Developing a hierarchical hub location model for sustainable supply chain network

Shima Shirvani (Master of Science)
Department of industrial engineering, faculty of engineering, university of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
Email: shimashirvani7313@pgs.usb.ac.ir
Mohammad Reza Shahraki (Assistant professor)
Department of Industrial Engineering, University of Sistan and Bluchestan, Zahedan, Iran.
Email: mr.shahraki@eng.usb.ac.ir
Faranak Hosseinzadeh Saljooghi (Associate professor)
Department of Mathematics, Faculty Mathematics, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
Email: saljooghi@math.usb.ac.ir

Abstract
Hub location problems are one of the most important branches of transportation, which are used a lot in strategic areas. In the distribution network, the use of hubs reduces the costs of transferring current in the network. This study presents a two-objective model for hierarchical hub location problem. Considering the importance of environmental problems in the real world and concern of increasing destructive environmental pollutions, in this research, in addition to improving and reducing costs, environmental issues have also been addressed. The proposed model examines multi-mode transportation and the creation of several types of transportation systems in one hub. In the following, problems with small dimensions are solved by using GAMS software, and problems with large dimensions are solved by using meta-heuristic algorithms of genetics, strong Pareto and gray wolf, and the results are compared with each other. According to the results, it can be seen that the presented algorithms have good efficiency.

Keywords: Location, Hierarchical Hub, Sustainability, Supply Chain, Metaheuristic Algorithm

ارائه یک مدل ریاضی چند هدفه مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی برای طراحی شبکه زنجیره تامین پایدار

شیما شیروانی (کارشناس ارشد)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. shimashirvani7313@pgs.usb.ac.ir
محمدرضا شهرکی* (استادیار)
استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.mr.shahraki@eng.usb.ac.ir
فرانک حسین زاده سلجوقی (دانشیار)
گروه ریاضی، دانشکده ریاضی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.saljooghi@math.usb.ac.ir

چکیده

مسائل مکان‌یابی هاب یکی از مهم‌ترین شاخه‌های حمل‌ونقل می‌باشد که استفاده زیادی از این نوع مسائل در حوزه‌های استراتژیک می‌شود. در شبکه توزیع، استفاده از هاب‌ها باعث کاهش هزینه‌های انتقال جریان در شبکه می‌شود. در این تحقیق یک مدل دو هدفه برای مسأله مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ارائه‌شده است. با توجه به اهمیت مشکلات زیست‌محیطی در دنیای واقعی و نگرانی از افزایش آلودگی‌های مخرب زیست‌محیطی، در این پژوهش علاوه بر بهبود و کاهش هزینه‌ها، به مسائل زیست‌محیطی نیز پرداخته شده است. مدل ارائه‌شده به بررسی حمل‌ونقل چندحالته و ایجاد چند نوع سیستم حمل‌ونقل در یک هاب می‌پردازد. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار GAMS مسائل با ابعاد کوچک حل گردیده و در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری ژنتیک، پارتویی قوی و گرگ خاکستری حل می‌شود و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های ارائه‌شده دارای کارایی مناسبی است.

واژگان کلیدی: مسأله مکان‌یابی، هاب سلسله‌مراتبی، پایداری، زنجیره تامین، الگوریتم فراابتکاری

1. مقدمه

رفاه اجتماعی و توسعه اقتصادی با بالارفتن تقاضای حمل‌ونقل توسعه می‌یابد. همچنین ارزان بودن خدمات حمل‌ونقل، منافع متفاوتی را در توسعه کشورها در بردارد. بنابراین در جهت خدمت ارزان قیمت حمل‌ونقل و کاهش مصرف سوخت، بهینه سازی در بخش حمل‌ونقل مهم و ضروری می‌باشد. مسئله مکان‌یابی هاب یکی از مباحث مطرح در حوزه مسائل مکان‌یابی است. برای طراحی شبکه‌های توزیع از مسئله مکان‌یابی هاب‌ها استفاده می‌شود که در آن هر جفت مبدأ-مقصد مستقیم سرویس‌دهی نمی‌شوند و تسهیلات هاب، جریان‌ها را بر معیارها و مزیت‌های اقتصادی متمرکز می‌کند. به‌عبارت‌دیگر هاب-

*نویسنده مسئول

ها امکانات خاصی هستند که به‌عنوان مراکز انتقال‌دهنده و هماهنگ‌کننده و تجمیع در سیستم‌های پخش کالا مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چنین سیستم‌هایی، جریان‌ها با مبدأهایی که دارای مقاصد متفاوت هستند طی مسیر با هاب‌ها یکی شده و با جریان‌هایی که مبدأهای مختلف اما مقاصد یکسان دارند ترکیب می‌شوند، دراصل عمل یکپارچه‌سازی انجام می‌شود. این مسئله، از نوع مسائل بهینه سازی شبکه‌ای است که دارای کاربردهای وسیعی می‌باشد. خطوط هوایی و فرودگاه‌ها، توزیع و ارسال سفارشی، خدمات پستی، انبارهای زنجیره تأمین، جایابی واحدهای تولیدی و شبکه‌های کامپیوتری از کاربرد های این دسته از مسائل هستند که تحقیقات زیادی در زمینه مدلسازی و روش‌های حل آن منتشر گردیده و مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته‌اند. برای حل این نوع مسائل در ابعاد کوچک می‌توان از روش‌های بهینه سازی عدد صحیح استفاده کرد در طورتیکه در مسائل با ابعاد بزرگتر با توجه به خاصیت NP-hard بودنشان، باید از روش‌های ابتکاری و یا فراابتکاری استفاده نمود[1]. شبکه‌های هاب توسط گلدمن[۲] در سال 1969 بیان شد. سپس اوکلی در سال 1987 توانست اولین مطالعه در زمینه شبکه‌های هوایی را ارائه دهد و اولین فرمول‌بندی ریاضی برای یک مسئله مکان‌یابی هاب تک تخصیصی شناخته شد که این فرمول‌بندی به مسئله تک تخصیصی با تعداد هاب معین اشاره دارد[2]، ولی اولین تحقیقات در این زمینه که باعث پیشرفت زیادی در تفهیم سیستم‌های واسطه‌ای و توسعه مدل‌های پایه‌ای با تمرکز بر بهینه و کمینه‌کردن هزینه‌های جریان و هزینه‌های ثابت تسهیلات داشتند، توسط [3] و [4] معرفی شدند. از آن زمان، پژوهشگران متعددی به کار و تحقیق بر روی این نوع از مسائل روی آوردند، که این میزان از توجه، غالبا نیاز شدید سیتم‌های حمل و نقل و ارتباطات به ایجاد زیر ساخت‌های نوین را نشان می دهد[5]. مختار و همکاران به ارائه یک مدل برای حل مسائل مکان یابی هاب پرداختند[6].آلومور و همکاران در سال 2012 به بررسی دیدگاه‌های مربوط به مدل‌های مسائل مکان‌یابی هاب برای مدل سازی بهتر پرداختند[7]. همچنین مدل مکان‌یابی هاب تحت عدم قطعیت توسط شیروانی و شهرکی ارائه شد[8]. با مطالعه منابع پیشین مشاهده می شود که مسائل مکانیابی هاب مورد توجه محققین زیادی قرار رفته است ولی کمتر از ساختار سلسله‌مراتبی استفاده شده است، چرا که وجود ساختار سلسله‌مراتبی این مزیت را ایجاد کرده است تا بتوان انتقال بین هابی وجود داشته باشد و هزینه ارسال کاهش یابد. همچنین در پژوهش حاضربا استفاده از ساختار هاب سلسله‌مراتبی علاوه بر طراحی شبکه‌ی موردنظر بر اساس کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه، معیارهای توسعه پایدار شامل شاخص‌های زیست‌محیطی در نظرگرفته شده است، که این پژوهش را از دیگر پژوهش‌ها متمایز می‌کند و چنین تحقیقی صورت نگرفته است.

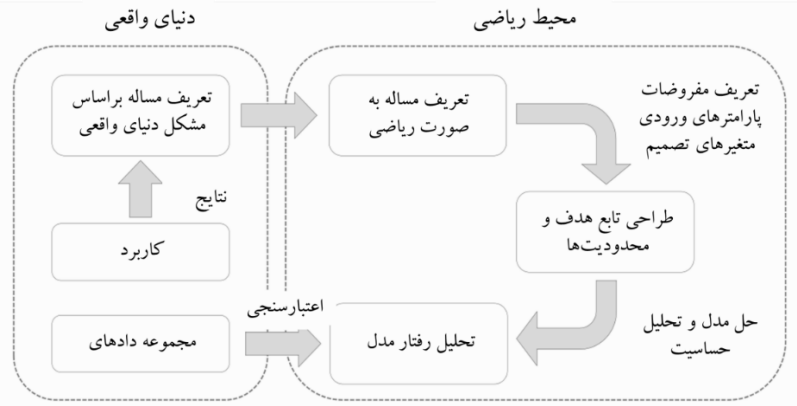
مسئله این تحقیق از رده پژوهش‌های کمی است که این مسئله مبتنی بر شرایط دنیای واقعی، فرمول‌بندی ریاضی شده و در نهایت با تجزیه‌وتحلیل متغیرهای عددی پاسخ‌های اجراشدنی در اختیار ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان قرار می‌گیرد. در این تحقیق نیز به‌منظور ارائه تحلیل‌های مناسب در راستای حل مساله مطرح‌شده، مدل ریاضی پیشنهادی در محیط کامپیوتری کد نویسی شده تا بتوان به خروجی‌های عددی مناسب دسترسی پیدا نمود. همچنین استفاده از تحلیل حساسیت یک ابزار مناسب برای ارزیابی عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی می باشد. با توجه به اینکه مساله این تحقیق در حوزه تحقیق در عملیات قرار دارد، جهت حل تست و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک از حل‌کننده ***Cplex*** در محیط نرم‌افزار تجاری ***GAMS 24.1*** استفاده خواهد شد. همچنین با توجه به اینکه مساله منطقه‌بندی از رده تحقیقات ***NP- hard*** است، به‌منظور حل نمودهای عددی در ابعاد دنیای واقعی از الگوریتم‌های ابتکاری در محیط برنامه‌نویسی ***MATLAB*** استفاده خواهد شد. با توجه به بخش‌های مختلف روش تحقیق، شکل1 فلوچارت طراحی مدل بهینه‌سازی تحقیق را نشان می‌دهد.

2. بیان مسأله

اصولاً، در مسائلی با ویژگی‌های حاضر، چند عامل در زمینه‌های واقعی و ریاضیاتی تحقیق، بسیار تأثیرگذارند که از آن جمله می‌توان به تعداد، ظرفیت و هزینه‌ی احداث تسهیلات اشاره کرد. به‌ویژه، در مسائل با رویکرد طراحی شبکه که بر روی مکان‌یابی تسهیلات تأکید

[2] Goldman

دارند، این مورد بیشتر نمود دارد. در مورد تعداد تسهیلات، می‌توان چند رویه را اجرا کرد. اولین رویه، تصمیم‌گیری برحسب هزینه است. به این صورت که آن تعداد از تسهیلات احداث می‌شوند که کم‌ترین هزینه را برای مجریان در برداشته باشند. از این مورد در مدل‌های ریاضی مسائل لجستیکی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. در رویه‌ی دوم، تعداد هاب‌ها را به‌صورت برون‌زا تعیین می‌شود. مشخص کردن این تعداد نیز خود به چند طریق انجام می‌شود. یکی استفاده از اسناد بالادستی است که به‌عنوان چارچوب استراتژیک تصمیمات لجستیکی، مدنظر قرارگرفته است. روش دیگر، بهره‌گیری از نظرات خبرگان امر است. دلیل این روش، اشراف کامل آن‌ها به شرایط مسأله و دید واقع‌بینانه‌تر آن‌هاست. در مورد مسأله‌ی حاضر، با توجه به این‌که چند نوع هاب مدنظر است، تعیین تعداد هریک از انواع هاب‌ها که درواقع همان مراکز لجستیکی هستند، بر اساس ساختار جریان بین هاب‌ها و همچنین نیاز نقاط شبکه مشخص می‌شود. درواقع می‌توان گفت که هدف مدل ریاضی حاضر مکان‌یابی انواع مختلف هاب‌ها و تعیین روش حمل‌ونقل مورد پشتیبانی در هاب‌ها، تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها، تعیین نوع حمل‌ونقل مستقیم یا بر اساس هاب مابین دو گره و مشخص کردن نوع ارتباط بین هابی و طراحی شبکه‌ی موردنظر بر اساس کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه، معیارهای توسعه پایدار شامل شاخص‌های زیست‌محیطی است.



شکل 1. ساختار طراحی مدل بهینه‌سازی

3. روش تحقیق

در این پژوهش به‌منظور فرمول‌بندی مساله مطرح‌شده، از مقالات موجود در پیشینه پژوهش استفاده‌شده است. با توجه به اینکه مساله پژوهش دارای چند مد حمل‌ونقل متفاوت است، از مقاله (ترکستانی و همکاران، 2018) ایده گرفته‌شده تا بتوان فرمول‌بندی مناسبی ارائه داد[9]. همچنین ساختار سلسله‌مراتبی نیز بر اساس پژوهش‌های (خودمانی- یزدی و همکاران، 2019) و (شانگ و همکاران، 2020) استفاده‌شده است[10]و[11]. در نهایت به‌منظور فرمول‌بندی تخفیف زمانی نیز از پژوهش (آلومار و همکاران، 2012) بهره گرفته‌شده است. قابل‌توجه است که برای طراحی مدل از این مقالات ایده گرفته‌شده، اما فرمول‌بندی مساله توسط محقق صورت گرفته است[12].

مفروضات مدل پیشنهادی

به‌طورکلی می‌توان مفروضات مدل ریاضی را به‌صورت زیر تشریح نمود.

- تعداد گره‌های عادی و گره‌های بالقوه جهت انتخاب به‌عنوان هاب معلوم هستند:
- تعداد هاب‌هایی که از هر نوع باید مکان‌یابی شوند مشخص است؛
- محل تمامی گره‌ها معلوم می‌باشد؛
- ساختار شبکه‌ی کلی مسئله، بدون جهت است؛
- شبکه‌ی ارتباط‌دهنده‌ی هاب غیر کامل است؛
- هاب‌ها محدودیت ظرفیت ندارند؛

- تخصیص سایر گره‌ها به هاب‌ها، به‌صورت تک‌تخصیصی است؛
- محدودیت بودجه‌ای وجود ندارد؛
- روش‌های حمل‌ونقل در چند دسته مختلف بررسی می‌شوند؛
- ارتباط مستقیم بین دو گره غیر هاب مجاز است؛
- برای ارتباطات میان هابی، عامل تخفیف زمانی وجود دارد؛
- حمل‌ونقل بین هابی در دو دسته جاده‌ای و سایر روش‌ها بررسی می‌شود.

نمادها مجموعه‌ها

N , $\{i,j\}$ = مجموعه‌ی کل گره‌های شبکه

H , $\{k,l\}$ = مجموعه‌ی گره‌های بالقوه برای احداث هاب

T , $\{t\}$ = مجموعه‌ی انواع مختلف تسهیلات هاب

$\acute{M}$, $\{m\}$ = مجموعه‌ی روش‌های حمل‌ونقل (g: روش حمل‌ونقل جاده‌ای)

E , $\{e\}$ = مجموعه‌ی نوع کالاهای حمل شده

V , $\{v\}$ = مجموعه‌ی انواع مختلف وسایل حمل‌ونقل جاده‌ای

پارامترهای ورودی

P^t = تعداد هاب نوع t که باید احداث شود

FH_k^{mt} = هزینه‌ی ثابت احداث یک هاب لجستیکی از نوع t در مکان بالقوه‌ی k

f_{ij}^e = جریان کالایی از نوع e مابین دو گره

$\hat{C}_{ij}$ = هزینه‌ی حمل‌ونقل مابین دو گره در صورت حمل‌ونقل مستقیم

C_{ij}^m = هزینه‌ی حمل‌ونقل مابین دو گره در حمل‌ونقل بین هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m

HL_{kl}^m = هزینه‌ی اتصال شبکه‌ی بین هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m

cap^v = ظرفیت وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای نوع v

CV^v = هزینه‌ی استفاده از وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای نوع v

$Size^m$ = ظرفیت کانتینر مورداستفاده در روش حمل‌ونقل m (غیر از روش جاده‌ای)

d_{kl}^m = هزینه‌ی تخلیه و بارگیری کانتینر مورداستفاده در روش حمل‌ونقل m (غیر از روش جاده‌ای) در حمل مابین هاب‌های k و l

tt_{ij}^m = زمان حمل‌ونقل بین دو گره با استفاده از روش حمل‌ونقل m

ot_k^m = زمان عملیاتی موردنیاز روش حمل‌ونقل m در هاب k

α^m = ضریب تخفیف زمانی بین هابی روش حمل‌ونقل m

SB_{ij} = محدوده‌ی زمان خدمت مابین دو گره

M = یک عدد به‌اندازه‌ی کافی بزرگ

متغیر های تصمیم

H_k^{mt} = اگر یک هاب از نوع t در مکان بالقوه‌ی k با پشتیبانی از روش حمل‌ونقل m احداث شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

$\widehat{Y}_{ij}$ = اگر حمل‌ونقل بین دو گره به‌صورت مستقیم انجام شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

Y_{ijkl}^{m} = اگر حمل‌ونقل بین دو گره از طریق پیوند هابی k و l با استفاده از روش حمل‌ونقل m صورت گیرد، یک؛ در غیر این صورت صفر

Z_{kl}^{m} = اگر پیوند هابی روش حمل‌ونقل m بین دو هاب k و l ایجاد شود، یک؛ در غیر این صورت صفر

X_{ik} = اگر گره i به هاب k تخصیص یابد، یک؛ در غیر این صورت صفر

TFG_{kl}^{m} = میزان کالای حمل شده بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای

num_{kl}^{v} = تعداد وسیله‌ی حمل‌ونقل موردنیاز از نوع v بین هاب‌های k و l

ICG_{kl}^{m} = هزینه‌ی جابجایی کالایی بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ای

TFM_{kl}^{m} = میزان کالای حمل شده بین هاب‌های k و l از طریق سایر روش حمل‌ونقل (غیر از روش جاده‌ای)

ICM_{kl}^{m} = هزینه‌ی جابجایی کالایی بین هاب‌های k و l از طریق سایر روش حمل‌ونقل (غیر از روش جاده‌ای)

ST_{ij} = زمان خدمت حمل‌ونقل کالا بین دو گره

مدل ریاضی

$$\min \sum_{k,m,t} FH_k^{mt} H_k^{mt} + \sum_{k,l,m:k\neq l} HL_{kl}^{m} Z_{kl}^{m} + \sum_{i,j,e} f_{ij}^{e} \hat{C}_{ij} \hat{Y}_{ij} + \sum_{i,j:i\neq i,k,l:k\neq l,m,e} \left(C_{ik}^{g} + C_{kj}^{g}\right) Y_{ijkl}^{m} f_{ij}^{e} + \sum_{k,l:k\neq l\neq,m=\{g\}} ICG_{kl}^{g} + \sum_{k,l:k\neq l,m\neq\{g\}} ICM_{kl}^{m} \quad (1\text{-الف})$$

$$\min \sum_{k,m,t} EnH_k^{mt} H_k^{mt} + \sum_{k,l,m:k\neq l} EnL_{kl}^{m} Z_{kl}^{m} + \sum_{i,j,e} f_{ij}^{e} EnC_{ij} \hat{Y}_{ij} + \sum_{i,j:i\neq i,k,l:k\neq l,m,e} \left(EnC_{ik}^{g} + EnC_{kj}^{g}\right) Y_{ijkl}^{m} f_{ij}^{e} \quad (1\text{-ب})$$

$Subject\ to$:

$$\sum_{k,m} H_k^{mt} = P^t \quad \forall t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{k} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i} X_{ik} \leq M \sum_{t} H_k^{t} \quad \forall k \in H \quad (4)$$

$$\sum_{t} H_k^{t} \leq M \sum_{i} X_{ik} \quad \forall k \in H \quad (5)$$

$$\sum_{i} X_{ik} \leq M X_{kk} \quad \forall k \in H \quad (6)$$

$$2Z_{kl}^{m} \leq H_k^{mt} + H_l^{mt} \quad \forall k,l \in H: k \neq l, m \in \acute{M}, t \in T \quad (7)$$

$$2Z_{kl}^{m} \leq \sum_{t} H_k^{mt} + \sum_{t} H_l^{mt} \quad \forall k,l \in H: k \neq l, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{l:l\neq k,m} Z_{kl}^{m} \geq 1 + M(X_{kk} - 1) \quad \forall k \in H \quad (9)$$

$$\sum_{k,l:k\neq l,m} Y_{ijkl}^{m} = 1 - \hat{Y}_{ij} \quad \forall i,j \in N: i \neq j \quad (10)$$

$$\sum_{l:l\neq k,m} Y_{ijkl}^{m} - \sum_{l:l\neq k,m} Y_{ijlk}^{m} = X_{ik} - X_{jk} \quad \forall i,j \in N: i \neq j, k \in H \quad (11)$$

$$Y_{ijkl}^{m} + Y_{ijlk}^{m} \le Z_{kl}^{m} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \ , k,l \in H : k \ne l \tag{12}$$

$$TFG_{kl}^{m} = \sum_{i,j:i\ne j\ ,e} f_{ij}^{e} Y_{ijkl}^{m} \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \tag{13}$$

$$num_{kl}^{v} \ge \frac{TFG_{kl}^{m}}{cap^{v}} \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \ , v \in V \tag{14}$$

$$ICG_{kl}^{m} = num_{kl}^{v} CV^{v} \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \ , v \in V \tag{15}$$

$$TFM_{kl}^{m} = \sum_{i,j:i\ne j\ ,e} f_{ij}^{e} Y_{ijkl}^{m} \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m \in \acute{M} \tag{16}$$

$$ICM_{kl}^{m} = (TFM_{kl}^{m}/Size^{m})(C_{kl}^{m} + d_{kl}^{m}) \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m \in \acute{M} \tag{17}$$

$$ST_{ij} = \left[\sum_{k:k\ne i} tt_{ik}^{g} X_{ik} + \sum_{k.l:k\ne l\ ,t} ot_{k}^{m} + \left(\alpha^{m} tt_{ij}^{m}\right) + ot_{l}^{m} + \sum_{k:k\ne j} tt_{kj}^{g} X_{kj} \right] Y_{ijkl}^{m} + tt_{ij}^{m} \hat{Y}_{ij} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \tag{18}$$

$$ST_{ij} \le SB_{ij} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \tag{19}$$

$$ST_{ij} \le SB_{ij} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \tag{20}$$

$$X_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, k \in H \tag{21}$$

$$Z_{kl}^{m} \in \{0,1\} \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m \in \acute{M} \tag{22}$$

$$Y_{ijkl}^{m} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \ , k,l \in H : k \ne l \tag{23}$$

$$\hat{Y}_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N : i \ne j \tag{24}$$

$$TFG_{kl}^{m} \ge 0 \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \tag{25}$$

$$num_{kl}^{v} \ge 0 \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \tag{26}$$

$$ICG_{kl}^{m} \ge 0 \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m = \{g\} \tag{27}$$

$$TFM_{kl}^{m} \ge 0 \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m \in \acute{M} \tag{28}$$

$$ICM_{kl}^{m} \ge 0 \quad \forall k,l \in H : k \ne l \ , m \in \acute{M} \tag{29}$$

$$ST_{ij} \ge 0 \quad \forall i,j \in N : i \ne j \tag{30}$$

معادله (1- الف) تابع هدف اول مسأله است که متشکل از شش بخش هزینه‌ای است. در بخش اول هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات، در بخش دوم هزینه‌ی احداث زیرساخت بین‌هابی، در بخش سوم هزینه‌ی حمل‌ونقل در صورت حمل مستقیم کالا و در بخش‌های چهارم، پنجم و ششم، هزینه‌ی حمل‌ونقل در صورت استفاده از شبکه‌ی هابی محاسبه می‌گردد.

معادله (1- ب) به کمینه‌سازی اثرات مخرب زیست‌محیطی شامل اثر ناشی از احداث تسهیلات، احداث زیرساخت‌های بین‌هابی، اثرات مخرب‌زیست‌محیطی ناشی از انجام عملیات حمل‌ونقل در حالات مختلف می پردازد.

محدودیت (2) تعداد هاب‌های احداثی از هر نوع با پشتیبانی روش حمل‌ونقل معین را مشخص می‌نماید. محدودیت (3) بیان می‌کند که هر گره غیرهاب می‌تواند تنها به یک هاب تخصیص یابد. محدودیت‌های (4) و (5) رابطه‌ی بین دو نوع متغیر احداث تسهیل را برقرار می‌کند. محدودیت (6) نشان‌دهنده‌ی این است که یک گره زمانی می‌تواند به یک هاب تخصیص یابد که هاب موردنظر احداث‌شده باشد. کارکرد محدودیت (7) در این است که یک ارتباط بین هابی با استفاده از یک روش حمل‌ونقل (غیر از جاده‌ای) زمانی می‌تواند برقرار شود که هر دو گره موردنظر به‌عنوان هاب انتخاب‌شده و از روش موردنظر پشتیبانی نمایند. این ارتباط در روش حمل‌ونقل جاده‌ای مستقل از نوع روش پشتیبانی شده در هاب‌ها است چرا که ارتباط جاده‌ای مانند سایر روش‌ها (ریلی و هوایی) نیاز به تسهیلات و تجهیزات خاص ارتباطی و تخلیه و بارگیری ندارد. این مسئله در محدودیت (8) نشان داده‌شده است جایی که با احداث دو هاب در دونقطه، ارتباط جاده‌ای بین آن دو هاب بدون توجه به نوع روش پشتیبانی شده، می‌تواند برقرار گردد. محدودیت (9) بیان می‌کند که درصورتی‌که یک نقطه به‌عنوان هاب انتخاب شود، حتماً به یک هاب دیگر با ارتباط بین هابی متصل خواهد شد. در محدودیت (10)، انتخاب مابین روش حمل‌ونقل مستقیم و بر اساس هاب صورت می‌گیرد. محدودیت (11)، محدودیت تعادل جریان مابین گره‌ها می‌باشد. این محدودیت تعیین‌کننده‌ی این است که کدام ارتباط بین هابی جهت حمل‌ونقل مابین دو گره مورداستفاده قرار گیرد. محدودیت (12) تضمین می‌نماید که جریان کالایی فقط بر روی پیوندهای هابی احداث‌شده صورت پذیرد. محدودیت (13) مقدار کل کالای حمل شده در بین دو هاب با استفاده از روش حمل جاده‌ای

را محاسبه می‌کند. محدودیت (14) تعداد وسیله‌ی موردنیاز از هر نوع را تعیین می‌نماید و محدودیت (15) هزینه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای بین هابی را محاسبه می‌کند. در محدودیت (16) مقدار کل کالای حمل شده‌ی بین هابی برای سایر روش‌های حمل‌ونقل (غیر از جاده‌ای) محاسبه می‌شود و در محدودیت (17) هزینه‌ی این نوع حمل‌ونقل مابین دو هاب مشخص می‌گردد. محدودیت (18) کل زمان خدمت بین دو گره را محاسبه کرده و در محدودیت (19) کران مربوط به آن را مشخص می‌نماید. محدودیت‌های (20)تا (30) دامنه مقداردهی متغیرهای تصمیم مسأله را نشان می‌دهد.

با توجه به این‌که مسأله طراحی شبکه هاب های لجستیکی از رده مسائل NP- hard است، بنابراین در این تحقیق جهت حل نمونه-های عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود.

3-1. الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA- II)

یکی از الگوریتم‌هایی که بسیار پرکاربرد و قدرتمند برای بدست‌آوردن جواب‌های بهینه است، الگوریتم NSGA- II می‌باشد که کارایی آن در حل مسائل مختلف، به اثبات رسیده است. دب و همکاران (2002) یک نسخه دوم از الگوریتم ژنتیک دوهدفه که علاوه بر بدست‌آوردن کیفیت جواب‌ها، تنوع و گوناگونی بدست آوردن جواب-های بهینه پارتویی حائز اهمیت بود، ارائه کردند[10]. این الگوریتم با دو معیار اصلی به جواب‌ها پاسخ می دهد: اول برگزیده شدن جواب‌های باکیفیت و دوم اگر دو جواب با کیفیت مشابه حاصل شود، جوابی که با ساختار منظم‌تری است، انتخاب می‌شود. پس اول کیفیت و سپس نظم موردتوجه قرار می‌گیرند. الگوریتم NSGA- II دارای دو فاز شناخته‌شده می‌باشد، فاز اول استفاده از معیار رتبه‌بندی و مفهوم غلبه و فاز دوم استفاده از فاصله ازدحامی که مربوط به نظم آن‌هاست. در فاز اول رتبه‌بندی جواب‌ها مشخص می‌گردد و برای این دو مقدار محاسبه می‌شوند، تعداد دفعاتی که یک جواب مغلوب می‌شود و مجموعه جواب‌هایی که جواب فعلی بر آن‌ها غالب می‌شود. جهت تعیین دو مقدار بالا، پس از مقایسات جواب‌ها با یک‌دیگر جواب‌های نامغلوب و یا تقریبی از جبهه پارتویی در واقع همان جواب‌هایی هستند که تعداد دفعات مغلوب شدنشان صفر می‌باشد.

3-2. الگوریتم تکاملی پارتویی قوی (SPEA- II)

الگوریتم‌های SPEA و SPEA- II هر دو الگوریتم‌های قدرتمند و کاربردی هستند که از یک آرشیو خارجی به منظور ذخیره پاسخ‌های نامغلوبی که در مراحل جستجوی الگوریتم یافت می‌شوند، استفاده می‌کنند. در الگوریتم SPEA ضعف‌هایی در محاسبه مقادیر قوت و برازندگی وجود داشت. با توجه به نبود معیار ثانویه‌ای جهت مقایسه پاسخ‌های نا مغلوب برای این الگوریتم، محققان نسخه ثانویه این الگوریتم را معرفی کردند که ضعف‌های اشاره‌شده بر طرف شده بود. چارچوب کاری الگوریتم SPEA- II در ادامه تشریح می‌شود:

N_E: ماکزیمم اندازه آرشیو پاسخ‌های نا مغلوب E

N_F: اندازه جمعیت

K: پارامتر محاسبه تراکم $(K = \sqrt{N_E + N_F})$

گام 1: یک جمعیت از پاسخ‌های اولیه P_0 ایجاد کنید و قرار دهید $E_0 = \emptyset$.

گام 2: برازندگی هر پاسخ i در مجموعه‌ی $P_t \cup E_t$ را به‌صورت زیر محاسبه کنید.

زیرگام 2- 1- : ابتدا برازندگی خام پاسخ i را از رابطه زیر محاسبه کنید:

$$R(i) = \sum_{j \in P_t} s(j) \qquad \forall j > i \in P_t \qquad (31)$$

که در این رابطه، علامت $j > i$ به معنای آن است که j بر پاسخ i غلبه می‌نماید. همچنین s(i) مقدار قوت پاسخ را نشان می‌دهد که درواقع تعداد پاسخ‌هایی است که توسط i مغلوب می‌شود.

زیرگام 2- 2 : تراکم پاسخ i را به‌صورت معادله زیر محاسبه کنید:

$$D(i) = \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \qquad \forall i \in P_t \qquad (32)$$

که در این رابطه σ_i^k فاصله بین پاسخ i و k امین همسایگی نزدیک به آن می‌باشد.

زیرگام 2-3 : نهایتاً مقدار برازندگی از جمع مقدار برازندگی خام و تراکم پاسخ i به دست می‌آید.

$$F(i) = R(i) + D(i) \qquad \forall i \in P_t \qquad (33)$$

گام 3: تمام پاسخ‌های نا مغلوب موجود در مجموعه $P_t \cup E_t$ را به E_{+1} کپی کنید. ممکن است دو حالت رخ دهد:

حالت اول: اگر $|E_{t+1}| > N_E$ به تعداد $|E_{t+1}| - N_E$ پاسخ با روش تکراری حذف پاسخ با معیار σ^k، حذف می‌گردد. درواقع پاسخی که مینیمم فاصله σ^k را از دیگر پاسخ‌ها دارد در ابتدا حذف می‌شود. بااین‌حال، اگرچند پاسخ دارای حداقل فاصله باشند، دومین کمترین فاصله می‌تواند مشخص شود و به همین صورت تا نهایتاً پاسخ‌های اضافی حذف شوند (این معیار باعث می‌شود که پاسخ‌های مشابه یا نزدیک به هم که اهمیتی در تراکم پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کنند حذف شوند).

حالت دوم: اگر $|E_{t+1}| \le N_E$ ، به تعداد $N_E - |E_{t+1}|$ پاسخ مغلوب شده بر اساس مقادیر برازندگی آن‌ها از مجموعه $P_t \cup E_t$ به مجموعه E_{t+1} می‌یابد.

گام 4: اگر شرایط خاتمه فراهم‌شده باشد، الگوریتم متوقف‌شده و پاسخ‌های E_{t+1} را برمی‌گرداند.

گام 5: با استفاده از روش رقابت دوتایی والدین از مجموعه E_{t+1} انتخاب می‌گردد.

گام 6: اپراتورهای ترکیب و جهش بر روی والدین بکار برده و به تعداد N_P فرزند تولید می‌گردد. فرزندان در مجموعه P_{t+1} کپی شده و به مقدار شمارنده یک واحد اضافه می‌گردد ($t = t+1$) و سپس به گام 2 بازگشت می‌شود.

همچنین در الگوریتم نیز از همان شیوه ترکیب و جهش استفاده‌شده در الگوریتم NSGA-II استفاده می‌شود.

3-3. الگوریتم چندهدفه گرگ خاکستری

نسخه اولیه الگوریتم گرگ خاکستری توسط میر جلیلی و همکاران (2014) ارائه شد و سپس آن‌ها ساختار توسعه‌ای این الگوریتم را برای حل مسائل چندهدفه ارائه دادند[11]. این الگوریتم برمبنای ساختار اجتماعی گرگ‌های خاکستری طراحی‌شده و دارای عملگرهای سلسله‌مراتب اجتماعی، محاصره طعمه، شکار، حمله به طعمه و جستجو برای شکار است. اگر $\overrightarrow{X_p}$ بردار موقعیت طعمه و $\vec{X}$ موقعیت گرگ خاکستری باشد، بنابراین در این الگوریتم بهترین جواب به‌عنوان α در نظر گرفته‌شده و دومین و سومین پاسخ برتر به ترتیب به‌عنوان بتا β و دلتا δ نامیده می‌شوند. سایر پاسخ‌ها نیز ω نامیده می‌شوند. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره‌ای، معادلات زیر استفاده می‌شود.

$$\overrightarrow{D} = \left|\overrightarrow{D}.\overrightarrow{X_p}(t) - \overrightarrow{X}(t)\right| \quad (43)$$

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) - \overrightarrow{A}.\overrightarrow{D} \quad (35)$$

که در آن t شماره تکرار الگوریتم، $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردار ضرایب است که توسط معادلات زیر محاسبه می‌شوند.

$$\overrightarrow{A} = 2\vec{a}.\overrightarrow{r_1} - \vec{a} \quad (36)$$

$$\overrightarrow{C} = 2.\overrightarrow{r_2} \quad (37)$$

که در آن درایه‌های بردار $\vec{a}$به‌صورت خطی از 2 به 0 کاهش می‌یابند. بردارهای $\overrightarrow{r_1}$ و $\overrightarrow{r_2}$ نیز به‌صورت تصادفی از بازه‌ی $[0,1]$ انتخاب می‌شوند. جهت شبیه‌سازی ریاضی رفتار شکار گرگ خاکستری، آلفا، بتا و دلتا فرض می‌شود که از محل شکار اطلاع بهتری دارند؛ بنابراین، 3 جواب بهتر به‌دست‌آمده ذخیره می‌گردند و عامل‌های دیگر جستجو (ازجمله امگا) باید موقعیت خود را مطابق با موقعیت بهترین عامل جستجو به‌روزرسانی کنند. معادلات زیر بدین منظور ارائه‌شده‌اند.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{D_\alpha} &= \left|\overrightarrow{C_1}.\overrightarrow{X}_\alpha - \overrightarrow{X}\right|, \overrightarrow{D}_\beta \\ &= \left|\overrightarrow{C_2}.\overrightarrow{X}_\beta - \overrightarrow{X}\right|, \overrightarrow{D}_\delta \\ &= \left|\overrightarrow{C}_3.\overrightarrow{X}_\delta - \overrightarrow{X}\right|\end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned}\overrightarrow{X}_1 &= \overrightarrow{X}_\alpha - \overrightarrow{A}_1.(\overrightarrow{D}_\alpha), \overrightarrow{X}_2 \\ &= \overrightarrow{X}_\beta - \overrightarrow{A}_2.(\overrightarrow{D}_\beta), \overrightarrow{X}_3 \\ &= \overrightarrow{X}_3 - \overrightarrow{A}_3(\overrightarrow{D}_\delta)\end{aligned} \quad (39)$$

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X}_1 + \overrightarrow{X}_2 + \overrightarrow{X}_3}{3} \quad (40)$$

4. تجزیه‌وتحلیل نتایج

برای بررسی هر چه دقیق‌تر یک مسأله‌ی واقعی، نیاز به داده‌هایی است که تا حد ممکن به واقعیت نزدیک بوده و یا نتیجه‌ی آمار و اطلاعات گذشته از بررسی شبکه‌های حمل‌ونقل باشد. بنابراین، داده‌های موردنیاز در دو دسته‌ی پارامترهای آماری موجود و پارامترهای قابل‌محاسبه تقسیم می‌شوند. از بین موارد الزامی برای مدل ریاضی مسأله، پارامترهای میزان جریان کالایی و هزینه‌ی هر تن- کیلومتر انواع مختلف وسایل نقلیه، در سامانه‌های اطلاعاتی

نهادهای مربوطه موجود هستند؛ ولی داده‌هایی مانند فاصله‌ی بین مراکز موردبررسی (به دلیل عدم وجود پایانه‌های مرزی و فواصل مابین آن‌ها و نیز فاصله‌ی آن‌ها با مراکز استان‌ها)، هزینه‌های مستقیم و بین هابی حمل‌ونقل، هزینه‌ی ثابت احداث هاب‌های لجستیکی (تاکنون تحقیق ساختاریافته‌ای در خصوص احداث این نوع هاب‌ها در نقاط مختلف ایران و ثبت اطلاعات مربوط به هزینه‌ی ثابت در صورت احداث آن‌ها، انجام‌نشده است) و احداث زیرساخت‌های حمل‌ونقلی مناسب بین شهرها (آزادراه، بزرگراه و راه اصلی) وجود نداشتند و بایستی در طی پژوهشی جداگانه محاسبه می‌شدند که با توجه به‌ضرورت آن‌ها برای تحقیق حاضر، در طول همین طرح موردبررسی قرارگرفته، و محاسبه‌شده‌اند.

4-1. مطالعه موردی: طراحی شبکه لجستیکی غرب کشور

در این بخش پس از اعتبارسنجی مدل ریاضی، مورد مطالعاتی اول که طراحی شبکه لجستیکی با هاب‌های تسهیلاتی در غرب کشور است، حل خواهد شد. باید توجه داشت که مطابق با نظر کارشناسان و خبرگان این حوزه، مساله طراحی شبکه هاب لجستیکی در غرب کشور تحت تأثیر معیارها اقتصادی بوده و معیارهای زیست‌محیطی نقش چندانی در آن ندارند. بنابراین در این مورد مطالعاتی تنها تابع هزینه‌ای لحاظ شده و درواقع مدل به‌صورت تک هدفه حل‌شده است. همچنین سناریو های پیشنهادی مطرح شده توسط کارشناسان و خبرگان انجمن لجستیک مورد بررسی قرار گرفته است.

سناریو اول: اهمیت استراتژیک برابر لجستیک داخلی و ترانزیت

در این حالت به دلیل اهمیت یکسان هر دو نوع حمل‌ونقل درون‌کشوری و لجستیک ترانزیت کالا، تعداد هاب‌های لجستیکی از هر دو نوع (مراکز لجستیکی و هاب‌های مرزی) برابر و مساوی سه تسهیل از هر نوع در نظر گرفته‌شده است. این حالت در مورد ارتباطات بین هابی نیز دید واقع‌بینانه‌تری دارد. به این معنی که درصد پیشرفت بزرگراه‌های برنامه‌ریزی‌شده در منطقه‌ی غرب کشور در محاسبات دخالت داده‌شده است. چند نمونه از بزرگراه‌های در حال احداث منطقه که می‌تواند در شبکه‌ی طراحی‌شده تأثیرگذار باشد به همراه درصد پیشرفت در جدول 1 آورده شده است[12].

جدول 1. درصد پیشرفت بزرگراه‌های در حال احداث غرب ایران

بزرگراه	درصد پیشرفت
همدان- سنندج	80
کرمانشاه- میاندوآب	72
ارومیه- سرو	65
ارومیه- مهاباد	46

بنابراین در حالت اول هزینه‌ی احداث بزرگراه‌های مابین مناطق منتخب جهت احداث هاب لجستیکی، با لحاظ کردن پیشرفت‌های فعلی محاسبه‌شده است.

سناریو دوم: احداث کامل زیرساخت‌های ارتباطی بین‌هابی

در این حالت نیز اهمیت استراتژیک هر دو نوع حمل‌ونقل داخلی و خارجی برابر فرض شده است ولی در مورد احداث ارتباط بین‌هابی، جاده از نوع بزرگراه در نظر گرفته‌شده و احداث تمامی راه‌ها از ابتدا مفروض است. بدین‌صورت که در صورت تعیین توسط مدل ریاضی، بین دو شهر بزرگراه احداث‌شده و هزینه‌های آن به‌طور کامل محاسبه خواهد شد. این حالت برای مواردی که بزرگراه در حال احداثی بین دو شهر برنامه‌ریزی نشده باشد، مثمر ثمر بوده و می‌تواند پیشنهاد احداث چنین ارتباطی را به همراه تحلیل‌های هزینه‌ای لجستیکی به تصمیم‌گیرندگان ارائه دهد.

سناریو سوم: توجه ضمنی به حمل‌ونقل باکیفیت‌تر داخلی و بین‌المللی

حالت سوم فرض مربوط به اهمیت برابر دو نوع لجستیک را به‌صورت صریح دارد ولی ازآنجایی‌که ارتباطات جاده‌ای بین هابی در این حالت از نوع آزادراه می‌باشد، می‌توان نسبت به برنامه‌ریزی جهت توسعه‌ی حمل‌ونقل بین‌المللی کالا و لجستیک ترانزیت از طریق فراهم ساختن زیرساخت‌های باکیفیت و در حد استانداردهای منطقه‌ای و بین‌المللی، اقدام کرد. به دلیل آن‌که مابین شهرها و مناطق موردبررسی آزادراه در حال احداثی وجود ندارد، هزینه‌های کامل آن از ابتدا در محاسبات لحاظ شده است.

سناریو چهارم: اهمیت بیشتر حمل‌ونقل داخلی

در این حالت، به دلیل فرض اهتمام بیشتر تصمیم‌گیرندگان به لجستیک درون کشوری، تعداد مراکز لجستیکی سه و هاب‌های مرزی

دو در نظر گرفته‌شده است. ارتباطات بین هابی نیز به دلیل کفایت بزرگراه به نسبت هزینه‌ی احداث آن، بزرگراه می‌باشد.

سناریو پنجم: اهمیت بیشتر حمل‌ونقل خارجی

برخلاف حالت قبل، حالت پنجم بر لجستیک خارجی تأکید داشته و تعداد هاب‌ها نیز برعکس مورد قبل سه هاب مرزی و دو مرکز لجستیکی در مناطق داخلی کشور موردنظر است. همان‌گونه که اشاره شد، به‌منظور بهره‌برداری حداکثری از مزایای لجستیک ترانزیت و حمل‌ونقل بین‌المللی کالا و نیز ترغیب شرکت‌های حمل‌ونقل و کشورهای همسایه برای استفاده از زیرساخت‌های باکیفیت و استاندارد داخل کشور، در این حالت ارتباطات جاده‌ای بین هاب‌های احداثی از نوع آزادراه خواهد بود.

سناریو ششم: تأثیر ضریب مطلوبیت

طبق توضیحاتی که در مورد امتیاز لجستیکی مناطق بالقوه و پیوندهای ممکن بیان شد و نیز علم به این‌که در تصمیم‌گیری‌های کلان لجستیکی بایستی عواملی غیر از فاکتور هزینه هم در نظر گرفته شوند، در این حالت هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات و هزینه‌ی احداث زیرساخت ارتباطی بین هابی مناسب، تحت تأثیر ضریب مطلوبیت قرارگرفته و محاسبات مربوطه با این فرض انجام‌شده است.

سناریو هفتم: تأکید بیشتر بر مکان‌یابی تسهیلات

در این حالت، اهمیت مکان‌یابی تسهیلات به نسبت طراحی شبکه‌ی ارتباطی بین هابی بیشتر فرض شده است. این رابطه علی‌رغم این‌که تصویری واقعی از ایجاد ارتباطات بین هابی ارائه نمی‌دهد، تأثیر مکان‌یابی تسهیلات را در نتایج پایانی و پیاده‌سازی شبکه بیشتر می‌نماید. ضمن آن‌که تعداد هر دو نوع هاب، سه تسهیل در نظر گرفته‌شده است.

سناریو هشتم: اهمیت استراتژیک برابر لجستیک داخلی و ترانزیت، تعداد تسهیل کمتر

این حالت تمامی فرض‌های حالت دوم را دارا می‌باشد، یعنی احداث کامل بزرگراه بین هاب‌ها مدنظر است. ولی تعداد تسهیلات نسبت به حالت‌های پیشین کمتر شده و ضمن برابری اهمیت استراتژیک حمل‌ونقل داخلی و خارجی، تعداد دو هاب از هر نوع جهت احداث در منطقه پیشنهاد خواهد شد. در جدول 2 نتایج تکمیلی هر یک از سناریوها و حالت‌های پیشنهادی فوق ارائه‌شده است.

جدول 2. نتایج محاسباتی حالت‌های مختلف مسأله

سناریو / هزینه‌ها	ثابت احداث تسهیلات	حمل‌ونقل	احداث ارتباطات بین‌هابی	کل (تومان)
اول	604184000000	5311910000000	1699000000000	7615100000000
دوم	494990000000	7317940000000	3044000000000	10856900000000
سوم	509896000000	9308820000000	7335000000000	17153700000000
چهارم	508548000000	6832860000000	3320000000000	10661400000000
پنجم	427565000000	9758480000000	5895000000000	16081000000000
ششم	516914000000	6907590000000	3213850000000	10638400000000
هفتم	604184000000	5311910000000	3111860000000	5916100000000
هشتم	349935000000	7701860000000	2628000000000	10679800000000

نکته: ازآنجایی‌که هزینه‌ها و داده‌های مسأله بر اساس گزارش‌های سالانه و برحسب سال محاسبه‌شده‌اند، جهت متعادل شدن هزینه‌های کل سیستم، باید مقدار معادل هزینه‌ی سالیانه‌ی احداث هاب را به‌جای هزینه‌ی ثابت اولیه‌ی احداث در نظر بگیریم. برای این منظور از تکنیک‌های اقتصادی و از فاکتور تبدیل مقدار سرمایه‌گذاری اولیه به هزینه‌ی یکنواخت سالیانه استفاده خواهد شد. مقدار این فاکتور از رابطه‌ی 11 به دست می‌آید:

$$(A/P,i\%,n)=\frac{i(1+i)^n}{i(1+i)^n-1} \qquad (41)$$

ازآنجایی‌که در عبارت فوق با بزرگ‌تر شدن n، مقدار کسر به سمت i میل می‌کند، و نیز با توجه به این‌که عمر تسهیلات لجستیکی در دنیای واقعی معمولاً بیش از 25 سال است، می‌توان مقدار فاکتور فوق را برابر مقدار i یا نرخ بهره قرار داد. نرخ بهره در این تحقیق، 20 درصد در نظر گرفته‌شده است. بنابراین، در جدول 3 هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات به‌صورت متعادل‌شده سالیانه به همراه سایر هزینه‌ها آورده شده است.

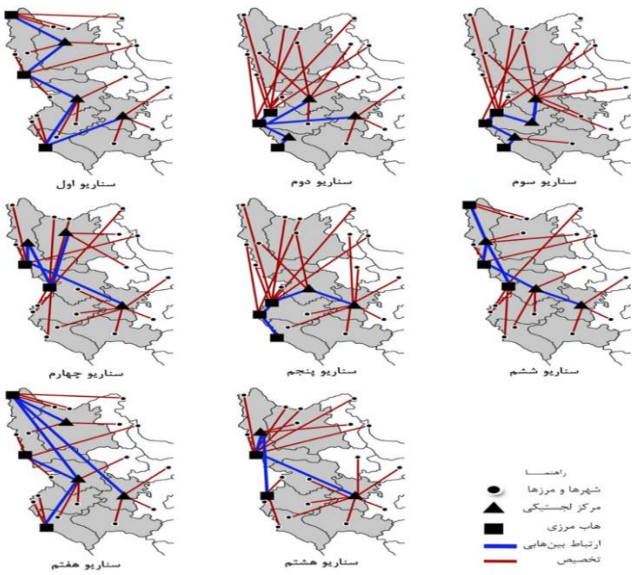
جدول 3. نتایج حالت‌های مختلف مسأله با تعدیل هزینه‌ی ثابت احداث

سناریو / هزینه‌ها	ثابت احداث تسهیلات (سالانه)	حمل‌ونقل	احداث ارتباطات بین‌هابی	کل (تومان)
اول	120836400000	5311910000000	1699000000000	7131746400000
دوم	98988000000	7317940000000	3044000000000	10460928000000
سوم	101979200000	9308820000000	7335000000000	16745799200000
چهارم	101709600000	6832860000000	3320000000000	10254569600000
پنجم	85513000000	9758480000000	5895000000000	15738993000000
ششم	103382800000	6907590000000	3213850000000	10224822800000
هفتم	120836800000	5311910000000	3111860000000	5432747100000
هشتم	69987000000	7701860000000	2628000000000	10399847000000

در اینجا نتایج تشریحی سناریوی اول بیان می‌گردد. نتایج محاسباتی حاکی از این است که:

1. شهرهای تبریز، سنندج، و همدان به‌عنوان نقاط مناسب برای احداث هاب‌های لجستیکی داخل کشور یا مراکز لجستیکی انتخاب می‌شوند.
2. مرزهای بازرگان، تمرچین و مهران به‌عنوان مراکزی برای توسعه‌ی هاب‌های لجستیکی مرزی برگزیده می‌شوند.
3. مابین شهرهای همدان- مهران، مهران- سنندج، بازرگان- تبریز، تبریز- تمرچین (پیرانشهر) و تمرچین- سنندج جهت ارتباطات بهتر بین هابی، احداث بزرگراه‌های باکیفیت پیشنهاد می‌شود.
4. هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات در مجموع مقدار صدوبیست میلیارد و هشتصد و شصت‌وچهار میلیون تومان است.
5. هزینه‌ی حمل‌ونقل سالیانه در شبکه‌ی موردبررسی، در حدود پنج هزار و سیصد و یازده میلیارد و نهصد و ده میلیون تومان می‌باشد.
6. هزینه‌ی توسعه و بهبود زیرساخت‌های شبکه‌ی بین هابی نیز یک هزار ششصد و نودونه میلیارد تومان است.

شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران، با تأکید بر مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف پیشنهادی در شکل 2 نشان داده‌شده است.



شکل 2. شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران در سناریوهای مختلف

4-2. حل مورد مطالعاتی طراحی شبکه لجستیکی کل کشور

در این بخش مورد مطالعاتی در ابعاد بزرگ‌تر در نظر گرفته‌شده و البته تابع هدف دوم نیز لحاظ می‌شود. با توجه به اینکه حل مسائل چندهدفه با دشواری‌های محاسباتی بسیاری روبرو است، بنابراین به‌منظور حل مساله از روش نیل به هدف استفاده‌شده است. داده‌های ورودی در این مثال شامل 30 مرکز اصلی به‌عنوان نقاط شبکه، 9 نقطه بالقوه جهت احداث هاب‌های لجستیکی، دو سیستم حمل‌ونقل زمینی و هوایی و 2 نوع محصول مختلف است. اطلاعات مرتبط با مسافت‌ها، هزینه‌های احداث و هزینه جابجایی از منابع داده‌ای استخراج‌شده است. سایر داده‌های ورودی که دسترسی به آن‌ها دارای محدودیت بود، به‌صورت عددی و با ساختار تصادفی یکنواخت تولیدشده است. در ادامه به تشریح برخی از مهم‌ترین داده‌های ورودی مساله در جدول 4 پرداخته شده است.

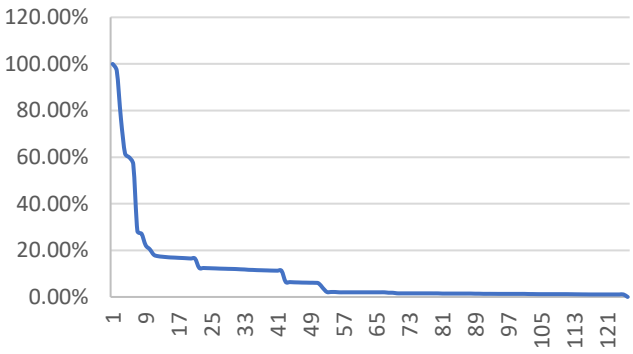
جدول 4. هزینه ثابت احداث هاب‌های لجستیکی

هاب‌های بالقوه	سیستم حمل‌ونقل هوایی	سیستم حمل‌ونقل زمینی
آذربایجان شرقی	138,613,600,000.00	158,019,504,000.00
اصفهان	107,032,000,000.00	95,258,480,000.00
تهران	80,542,000,000.00	69,266,120,000.00
خراسان رضوی	67,425,000,000.00	80,235,750,000.00
فارس	114,961,800,000.00	126,457,980,000.00
کرمانشاه	100,055,800,000.00	104,058,032,000.00
کهگیلویه و بویر احمد	75,436,600,000.00	85,243,358,000.00
مازندران	124,586,600,000.00	145,766,322,000.00
مرکزی	86,375,600,000.00	84,648,088,000.00

با توجه به بالا بودن حجم داده‌های ورودی، ارائه آن‌ها در متن رساله باعث ایجاد بار متنی زیادی شده و بنابراین می‌توان تمام داده‌های ورودی مرتبط با مساله را در قالب فایل اکسل که به پیوست موجود است، مشاهده نمود. اما نقشه اولیه ساختار بالقوه شبکه لجستیکی کشور را می‌توان به‌صورت شکل 3 در نظرگرفت.

شکل 3. ساختار بالقوه شبکه هاب لجستیکی کشور

پس از حل مساله تحقیق با استفاده از حل‌کننده Cplex در محیط نرم‌افزار GAMS، نمودار کاهش گپ محاسباتی در نرم‌افزار که با نام OPTCR شناخته می‌شود، به‌صورت شکل 4 است.



شکل4. نمودار کاهش گپ محاسباتی در الگوریتم Cplex

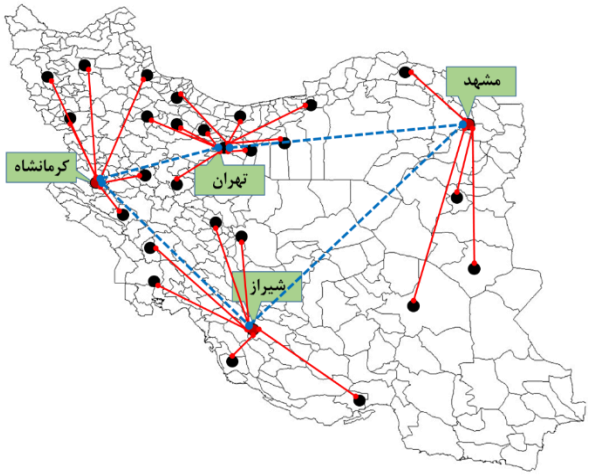
قابل‌مشاهده است که بخش زیادی از شاخه زنی‌های برای رسیدن از گپ حدود 2 درصد به گپ صفر صرف شده که این موضوع خود تأییدی بر پیچیدگی بالای مساله در ابعاد یادشده است.

پس از حصول پاسخ نهایی می‌توان مشاهده نمود که مقادیر عددی جملات توابع هدف اول و دوم به‌صورت جدول 5 است.

جدول 5. مقادیر عددی جملات توابع هدف

تابع هدف اول	جمله اول	جمله دوم	جمله سوم	جمله چهارم	جمله پنجم	جمله ششم
	1.19×10^{11}	3.12×10^{12}	1.71×10^{13}	4.75×10^{12}	144000	6.45×107
تابع هدف دوم	جمله اول	جمله دوم	جمله سوم	جمله چهارم		
	250	91	4.29×10^{14}	8.11×10^{5}		

همچنین ساختار گرافیکی تخصیص نقاط به هاب‌های لجستیکی نیز به‌صورت شکل 5 است.



شکل 5. ساختار شبکه هاب لجستیکی کشور

همان‌طور که مشاهده می‌شود، شهرهای تهران، کرمانشاه، شیراز و مشهد به‌عنوان هاب‌های لجستیکی کشور انتخاب‌شده وظیفه پوشش سایر شهرها را به عهده دارند. برای مثال شهرهای بیرجند، بجنورد، کرمان و زاهدان به هاب مشهد تخصیص یافتند. همچنین شهرهای همدان، قم، ساری، گرگان، رشت، زنجان، قزوین و سایر شهرهای اطراف تهران به هاب تهران تخصیص داده‌شده است. نکته جالب‌توجه این است که هیچ ارتباط مستقیمی بین نقاط شبکه وجود نداشته و کلیه تقاضاها از طریق شبکه هاب تأمین‌شده است.

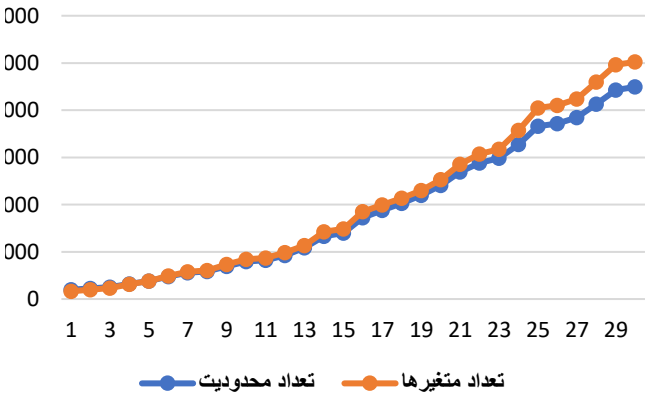
4-3. آنالیز ابعادی

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر تأکید بسیار زیادی بر استفاده از نرم‌افزارهای تجاری به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی و حصول پاسخ-های دقیق به‌جای پاسخ‌های نزدیک به بهینه‌شده است، تحلیل رفتار مدل در مقابل تغییرات ابعاد مساله دارای اهمیت زیادی است. بدین منظور در این تحقیق تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای تولیدشده در مثال‌های عددی مختلف موردبررسی قرار می‌گیرد. شکل 6 رویه رشد تعداد متغیرها و محدودیت‌ها را نشان می‌دهد.

جدول 6. ابعاد نمودارهای عددی برای تحلیل ابعادی مساله

نقاط شبکه	تعداد هاب بالقوه	تعداد محصولات	تعداد مد حمل‌ونقل
50	5	2	2
60	6	2	2
70	7	2	2
90	9	2	2
100	10	2	3
120	12	2	3
140	13	2	3

نقاط شبکه	تعداد هاب بالقوه	تعداد محصولات	تعداد مد حمل‌ونقل
150	13	2	3
160	13	3	3
170	14	3	4
180	14	3	4
200	15	3	4
250	15	3	4
280	16	4	4
300	16	4	4
340	18	4	5
380	18	4	5
420	18	4	5
450	18	4	6
480	19	4	6
500	21	4	6
520	22	4	6
530	22	4	7
540	23	5	7
550	26	5	7
560	26	5	7
570	26	5	8
580	28	5	8
590	30	5	8
600	30	5	8



شکل 6. تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم حاصل از حل نمودهای عددی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند افزایش تعداد محدودیت‌ها بیشتر از تعداد متغیرها بوده و بنابراین سختی حل مثال‌های عددی با افزایش ابعاد مثال‌های عددی بسیار زیاد می‌شود. در حقیقت مطابق با تئوری‌های موجود در تحقیق در عملیات، افزایش تعداد محدودیت‌ها دشواری مثال‌های عددی را بیشتر از افزایش تعداد متغیرها تحت تأثیر قرار می‌دهد.

5-3. تحلیل نتایج با استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری

با توجه به اینکه مسأله‌ی طراحی شبکه هاب لجستیکی از رده‌ی مسائل NP- hard است، جهت حل نمونه‌های عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فرا ابتکاری استفاده می‌شود؛ اما یکی از موضوعات بسیار مهم در استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری، انتخاب مناسب آن‌ها با توجه به ماهیت و ساختار عملکردی در یافتن پاسخ‌های نهایی است. مطابق با مرور ادبیات تحقیق، استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر ازدحام، دارای سطح عملکرد مناسبت‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های مبتنی بر پاسخ هستند. بنابراین در این تحقیق نیز از این الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر ازدحام استفاده می‌شود. از میان الگوریتم‌های ارائه‌شده در سال‌های اخیر، الگوریتم گرگ خاکستری دارای قدرت محاسباتی بسیار بالایی بوده و تقریباً در تمامی مسائلی که مورداستفاده قرار گرفتند، بر سایر الگوریتم‌ها برتری نسبی یا مطلق داشتند. نسخه‌ی چندهدفه این الگوریتم‌ها نیز دارای کارایی بسیار بالایی بوده و قادر هستند به‌صورت کاملاً مناسبی از فاز Exploration وارد فاز Exploitation شده و پاسخ‌های نهایی مناسبی را گزارش دهند. بنابراین در این پژوهش از الگوریتم MOGWO استفاده می‌شود. همچنین خانواده‌ی ژنتیک معمولاً در تمامی مسائل بهینه‌سازی دارای عملکرد مناسبی هستند و می‌توانند به‌عنوان یک معیار مقایسه‌ای خوب مورداستفاده قرار گیرند. در این خانواده، نسخه دوم الگوریتم ژنتیک (NSGA- II) به‌عنوان شاخص‌ترین الگوریتم چندهدفه در تمام حوزه‌های بهینه‌سازی مطرح است. الگوریتم‌های مبتنی بر ساختارهای تکاملی مانند SPEA- II نیز در اغلب مسائل بهینه‌سازی قادر به تولید پاسخ‌های مناسب هستند. بنابراین در این تحقیق نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی با الگوریتم‌های NSGA- II و SPEA- II مورد مقایسه قرارگرفته تا درنهایت بهترین

نتایج گزارش شود. در ادامه به تشریح ساختار هریک از الگوریتم‌های پیشنهادی پرداخته می‌شود.

3-5-1. معیارهای مقایسه کارایی الگوریتم‌های چندهدفه

DNS: تعداد نقاط جبهه پارتویی

NDNS: نسبت تعداد نقاط جبهه پارتویی برای هر الگوریتم حاصل از هم‌افزایی تمام پاسخ‌های حاصل از حل الگوریتم‌های مختلف

QM: در ابتدا الگوریتم پیشنهادی چند بار به‌صورت مستقل اجرا می‌شود. سپس تمام پاسخ‌ها حاصله به همراه جبهه سایر الگوریتم‌ها در یک مجموعه قرار می‌گیرد. حال درصدی از نقاط پارتویی که با جبهه الگوریتم موردنظر منطبق هستند، به‌عنوان کیفیت جبهه آن الگوریتم مورداستفاده قرار می‌گیرد.

Max Spread: در این معیار، شاخص یکنواختی: این معیار، یکنواختی توزیع جواب‌های پارتوی به‌دست‌آمده را در مرز جواب‌ها مورد آزمایش قرار می‌دهد. این شاخص به‌صورت رابطه (12) تعریف می‌شود.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |d_{mean} - d_i|}{(N-1) \times d_{mean}} \qquad (42)$$

در این رابطه، d_i بیانگر فاصله اقلیدسی عضو i ام جبهه پارتویی تا مرز بهینه است. همچنین مقدار d_{mean} نیز بیانگر مقدار میانگین این فواصل است. حال به تشریح نتایج حاصل از حل الگوریتم‌ها پرداخته می‌شود. اما لازم است که نتایج عددی بر روی مثال‌های عددی متنوع اعمال گردد. بدین منظور تعداد 150 مثال عددی با داده‌های تصادفی و فرضی تولید می‌شود. این مثال‌ها در دسته‌های 30 تایی تقسیم می‌شود که در هر دسته نیز ابعاد مسئله برحسب تعداد نقاط به مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم می‌شود. همچنین هر دسته به ازای تعداد هاب‌های بالقوه از پیش ثابت‌شده طراحی می‌گردد. برای مثال برای مطالعه بیشتر، 30 مثال عددی با در نظر گرفتن تعداد 5 هاب بالقوه در نظر گرفته‌شده است. درواقع در تمام این 30 مثال، تعداد هاب‌های بالقوه برابر با 5 بوده و تنها تعداد نقاط تقاضا و پارامترهای ورودی تغییر می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هریک از این تحلیل‌ها، تعداد نقاط تقاضا برای طراحی شبکه تغییر می‌کند اما تعداد هاب‌ها ثابت است. مسائل ارائه‌شده به کمک الگوریتم پیشنهادی در ابعاد مختلف حل‌شده و نتایج به‌دست‌آمده حاصل از محاسبه هریک از معیارها تشریح شده ارائه می‌شود. می‌توان مشاهده نمود که با افزایش ابعاد مسئله و ایجاد پاسخ‌های متفاوت که هریک می‌توانند یکی از اعضای جبهه پارتویی باشند، معیارهای DNS و ADNS نیز افزایش می‌یابد. درواقع با توجه به اینکه این دو معیار به‌صورت مستقیم به تعداد اعضای جبهه پارتویی تولیدشده وابسته هستند، با افزایش ابعاد مسئله، مقدار آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. اما این نرخ رشد در الگوریتم گرگ خاکستری به‌مراتب بیشتر از سایر الگوریتم‌ها است. به‌عبارت‌دیگر الگوریتم گرگ خاکستری توانایی بالاتری در یافتن پاسخ‌های پارتویی در مثال‌های مختلف دارد. الگوریتم ژنتیک نیز دارای کمترین مقدار نرخ رشد بوده که حاکی از عدم توانایی کافی در تولید پاسخ‌های نهایی است. در مورد معیار کیفیت پاسخ (QM) نیز می‌توان تحلیلی مشابه ارائه نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم گرگ خاکستری درصدهای بالاتری را برای این معیار نشان می‌دهد. در حقیقت این حالت توانایی را دارد که در اجراهای مستقل، پاسخ‌هایی تا حد زیاد مشابه به یکدیگر تولید کرده که درنهایت درصد پاسخ‌های منطبق را افزایش می‌دهد. ازلحاظ زمان اجرا نیز این حالت توانایی یافتن پاسخ‌ها و همگرا شدن به نتایج نهایی را در مدت‌زمان کمتری انجام می‌دهد. با توجه به نتایج حاصله مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های ارائه‌شده دارای کارایی مناسبی است؛ چراکه روند تفاوت در الگوریتم گرگ خاکستری و سایر الگوریتم‌ها منطقی است.

3-6. تحلیل حساسیت الگوریتم برتر

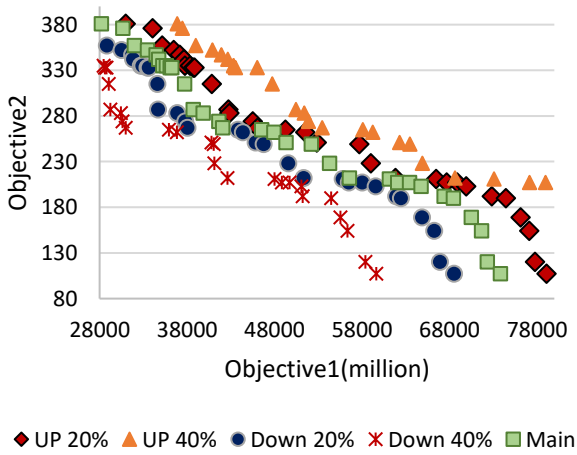
در این بخش به‌منظور بررسی دقیق‌تر رفتار الگوریتم گرگ خاکستری که به‌عنوان الگوریتم برتر در تحلیل‌ها انتخاب‌شده است، تحلیل حساسیت لازم بر روی تغییر مقدار پارامتر تقاضا صورت می‌پذیرد. بدین منظور در این بخش یک مثال عددی در ابعاد بزرگ با در نظر گرفتن 50 هاب بالقوه و 200 نقطه تقاضا در نظر گرفته‌شده است. با توجه به اینکه جهت پیاده‌سازی نتایج مدل پیشنهادی این پژوهش وابسته به رفتار متغیرهای تصمیم در مقابل تغییر برخی از پارامترهای مهم مانند هزینه احداث مراکز توزیع و مقدار جریان بین نقاط است، بنابراین در این قسمت از طریق تعریف مقادیر مختلف برای هریک از پارامترها و بررسی تغییرات جبهه پارتویی برای هریک از آن‌ها سعی می‌شود، تحلیل‌های مناسب ارائه گردد. درواقع با توجه به شرایط

اقتصادی موجود در کشور، پیش‌بینی مقدار دقیق هزینه‌ها بسیار دشوار بوده و همچنین تعیین تقاضا نیز به دلیل ایجاد تغییرات نسبتاً شدید در سبد محصولات مشتریان با عدم قطعیت‌های بالایی روبرو است. بدین منظور هریک از پارامترهای مذکور در چهار حالت مختلف در قالب سناریوهای عددی مقداردهی شده و رفتار مدل نسبت به تغییر هریک از آن‌ها سنجیده می‌شود. جهت حل مدل، در ابتدا هزینه احداث تسهیلات در بازه 10 تا 20 میلیارد تومان در نظر گرفته خواهد شد. میزان تقاضا نیز در بازه 10000 تا 20000 به‌صورت یکنواخت تولید می‌شود. سایر پارامترهای ورودی به‌صورت تصادفی در بازه یکنواخت تولید می‌شود. جهت تحلیل حساسیت پارامترهای مذکور در سناریوهای موجود در جدول ۷ تغییر می‌کند.

جدول 7. سطح تغییر پارامترهای هزینه احداث تسهیلات و تقاضای مشتریان

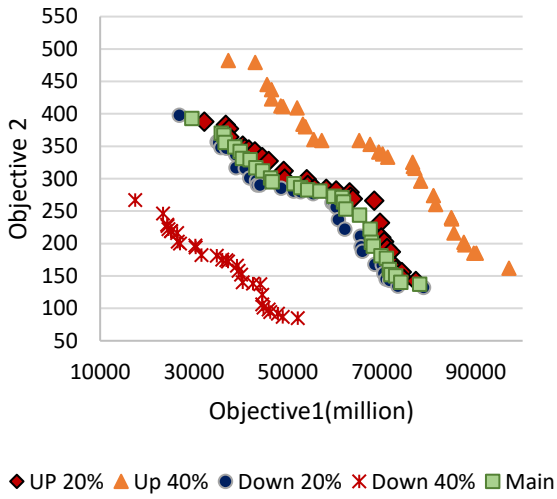
سناریو اول	سناریو دوم	سناریو سوم	سناریو چهارم
40 درصد کاهش	20 درصد کاهش	20 درصد افزایش	40 درصد افزایش

پس از حل مثال عددی موردبررسی، جبهه‌های پارتویی تولیدشده برای هریک از پارامترهای هزینه احداث تسهیلات و انجام عملیات لجستیکی و تقاضا به‌صورت شکل 7 ارائه می‌گردد.



شکل 7. تغییرات جبهه پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف هزینه‌های احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییرات هزینه‌های مساله، تنها مقدار تابع هدف اول دچار تغییر می‌شود. در حقیقت کاملاً مشهود است که حدود بالا و پایین جبهه پارتویی فقط برای تابع هدف اول دچار تغییر شده و حدود بالا و پایین جبهه دوم تغییر خاصی نداشته است؛ چراکه در نهایت مدل سعی کرده است احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی را به‌گونه‌ای در نظر بگیرد که کمترین تغییرات در تابع هدف زیست‌محیطی ایجاد شود. درواقع در چنین شرایطی مدیران باید تمرکز خود را بر روی کاهش هزینه بگذارند و معیارهای زیست‌محیطی در اولویت بعدی قرار می‌گیرند. اما در تحلیلی دیگر، اگر سطح تقاضای مشتریان در شرایط مختلف مورد آزمایش قرار گیرد، رفتار مدل به‌صورت جبهه پارتویی شکل 8 ارائه می‌شود.



شکل 8. تغییرات جبهه پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف تقاضا

کاملاً مشخص است که با تغییر مقادیر مختلف تقاضا، پاسخ‌های نهایی به‌شدت تحت تأثیر قرارگرفته و هر دو تابع هدف مقادیر متفاوتی را تولید می‌کنند. این موضوع اثر بسیار زیاد مدیریت تقاضا بر حصول پاسخ‌های نهایی را نشان می‌دهد. درواقع با تغییر تقاضا هم‌سطح هزینه‌های سیستم و هم عناصر مرتبط با اثرات زیست‌محیطی دچار تغییرات اساسی می‌شود. بنابراین می‌توان به این جمع‌بندی رسید که توجه به تخمین سطح دقیق تقاضای مشتریان دارای اهمیتی به‌مراتب بیشتر نسبت به تخمین مقدار دقیق هزینه‌های احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی از دیدگاه توسعه شبکه هاب لجستیکی پایدار است.

4. نتیجه گیری

مساله طراحی شبکه لجستیکی به‌عنوان یک مساله بهینه‌سازی یکپارچه، در این تحقیق موردبررسی قرارگرفته است. ابتدا مدل ریاضی مساله از طریق حل مورد مطالعاتی طراحی شبکه لجستیکی غرب کشور صحت سنجی شده و نتایج عددی به‌صورت کامل تشریح شده است. سپس به تحلیل حساسیت مدل در ابعاد مختلف پرداخته‌شده که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل می‌باشد. پس‌ازآن مورد مطالعاتی دوم که طراحی شبکه لجستیکی ایران است، موردبررسی قرارگرفته تا بتوان پاسخ‌های نهایی در کل کشور را بررسی نمود. در پایان با توجه به اینکه روش‌های حل دقیق قادر به حل مسأله در ابعاد خیلی بزرگ نبودند جهت حل مسأله در این ابعاد، روش حل فرا ابتکاری ژنتیک در ابتدا معرفی و سپس مثال‌هایی حل‌شده است. پس از بررسی مثال عددی طراحی‌شده و تحلیل نتایج، مشاهده می‌شود که پاسخ‌های تولیدشده دارای ساختاری مناسب هستند. یکی از مهم‌ترین نتایج حاصله در این پژوهش، بررسی سناریوهای مختلف در حل مساله برای طراحی شبکه لجستیکی است.

- **سناریو اول**

در این حالت شهرهای سنندج، تبریز و همدان به‌عنوان مراکز لجستیکی و مرزهای بازرگان، تمرچین و مهران به‌عنوان هاب‌های مرزی انتخاب شدند. بزرگراه‌های پیشنهادی جهت احداث نیز عبارت‌اند از: همدان- مهران، مهران- سنندج، بازرگان- تبریز، تبریز- تمرچین (پیرانشهر) و تمرچین- سنندج. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت برابر با هفت هزار و صد و سی‌ویک میلیارد و هفتصد و چهل‌وشش میلیون تومان است. در این سناریو اهمیت لجستیک و خارجی برابر فرض شده است.

- **سناریو دوم**

مشابه سناریوی اول، در این حالت نیز اهمیت هر دو نوع لجستیک یکسان بوده و هزینه‌ی احداث بزرگراه بین دو شهر به‌صورت کامل محاسبه‌شده است. در این حالت شهرهای سنندج، همدان و ایلام به‌عنوان مراکز لجستیکی و مرزهای پرویز خان، خسروی و مهران به‌عنوان هاب‌های مرزی انتخاب شدند. بزرگراه‌های پیشنهادی جهت احداث نیز عبارت‌اند از: سنندج- خسروی، پرویز خان (قصر شیرین)- خسروی، همدان- خسروی، خسروی- ایلام و ایلام- مهران. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت برابر با ده هزار چهارصد و شصت میلیارد و نهصدوبیست‌وهشت میلیون تومان است.

- **سناریو سوم**

تفاوت این سناریو با دو مورد قبلی، احداث آزادراه در شبکه‌ی بین هابی برای تأکید بر اهمیت لجستیک پیشتاز و ترانزیت بین‌المللی است. مشابه موارد قبل، سه مرکز لجستیکی در شهرهای سنندج، کرمانشاه و ایلام، سه هاب مرزی در پرویز خان، خسروی و مهران و آزادراه‌های سنندج- کرمانشاه، کرمانشاه- پرویز خان، پرویز خان- خسروی، مهران- ایلام و ایلام- خسروی بایستی احداث گردند. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت شانزده هزار و هفتصد و چهل‌وپنج میلیارد و هفتصد و نودونه میلیون تومان است.

- **سناریو چهارم**

در این حالت سه مرکز لجستیکی در شهرهای تبریز، ارومیه و همدان و دو هاب مرزی در مرزهای تمرچین و باشماق احداث می‌گردد. رویکرد این سناریو بر توسعه‌ی حمل‌ونقل درون‌کشوری است. بزرگراه‌های احداثی تبریز- باشماق (مریوان)، ارومیه- تمرچین، ارومیه- باشماق و تمرچین- همدان و هزینه‌ی کل شبکه‌ی طراحی‌شده ده هزار و دویست و پنجاه‌وچهار میلیارد و پانصد و شصت‌ونه میلیون تومان می‌باشد.

- **سناریو پنجم**

این سناریو رویکردی مخالف سناریو چهارم داشته و تأکید بیشتری بر توسعه‌ی لجستیک ترانزیتی کشور از طریق منطقه‌ی غرب ایران دارد. دو مرکز لجستیکی در شهرهای سنندج و همدان و سه هاب مرزی در مناطق پرویز خان، خسروی و مهران جهت احداث پیشنهاد می‌شوند. ارتباط بین هابی از نوع آزادراه بوده و عبارت‌اند از: همدان- سنندج، سنندج- پرویز خان، پرویز خان- خسروی و خسروی- مهران. هزینه‌ی کل شبکه در این سناریو برابر با پانزده هزار و هفتصد و سی‌وهشت میلیارد و نهصد و نودوسه میلیون تومان است.

- **سناریو ششم**

در این حالت نیز سه مرکز لجستیکی در شهرهای ارومیه، سنندج و همدان و سه هاب مرزی در مرزهای بازرگان، تمرچین و باشماق احداث خواهد شد. ارتباط میان هابی بین زوج‌های بازرگان- ارومیه، ارومیه- تمرچین، ارومیه- باشماق، تمرچین- سنندج و سنندج- مهران از نوع بزرگراه پیشنهاد می‌شود. تفاوت این سناریو تأثیر ضریب مطلوبیت به‌دست‌آمده از آمایش لجستیکی منطقه به‌عنوان عامل کیفی در هزینه‌های احداث هاب و ارتباط بین هابی است. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت ده هزار و دویست و بیست‌وچهار میلیارد و هشتصدوبیست‌ودو میلیون تومان است.

- **سناریو هفتم**

در این حالت با محاسبه‌ی هزینه‌ی ارتباط بین هابی به نحو دیگری، تأکید بیشتر بر بخش مکان‌یابی مسئله‌ی موردبررسی است. تعداد سه مرکز لجستیکی در شهرهای تبریز، سنندج و همدان و سه هاب مرزی در مرزهای بازرگان، تمرچین و مهران احداث خواهد شد. هم‌چنین ارتباط‌های بین هابی برقرارشده عبارت‌اند از: بازرگان- تبریز، بازرگان- همدان، بازرگان- سنندج، تمرچین- سنندج و سنندج- مهران. هزینه‌ی شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران در این سناریو برابر با پنج هزار و چهارصد و سی‌ودو میلیارد و هفتصد و چهل‌وهفت میلیون تومان برآورد می‌شود.

- **سناریو هشتم**

مطابق این سناریو، دو مرکز لجستیکی در شهرهای ارومیه و همدان و دو هاب مرزی در مرزهای تمرچین و پرویز خان جهت احداث پیشنهاد می‌گردد. راه‌های ارتباطی بین شهرهای ارومیه- تمرچین، همدان- تمرچین و ارومیه- پرویز خان از نوع بزرگراه و هزینه‌ی کل شبکه ده هزار و سیصد و نودونه میلیارد و هشتصد و چهل‌وهفت میلیون تومان خواهد بود.

در حل مورد مطالعاتی دوم که کل کشور است نیز می‌توان مشاهده نمود که شهرهای تهران، کرمانشاه، شیراز و مشهد به‌عنوان هاب‌های لجستیکی کشور انتخاب‌شده وظیفه پوشش سایر شهرها را به عهده دارند. برای مثال شهرهای بیرجند، بجنورد، کرمان و زاهدان به هاب مشهد تخصیص یافتند. همچنین شهرهای همدان، قم، ساری، گرگان، رشت، زنجان، قزوین و سایر شهرهای اطراف تهران به هاب تهران تخصیص داده‌شده است. نکته جالب‌توجه این است که هیچ ارتباط مستقیمی بین نقاط شبکه وجود نداشته و کلیه تقاضاها از طریق شبکه هاب تأمین‌شده است. برای تحقیقات آتی، استفاده از الگوریتم‌های حل دقیق مانند شاخه و برش یا ابتکاری جهت بدست آوردن نتایج با قابلیت بالا و یا توسعه مدل بصورت برنامه‌ریزی دو سطحی و تعیین ساختار رهبر و پیرو پیشنهاد می گردد.

منابع

[1] Hekmatfar, M., & Pishvaee, M. (2009). Hub location problem. In *Facility Location* (pp. 243-270). Physica, Heidelberg.

[2] O'kelly, M. E. (1987). A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European journal of operational research*, *32*(3), 393- 404.

[3] Campbell, J. F. (1994a). A survey of network hub location. *A survey of network hub location*, 6.

[4] O'Kelly, M. E., & Miller, H. J. (1994). The hub network design problem. *Journal of Transport Geography*, *2*(1), 31- 40.

[5] Campbell, J. F., Ernst, A. T. & Krishnamoorthy, M. (2002). Hub location problems. In: Drezner, Z., Hamacher, H.W. *(Eds.)*, *Facility Location: Applications and Theory*. *Springer*.

[6] Mokhtar, H., Krishnamoorthy, M., & Ernst, A. T. (2019). The 2-allocation p-hub median problem and a modified Benders decomposition method for

transactions on evolutionary computation, *6*(2), 182- 197.

[14] Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, *69*, 46- 61.

[15] Company, C. a. D. o. T. I. (2016). Retrieved from http://www.cdtic.ir/

[16] Shirvani, S., Shahraki, M. R., & Saljooghi, F. H. (2021). Provide a hierarchical hub positioning mathematical model for sustainable supply chain network design. The dissertation of M.Sc. in Industrial Engineering-Systems Optimization. University of Sistan and Baluchestan.

solving hub location problems. *Computers & Operations Research*, *104*, 375-393.

[7] Alumur, S. A., Campbell, J. F., Contreras, I., Kara, B. Y., Marianov, V., & O'Kelly, M. E. (2021). Perspectives on modeling hub location problems. *European Journal of Operational Research*, *291*(1), 1-17.

[8] Shirvani, S., & Shahraki, M. R. (2022). A multi-level green reverse logistics network design for single manufacturer and integration of return distribution warehouses in supply chain management. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, *41*(4), 438-454.

[9] Torkestani, S. S., Seyedhosseini, S. M., Makui, A., & Shahanaghi, K. (2018). The reliable design of a hierarchical multi- modes transportation hub location problems (HMMTHLP) under dynamic network disruption (DND). *Computers & Industrial Engineering*, *122*, 39- 86.

[10] Khodemani- Yazdi, M., Tavakkoli- Moghaddam, R., Bashiri, M., & Rahimi, Y. (2019). Solving a new bi- objective hierarchical hub location problem with an M/ M/ c queuing framework. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, *78*, 53- 70.

[11] Shang, X., Yang, K., Wang, W., Wang, W., Zhang, H., & Celic, S. (2020). Stochastic Hierarchical Multimodal Hub Location Problem for Cargo Delivery Systems: Formulation and Algorithm. *IEEE Access*, *8*, 55076- 55090.

[12] Alumur, S. A., Kara, B. Y., & Karasan, O. E. (2012). Multimodal hub location and hub network design. *Omega*, *40*(6), 927- 939.

[13] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA- II. *IEEE*