکان‌یابی محور میانه" با در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت مراکز توزیع و سطح سرویس‌دهی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف،۳۰، ۱۳۶-۱۳۱.

[۱۴] غفاری نسب، نادر، غضنفری، مهدی و تیموری، ابراهیم. (۱۳۹۲). طراحی شبکه لجستیک محور استوار با در نظر گرفتن تقاضاهای تصادفی برای شرکت‌های ارائه دهنده خدمات لجستیکی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید، ۱، ۱۰۷-۹۷.

[۱۵] عیدی علیرضا و میرآخورلی عباس. (۱۳۹۱) ارائه یک روش ابتکاری ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله هاب پوششی در حالت فازی. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۳ (۲) :۱۶۱-۱۷۳.

[۱۶] اکبری پور حسین، سلماس نیا علی، برادران کاظم زاده رضا، مسیحی الیپس. (۱۳۹۴) توسعه هیوریستیک ترکیبی مقاوم به منظور حل مسئله مکان‌یابی تسهیلات هاب بدون محدودیت ظرفیت. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۶ (۲) :۲۳۹-۲۵۷.

[۱۷] بزرگی امیری علی، صبوحی فاطمه، توکلی زینب السادات و مرادحاصلی نیلوفر. (۱۳۹۵) مکان‌یابی همزمان نقاط انتقال و پناهگاه‌ها در شرایط بحران. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۷ (۳) :۰-۰

[۱۸] ارکات جمال و عطایی حشمت‌الله. (۱۳۹۵) ارائه‌ی مدل و رویکرد حل برای مسئله‌ی مکان‌یابی - مسیریابی - کنترل موجودی. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۷ (۱) :۶۹-۸۰.

[19] Lin, Cheng-Chang, and Shwu-Chiou Lee. "The competition game on hub network design." *Transportation Research Part B: Methodological* 44. No. 4, pp. 618-629, 2010.

[20] Correia, Isabel, Stefan Nickel, and Francisco Saldanha-da-Gama. "Single-assignment hub location problems with multiple capacity levels." *Transportation Research Part B: Methodological* 44.No. 8, 1047-1066, 2010.

[21] Gelareh, Shahin, Rahimeh Neamatian Monemi, and Stefan Nickel. "Multi-period hub location problems in transportation." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* No. 75, pp. 67-94, 2015.

[22] Sumichras, Robert T., and Ina S. Markham. "A heuristic and lower bound for a multi-depot routing problem." *Computers & operations research* 22, No. 10, pp. 1047-1056, 1995.

[23] Dondo, Rodolfo, and Jaime Cerdá. "A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows." *European Journal of Operational Research* 176, No. 3, pp. 1478-1507, 2007.

[24] Giosa, I. D., I. L. Tansini, and I. O. Viera. "New assignment algorithms for the multi-depot vehicle routing problem." *Journal of the operational research society* 53, No. 9, pp. 977-984, 2002.

[25] Yu, Bin, Z. Z. Yang, and J. X. Xie. "A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem."

Journal of the Operational Research Society 62, No. 1, pp. 183-188, 2011.

[۲۶] افشاری‌نیا، زهرا، توکلی مقدم، رضا و قلی‌پور کنعانی، یوسف. (۱۳۹۲). استفاده از روش تجزیه بندرز برای حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین چند محصولی دو سطحی با تقاضای تصادفی. نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع و سیستم‌های تولید،۱، ۱۶۵-۱۵۵.

[27] Amiri, Ali. "Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure." *European Journal of Operational Research* 171, No. 2, pp. 567-576, 2006.

[۲۸] تحسیری، احمدرضا و رهبری، علی. (۱۳۸۹). طراحی یک سیستم کنترل فرآیند تولید برای زنجیره تأمین چند مرحله-ای و تک محصولی. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید،۲۱، ۱۶۵-۱۵۴.

[۲۹] سپهری، محمد مهدی و کارگری، مهرداد. (۱۳۸۹). بهینه-یابی سبد سرویس در مسائل مسیریابی چندسطحی-چند محصولی و چند قرارگاهی وسایل نقلیه با هدف حداقل نمودن هزینه‌های توزیع. نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۲۱، ۶۱-۴۹.

[30] Sadjady, Hannan, and Hamid Davoudpour. "Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs." *Computers & Operations Research* 39, No. 7, pp. 1345-1354, 2012.

[۳۱] ذوالفقاری، روح ا...، جولای، فریبرز و موحدی، یاسر. (۱۳۹۲). ترتئه یک روی آزادسازی لاگرانژی برای یک مدل جدید تولید-توزیع در زنجیره تأمین دو سطحی چند محصولی. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۲۹، ۳۹-۲۵.

[32] Shankar, B. Latha, S. Basavarajappa, Jason CH Chen, and Rajeshwar S. Kadadevaramath. "Location and allocation decisions for multi-echelon supply chain network–A multi-objective evolutionary approach." *Expert Systems with Applications* 40, No. 2, pp. 551-562, 2013.

[۳۳]شیراوژن مسعود. (۱۳۸۸). مطالعه موردی مهندسی مجـدد فرآیندها با رویکرد فناوری اطلاعات در بنادر تجادری پنجـره واحد (Single Window). ششمین کنفرانس بین المللـی مدیریت فناوری اطلاعات و ارتباطات.