

ارائه‌ی یک مدل ریاضی چندهدفه‌ی مکان‌یابی هاب سلسله مراتبی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایدار

شیمیا شیروانی (کارشناس ارشد)

محمدرضا شهرکی* (دانشیار)

گروه مهندسی صنایع، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

فرانک حسین زاده سلجوقی (دانشیار)

گروه ریاضی، دانشکده‌ی ریاضی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

مسائل مکان‌یابی هاب، یکی از مهم‌ترین شاخه‌های حمل‌ونقل هستند، که استفاده‌ی زیادی از آن‌ها در حوزه‌های راهبردی می‌شود. در شبکه‌ی توزیع، استفاده از هاب‌ها باعث کاهش هزینه‌های انتقال جریان در شبکه می‌شود. در پژوهش حاضر، یک مدل دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی ارائه شده است. در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت مشکلات زیست‌محیطی در دنیای واقعی و نگرانی از افزایش آلودگی‌های مخرب زیست‌محیطی، علاوه بر بهبود و کاهش هزینه‌ها به مسائل زیست‌محیطی نیز پرداخته شده است. مدل ارائه‌شده به بررسی حمل‌ونقل چندحالتی و ایجاد چند نوع سیستم حمل‌ونقل در یک هاب می‌پردازد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار GAMS مسائل با ابعاد کوچک و نیز در ابعاد بزرگ با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری ژنتیک، پارتویی قوی، و گرگ خاکستری حل و نتایج با یکدیگر مقایسه شده‌اند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده شده است که الگوریتم‌های ارائه‌شده، کارایی مناسبی دارند.

واژگان کلیدی: مسئله‌ی مکان‌یابی، هاب سلسله‌مراتبی، پایداری، زنجیره‌ی تأمین، الگوریتم فراابتکاری.

shimashirvani7313@pgs.usb.ac.ir
mr.shahraki@eng.usb.ac.ir
saljooghi@math.usb.ac.ir

۱. مقدمه

رفاه اجتماعی و توسعه‌ی اقتصادی با بالا رفتن تقاضای حمل‌ونقل توسعه می‌یابد. همچنین ارزان‌بودن خدمات حمل‌ونقل، منافع متفاوتی را در توسعه‌ی کشورها در بر دارد. بنابراین در جهت خدمت ارزان‌قیمت حمل‌ونقل و کاهش مصرف سوخت، بهینه‌سازی در بخش حمل‌ونقل مهم و ضروری است. مسئله‌ی مکان‌یابی هاب، یکی از مباحث مطرح در حوزه‌ی مسائل مکان‌یابی است. برای طراحی شبکه‌های توزیع از مسئله‌ی مکان‌یابی هاب‌ها استفاده می‌شود، که در آن هر جفت مبدأ-مقصد مستقیماً سرویس‌دهی نمی‌شوند و تسهیلات هاب، جریان‌ها را بر معیارها و مزیت‌های اقتصادی متمرکز می‌کند. به‌عبارت دیگر، هاب‌ها امکانات خاصی هستند که به‌عنوان مراکز انتقال‌دهنده و هماهنگ‌کننده و تجمیع در سیستم‌های پخش کالا استفاده می‌شوند. در چنین سیستم‌هایی، جریان‌ها با مبدأهایی که مقاصد متفاوت دارند، طی مسیر با هاب‌ها یکی می‌شوند و با جریان‌هایی که مبدأهای

*نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷، تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶.

استناد به این مقاله:

شیروانی، شیمیا، شهرکی، محمدرضا، و حسین زاده سلجوقی، فرانک، ۱۴۰۳. ارائه‌ی یک مدل ریاضی چندهدفه‌ی مکان‌یابی هاب سلسله‌مراتبی برای طراحی شبکه‌ی زنجیره‌ی تأمین پایدار. مهندسی صنایع و مدیریت شریف، ۴۰(۲)، صص. ۱۶-۲۹. DOI: 10.24200/J65.2023.59365.2265

^۱ Goldman

^۲ O'Kelly

۲. بیان مسئله

اصولاً در مسائلی با ویژگی‌های مطرح‌شده، چند عامل در زمینه‌های واقعی و ریاضیاتی پژوهش، 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 دارند، این مورد بیشتر نمود دارد. در مورد تعداد تسهیلات، می‌توان چند رویه را اجرا کرد. اولین رویه، تصمیم‌گیری بر حسب هزینه است. به این صورت که آن تعداد از تسهیلاتی احداث می‌شوند که کمترین هزینه را برای مجریان در برداشته باشند. از مورد مذکور در مدل‌های ریاضی مسائل لجستیکی به‌صورت گسترده استفاده می‌شود. در رویه‌ی دوم، تعداد هاب‌ها به‌صورت برون‌زا تعیین می‌شود؛ که مشخص کردن آن نیز خود به چند طریق انجام می‌شود: (۱) استفاده از اسناد بالادستی، که به‌عنوان چارچوب راهبردی تصمیمات لجستیکی مدنظر قرار گرفته است. (۲) بهره‌گیری از نظرات خبرگان امر، که دلیل آن اشراف کامل آن‌ها به شرایط مسئله و دید واقع‌بینانه‌تر آن‌هاست. در مورد مسئله‌ی حاضر، با توجه به اینکه چند نوع هاب مدنظر بوده است، تعیین تعداد هر یک از انواع هاب‌ها، که در واقع همان مراکز لجستیکی هستند، براساس ساختار جریان بین هاب‌ها و همچنین نیاز نقاط شبکه مشخص شده است. در واقع می‌توان گفت که هدف مدل ریاضی حاضر، مکان‌یابی انواع مختلف هاب‌ها و تعیین روش حمل‌ونقل موردپشتیبانی در هاب‌ها، تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها، تعیین نوع حمل‌ونقل مستقیم براساس هاب مابین دو گره، مشخص کردن نوع ارتباط بین‌هایی، طراحی شبکه‌ی موردنظر براساس کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه، و تعیین معیارهای توسعه‌ی پایدار شامل شاخص‌های زیست‌محیطی است.

۳. روش پژوهش

در پژوهش حاضر، به‌منظور فرمول‌بندی مسئله‌ی مطرح‌شده، از نوشتارهای موجود در پیشینه‌ی پژوهش استفاده شده است. با توجه به اینکه مسئله‌ی پژوهش چندین مدل حمل‌ونقل متفاوت داشته است، از نوشتار ترکستانی و همکاران (۲۰۱۸)، ایده گرفته شده است، تا بتوان فرمول‌بندی مناسبی ارائه داد.^[۹] همچنین ساختار سلسله‌مراتبی براساس پژوهش‌های خودمانی - یزدی و همکاران (۲۰۱۹)،^[۱۰] و شانگ و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۱] و. درنهایت، برای فرمول‌بندی تخفیف زمانی از پژوهش آلومار و همکاران (۲۰۱۲) استفاده شده است.^[۱۲] قابل توجه است که برای طراحی مدل از نوشتارهای مذکور ایده گرفته شده است، اما فرمول‌بندی مسئله توسط پژوهشگر نوشتار اخیر صورت گرفته است.^[۱۲]

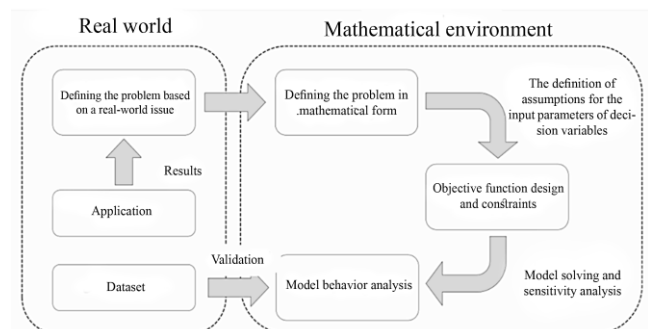
- مفروضات مدل پیشنهادی

به‌طور کلی می‌توان مفروضات مدل ریاضی را به این صورت تشریح کرد:

- 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 است؛
- ساختار شبکه‌ی کلی مسئله، بدون جهت است؛
- شبکه‌ی ارتباط‌دهنده‌ی هاب غیرکامل است؛

مسئله‌ی تک‌تخصیصی با تعداد هاب معین اشاره دارد؛^[۱۳] ولی اولین مطالعات در این زمینه، که باعث پیشرفت زیادی در تفهیم سیستم‌های واسطه‌یی و توسعه‌ی مدل‌های پایه‌یی با تمرکز بر بهینه و کمینه ساختن هزینه‌های جریان و هزینه‌های ثابت تسهیلات شده‌اند، توسط کمپل^۱ (۱۹۹۴)،^[۳] و اوکلی و همکارش (۱۹۹۴)،^[۴] معرفی شده‌اند. از آن زمان، پژوهشگران متعددی به کار و پژوهش بر روی این نوع از مسائل روی آورده‌اند، که این میزان از توجه، غالباً نیاز شدید سیستم‌های حمل و نقل و ارتباطات به ایجاد زیرساخت‌های نوین را نشان می‌دهد.^[۵] مختار و همکاران (۲۰۱۹)، به ارائه‌ی یک مدل برای حل مسائل مکان‌یابی هاب پرداختند.^[۶] آلومور و همکاران (۲۰۱۲)، نیز دیدگاه‌های مربوط به مدل‌های مسائل مکان‌یابی هاب برای مدل‌سازی بهتر را بررسی کرده‌اند.^[۷] همچنین مدل مکان‌یابی هاب تحت عدم قطعیت توسط شیروانی و شهرکی (۲۰۲۱) ارائه شده است.^[۸] با مطالعه‌ی منابع پیشین مشاهده می‌شود که مسائل مکان‌یابی هاب موردتوجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است، ولی کمتر از ساختار سلسله‌مراتبی استفاده شده است؛ در صورتی که وجود ساختار سلسله‌مراتبی این مزیت را ایجاد می‌کند که انتقال بین‌هایی وجود داشته باشد و هزینه‌ی ارسال کاهش یابد. همچنین در پژوهش حاضر با استفاده از ساختار هاب سلسله‌مراتبی، علاوه بر طراحی شبکه‌ی موردنظر براساس کمینه‌سازی هزینه‌های کل شبکه، معیارهای توسعه‌ی پایدار شامل شاخص‌های زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند، که پژوهش حاضر را از دیگر پژوهش‌ها متمایز می‌کند و چنین پژوهشی تاکنون صورت نگرفته است.

مسئله‌ی پژوهش حاضر، از رده‌ی پژوهش‌های کمی است، که مبتنی بر شرایط دنیای واقعی، فرمول‌بندی ریاضی شده است؛ تا درنهایت با تجزیه‌وتحلیل متغیرهای عددی، پاسخ‌های اجرایی در اختیار ذینفعان و تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد. همچنین در پژوهش حاضر به‌منظور ارائه‌ی تحلیل‌های مناسب در راستای حل مسئله‌ی مطرح‌شده، مدل ریاضی پیشنهادی در محیط کامپیوتری کدنویسی شده است، تا بتوان به خروجی‌های عددی مناسب دسترسی پیدا کرد. همچنین استفاده از تحلیل حساسیت، ابزاری مناسب برای ارزیابی عملکرد مدل ریاضی پیشنهادی است. با توجه به اینکه مسئله‌ی پژوهش حاضر، در حوزه‌ی پژوهش در عملیات قرار دارد، جهت حل آزمون و ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در ابعاد کوچک از حل‌کننده‌ی Cplex در محیط نرم‌افزار تجاری GAMS ۲۴.۱ استفاده شده است. همچنین با توجه به اینکه مسئله‌ی منطقه‌بندی از رده‌ی مطالعات NP-hard است، به‌منظور حل نمودهای عددی در ابعاد دنیای واقعی از الگوریتم‌های ابتکاری در محیط برنامه‌نویسی متلب^۲ استفاده شده است. با توجه به بخش‌های مختلف روش پژوهش، در شکل ۱، فلوچارت طراحی مدل بهینه‌سازی پژوهش مشاهده می‌شود.



شکل ۱. ساختار طراحی مدل بهینه‌سازی.

^۲ MATLAB

^۱ Campbell

- هاب‌ها محدودیت ظرفیت ندارند؛
- تخصیص سایر گره‌ها به هاب‌ها، به صورت تک‌تخصیصی است؛
- محدودیت بودجه‌ی وجود ندارد؛
- روش‌های حمل‌ونقل در چند دسته‌ی مختلف بررسی می‌شوند؛
- ارتباط مستقیم بین دو گره‌ی غیرهاب مجاز است؛
- برای ارتباط‌های میان‌هابی، عامل تخفیف زمانی وجود دارد؛
- حمل‌ونقل بین‌هابی در دو دسته‌ی جاده‌ی و سایر روش‌ها بررسی می‌شود.

- متغیرهای تصمیم

اگر یک هاب از نوع t در مکان بالقوه‌ی k با پشتیبانی از روش حمل‌ونقل m احداث شود، یک؛ در غیر این صورت صفر؛

$$H_k^{mt} =$$

اگر حمل‌ونقل بین دو گره به صورت مستقیم انجام شود، یک؛ در غیر این صورت صفر؛

$$\hat{Y}_{ij} =$$

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؛

$$Y_{ijkl}^m =$$

اگر پیوند هابی روش حمل‌ونقل m بین دو هاب k و l ایجاد شود، یک؛ در غیر این صورت صفر؛

$$Z_{kl}^m =$$

اگر گره‌ی i به هاب k تخصیص یابد، یک؛ در غیر این صورت صفر؛

$$X_{ik} =$$

میزان کالای حمل‌شده بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ی؛

$$TFG_{kl}^m =$$

تعداد وسیله‌ی حمل‌ونقل موردنیاز از نوع v بین هاب‌های k و l ؛

$$num_{kl}^v =$$

هزینه‌ی جابجایی کالایی بین هاب‌های k و l از طریق روش حمل‌ونقل جاده‌ی؛

$$ICG_{kl}^m =$$

میزان کالای حمل‌شده بین هاب‌های k و l از طریق سایر روش حمل‌ونقل (غیر از روش جاده‌ی)؛

$$TFM_{kl}^m =$$

هزینه‌ی جابجایی کالایی بین هاب‌های k و l از طریق سایر روش حمل‌ونقل (غیر از روش جاده‌ی)؛

$$ICM_{kl}^m =$$

زمان خدمت حمل‌ونقل کالا بین دو گره.

$$ST_{ij} =$$

- مدل ریاضی

$$\min \sum_{k,m,t} FH_k^{mt} H_k^{mt} + \sum_{k,l,m,k \neq l} HL_{kl}^m Z_{kl}^m +$$

$$\sum_{i,j,e} f_{ij}^e \hat{C}_{ij} \hat{Y}_{ij} + \sum_{i,j,i \neq k,l,k \neq l,m,e} (C_{ik}^g + C_{kj}^g) Y_{ijkl}^m f_{ij}^e$$

$$+ \sum_{k,l:k \neq l, m=\{g\}} ICG_{kl}^g + \sum_{k,l:k \neq l, m \neq \{g\}} ICM_{kl}^m$$

(۱-الف)

- 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

\dot{M} ، $\{m\}$ = مجموعه‌ی روش‌های حمل‌ونقل (g: روش حمل‌ونقل جاده‌ی)

E ، $\{e\}$ = مجموعه‌ی نوع کالاهای حمل‌شده

V ، $\{v\}$ = مجموعه‌ی انواع مختلف وسایل حمل‌ونقل جاده‌ی

- 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 بین‌هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m ؛

HL_{kl}^m = هزینه‌ی اتصال شبکه‌ی بین‌هابی با استفاده از روش حمل‌ونقل m ؛

cap^v = ظرفیت وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ی نوع v ؛

CV^v = هزینه‌ی استفاده از وسیله‌ی حمل‌ونقل جاده‌ی نوع v ؛

$Size^m$ = ظرفیت کانتینر استفاده‌شده در روش حمل‌ونقل m (غیر از روش جاده‌ی)؛

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 ؛

$$TFM_{kl}^m = \quad (16)$$

$$\sum_{i,j:i \neq j,e} f_{ij}^e Y_{ijkl}^m \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m \in M'$$

$$ICM_{kl}^m = (TFM_{kl}^m / Size^m) (C_{kl}^m + d_{kl}^m) \quad (17)$$

$$\forall k,l \in H : k \neq l, m \in M'$$

$$ST_{ij} = \left[\sum_{k:k \neq i} tt_{ik}^g X_{ik} + \sum_{k,l:l \neq i,t} ot_k^m + (a^m tt_{ij}^m) \right. \quad (18)$$

$$\left. + ot_l^m + \sum_{k:k \neq j} tt_{kj}^g X_{kj} \right] Y_{ijkl}^m + tt_{ij}^m \hat{Y}_{ij}$$

$$\forall i,j \in N : i \neq j$$

$$ST_{ij} \leq SB_{ij} \quad \forall i,j \in N : i \neq j \quad (19)$$

$$ST_{ij} \leq SB_{ij} \quad \forall i,j \in N : i \neq j \quad (20)$$

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

$$Z_{kl}^m \in \{0,1\} \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m \in M' \quad (22)$$

$$Y_{ijkl}^m \in \{0,1\} \quad (23)$$

$$\forall i,j \in N : i \neq j, k,l \in H : k \neq l$$

$$Y'_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i,j \in N : i \neq j \quad (24)$$

$$TFG_{kl}^m \geq 0 \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m = \{g\} \quad (25)$$

$$num_{kl}^v \geq 0 \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m = \{g\} \quad (26)$$

$$ICG_{kl}^m \geq 0 \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m = \{g\} \quad (27)$$

$$TFM_{kl}^m \geq 0 \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m \in M' \quad (28)$$

$$ICM_{kl}^m \geq 0 \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m \in M' \quad (29)$$

$$ST_{ij} \geq 0 \quad \forall i,j \in N : i \neq j \quad (30)$$

معادله‌ی (۱-الف)، تابع هدف اول مسئله است، که متشکل از ۶ بخش هزینه‌ی 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 الی ششم، هزینه‌ی حمل‌ونقل در صورت استفاده از شبکه‌ی هابی محاسبه می‌شود.

معادله‌ی (۱-ب)، به کمینه‌سازی آثار مخرب زیست‌محیطی، شامل اثر ناشی از احداث تسهیلات، احداث زیرساخت‌های بین‌هابی، و آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از انجام عملیات حمل‌ونقل در حالت‌های مختلف می‌پردازد.

$$\min \sum_{k,m,t} EnH_k^{mt} H_k^{mt} +$$

$$\sum_{k,l,m:k \neq l} EnL_{kl}^m Z_{kl}^m + \sum_{i,j,e} f_{ij}^e EnC_{ij} \hat{Y}_{ij} +$$

$$\sum_{i,j:i \neq i,k,l:k \neq l,m,e} (EnC_{ik}^g + EnC_{kj}^g) Y_{ijkl}^m f_{ij}^e \quad (1-ب)$$

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

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

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

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

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

$$\forall Z_{kl}^m \leq H_k^{mt} + H_l^{mt} \quad \forall k,l \in H : k \neq l, m \in M', t \in T \quad (7)$$

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

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

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

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

$$\forall i,j \in N : i \neq j, k \in H$$

$$Y_{ijkl}^m + Y_{ijlk}^m \leq Z_{kl}^m \quad (12)$$

$$\forall i,j \in N : i \neq j, k,l \in H : k \neq l$$

$$TFG_{kl}^m = \quad (13)$$

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

$$num_{kl}^v \geq \frac{TFG_{kl}^m}{cap^v} \quad (14)$$

$$\forall k,l \in H : k \neq k, m = \{g\}, v \in V$$

$$ICG_{kl}^m = num_{kl}^v CV^v \quad (15)$$

$$\forall k,l \in H : k \neq l, m = \{g\}, v \in V$$

که یک جواب مغلوب می شود و مجموعه جواب هایی که جواب فعلی بر آن ها غالب می شود. جهت تعیین دو مقدار اخیر، پس از مقایسه ی جواب ها با یکدیگر، جواب های نامغلوب و یا تقریبی از جبهه ی پارتویی در واقع همان جواب هایی هستند که تعداد دفعات مغلوب شدنشان صفر است.

۲.۳. الگوریتم تکاملی پارتویی قوی (SPEA-II)

الگوریتم های SPEA و SPEA-II، هر دو قدرتمند و کاربردی هستند، که از یک آرشیو خارجی به منظور ذخیره ی پاسخ های نامغلوبی که در مراحل جستجوی الگوریتم یافت می شوند، استفاده می کنند. در الگوریتم SPEA، ضعف هایی در محاسبه ی مقادیر قوت و برازندگی وجود داشته است. با توجه به نبود معیار ثانویه یی جهت مقایسه ی پاسخ های نامغلوب برای الگوریتم مذکور، پژوهشگران نسخه ی ثانویه یی آن را معرفی کرده اند، که ضعف های اشاره شده بر طرف شود. چارچوب کاری الگوریتم SPEA-II در ادامه تشریح شده است:

N_E : بیشینه ی اندازه ی آرشیو پاسخ های نامغلوب E;

N_F : اندازه ی جمعیت;

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

گام ۱: یک جمعیت از پاسخ های اولیه ی P ایجاد کنید و $E = \emptyset$. قرار دهید;

گام ۲: برازندگی هر پاسخ i در مجموعه $P_i \cup E_i$ را به این صورت محاسبه کنید:

- **زیرگام ۱.۲:** ابتدا برازندگی خام پاسخ i را از رابطه ی ۳۱ محاسبه کنید:

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

که در آن، علامت $j > i$ به معنای آن است که j بر پاسخ i غلبه می کند. همچنین $s(i)$ مقدار قوت پاسخ را نشان می دهد، که در واقع تعداد پاسخ هایی است که توسط i مغلوب می شوند.

- **زیرگام ۲.۲:** تراکم پاسخ i را به صورت معادله ی ۳۲ محاسبه کنید:

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

که در آن، σ_i^k فاصله ی بین پاسخ i و k امین همسایگی نزدیک به آن است.

- **زیرگام ۳.۲:** نهایتاً مقدار برازندگی از جمع مقدار برازندگی خام و تراکم پاسخ i مطابق رابطه ی ۳۳ به دست می آید.

$$F(i) = R(i) + D(i) \quad \forall i \in P_i \quad (33)$$

گام ۳: تمام پاسخ های نامغلوب موجود در مجموعه $P_t \cup E_t$ را به E_{t+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 می شود. در واقع، پاسخی که کمینه ی

محدودیت ۲، تعداد هاب های احداثی از هر نوع با پشتیبانی روش حمل و نقل معین را مشخص می کند. محدودیت ۳، بیان می کند که هر گره ی غیر هاب می تواند فقط به یک هاب تخصیص یابد. محدودیت های ۴ و ۵، رابطه ی بین دو نوع متغیر احداثی تسهیل را برقرار می کند. محدودیت ۶، نشان دهنده ی این است که یک گره زمانی می تواند به یک هاب تخصیص یابد، که هاب مورد نظر احداث شده باشد. کارکرد محدودیت ۷، در این است که یک ارتباط بین هایی با استفاده از یک روش حمل و نقل (غیر از جاده یی) زمانی می تواند برقرار شود که هر دو گره ی مورد نظر به عنوان هاب انتخاب شوند و از روش مورد نظر پشتیبانی کنند. این ارتباط در روش حمل و نقل جاده یی مستقل از نوع روش پشتیبانی شده در هاب هاست، چرا که ارتباط جاده یی مانند سایر روش ها (ریلی و هوایی) نیاز به تسهیلات و تجهیزات خاص ارتباطی و تخلیه و بارگیری ندارد. این مسئله در محدودیت ۸ نشان داده شده است، جایی که با احداث دو هاب در دو نقطه، ارتباط جاده یی بین آن دو هاب بدون توجه به نوع روش پشتیبانی شده می تواند برقرار شود. محدودیت ۹، بیان می کند در صورتی که یک نقطه به عنوان هاب انتخاب شود، حتماً به یک هاب دیگر با ارتباط بین هایی متصل خواهد شد. در محدودیت ۱۰، انتخاب مابین روش حمل و نقل مستقیم و براساس هاب صورت می گیرد. محدودیت ۱۱، محدودیت تعادل جریان مابین گره هاست و تعیین می کند که کدام ارتباط بین هایی جهت حمل و نقل مابین دو گره استفاده شود. محدودیت ۱۲، تضمین می کند که جریان کالایی فقط بر روی پیوندهای هایی احداث شده صورت پذیرد. محدودیت ۱۳، مقدار کل کالای حمل شده در بین دو هاب با استفاده از روش حمل جاده یی را محاسبه می کند. محدودیت ۱۴، تعداد وسیله ی مورد نیاز از هر نوع را تعیین و محدودیت ۱۵، هزینه ی حمل و نقل جاده یی بین هایی را محاسبه می کند. در محدودیت ۱۶، مقدار کل کالای حمل شده ی بین هایی برای سایر روش های حمل و نقل (غیر از جاده یی) محاسبه و در محدودیت ۱۷، هزینه ی این نوع حمل و نقل مابین دو هاب مشخص می شود. محدودیت ۱۸، کل زمان خدمت بین دو گره را محاسبه و در محدودیت ۱۹، کران مربوط به آن را مشخص می کند. محدودیت های ۲۰ الی ۳۰، دامنه ی مقداردهی متغیرهای تصمیم مسئله را نشان می دهند.

با توجه به اینکه مسئله ی طراحی شبکه ی هاب های لجستیکی از رده ی مسائل NP-hard است؛ بنابراین، در پژوهش حاضر جهت حل نمونه های عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم های فراابتکاری استفاده شده است.

۱.۳. الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II)

یکی از الگوریتم هایی که بسیار پر کاربرد و قدرتمند برای به دست آوردن جواب های بهینه است، الگوریتم NSGA-II است، که کارایی آن در حل مسائل مختلف به اثبات رسیده است. دب و همکاران (۲۰۰۲)، یک نسخه ی دوم از الگوریتم ژنتیک دهدفه، که علاوه بر به دست آوردن کیفیت جواب ها، تنوع و گوناگونی به دست آوردن جواب های بهینه ی پارتویی حائز اهمیت بوده است، ارائه کرده اند؛^[۱۳] که با دو معیار اصلی به جواب ها پاسخ می دهد: (۱) برگزیده شدن جواب های با کیفیت؛ و (۲) اگر دو جواب با کیفیت مشابه حاصل شود، جوابی که با ساختار منظم تر است، انتخاب می شود. پس اول کیفیت و سپس نظم مورد توجه قرار می گیرند. الگوریتم NSGA-II دو فاز شناخته شده دارد: فاز اول، استفاده از معیار رتبه بندی و مفهوم غلبه؛ و فاز دوم، استفاده از فاصله ی ازدحامی مربوط به نظم آن هاست. در فاز اول، رتبه بندی جواب ها مشخص می شود و برای این دو مقدار محاسبه می شوند: تعداد دفعاتی

مطابق با موقعیت بهترین عامل جستجو به‌روزرسانی کنند. معادله‌های ۳۸ الی ۴۰ بدین منظور ارائه شده‌اند:

$$\bar{D}_\alpha = \quad (38)$$

$$\left| \bar{C}_\alpha \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X} \right|, \bar{D}_\beta = \left| \bar{C}_\beta \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X} \right|, \bar{D}_\delta = \left| \bar{C}_\delta \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X} \right|$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1, (\bar{D}_\alpha), \bar{X}_\tau = \quad (39)$$

$$\bar{X}_\beta - \bar{A}_\tau, (\bar{D}_\beta), \bar{X}_\tau = \bar{X}_\tau - \bar{A}_\tau, (\bar{D}_\delta)$$

$$\bar{X}(t+1) = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_\tau + \bar{X}_\tau}{3} \quad (40)$$

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

برای بررسی هر چه دقیق‌تر یک مسئله‌ی واقعی، نیاز به داده‌هایی است که تا حد ممکن به واقعیت نزدیک باشند و یا نتیجه‌ی آمار و اطلاعات گذشته از بررسی شبکه‌های حمل‌ونقل باشند. بنابراین، داده‌های موردنیاز در دو دسته‌ی پارامترهای آماری موجود و پارامترهای قابل‌محاسبه تقسیم می‌شوند. از بین موارد الزامی برای مدل ریاضی مسئله، پارامترهای میزان جریان کالایی و هزینه‌ی هر تن-کیلومتر انواع مختلف وسائط نقلیه، در سامانه‌های اطلاعاتی نهادهای مرتبط موجود هستند؛ ولی داده‌هایی مانند فاصله‌ی بین مراکز موردبررسی (به دلیل نبود پایانه‌های مرزی و فواصل مابین آن‌ها و نیز فاصله‌ی آن‌ها با مراکز استان‌ها)، هزینه‌های مستقیم و بین‌هابی حمل‌ونقل، هزینه‌ی ثابت احداث هاب‌های لجستیکی (تاکنون پژوهش ساختاریافته‌ی درخصوص احداث این نوع هاب‌ها در نقاط مختلف ایران و ثبت اطلاعات مربوط به هزینه‌ی ثابت در صورت احداث آن‌ها، انجام نشده است) و احداث زیرساخت‌های حمل‌ونقلی مناسب بین شهرها (آزادراه، بزرگراه، و راه اصلی) وجود نداشتند و باید در طی پژوهشی جداگانه محاسبه می‌شدند، که با توجه به ضرورت آن‌ها برای پژوهش حاضر، در طول همین طرح بررسی و محاسبه شده‌اند.

۴.۱. مطالعه‌ی موردی: طراحی شبکه‌ی لجستیکی غرب کشور

در بخش کنونی، پس از اعتبارسنجی مدل ریاضی، مورد مطالعاتی اول که طراحی شبکه‌ی لجستیکی با هاب‌های تسهیلاتی در غرب کشور است، حل شده است. باید توجه داشت که مطابق با نظر کارشناسان و خبرگان این حوزه، مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی هاب لجستیکی در غرب کشور تحت تأثیر معیارهای اقتصادی بوده و معیارهای زیست‌محیطی نقش چندانی در آن نداشته‌اند. بنابراین، در این مورد مطالعاتی فقط تابع هزینه‌ی لحاظ و مدل به‌صورت تک‌هدفه حل شده است. همچنین سناریوهای پیشنهادی مطرح‌شده توسط کارشناسان و خبرگان انجمن لجستیک بررسی شده‌اند.

سناریوی اول: اهمیت راهبردی 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 گرفته شده‌اند. این حالت در مورد ارتباطات بین‌هابی نیز دید واقع‌بینانه‌تری دارد. به این معنی که درصد پیشرفت بزرگراه‌های برنامه‌ریزی‌شده در منطقه‌ی غرب کشور در محاسبات دخالت داده شده است. چند نمونه از بزرگراه‌های در حال احداث منطقه که می‌توانند در شبکه‌ی طراحی‌شده تأثیرگذار باشند، به همراه درصد پیشرفت در جدول ۱ ارائه شده‌اند.^[۱۷]

فاصله‌ی σ^k را از دیگر پاسخ‌ها دارد، در ابتدا حذف می‌شود. با این حال، اگر چند پاسخ، فاصله‌ی کمینه‌ی داشته باشند، دومین فاصله‌ی کمتر، 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 $|E_{t+1}| \leq N_E$ ، به تعداد $N_E - |E_{t+1}|$ پاسخ مغلوب‌شده براساس مقادیر برازندگی آن‌ها از مجموعه‌ی $E_t \cup P_t$ به مجموعه‌ی E_{t+1} انتقال می‌یابد.

گام ۴: اگر شرایط خاتمه فراهم شده باشد، الگوریتم متوقف می‌شود و پاسخ‌های E_{t+1} را برمی‌گرداند.

گام ۵: با استفاده از روش رقابت دوتایی، والدین از مجموعه‌ی E_{t+1} انتخاب می‌شوند.

گام ۶: اپراتورهای ترکیب و جهش بر روی والدین استفاده و به تعداد Np فرزند تولید می‌شود. فرزندان در مجموعه‌ی P_{t+1} کپی و به مقدار شمارنده، یک واحد اضافه می‌شود ($t = t + 1$) و سپس به گام ۲ بازگشت می‌شود.

همچنین در الگوریتم نیز از همان شیوه‌ی ترکیب و جهش استفاده شده در الگوریتم NSGA-II استفاده می‌شود.

۳.۳. الگوریتم چندهدفه‌ی گرگ خاکستری

میر جلیلی و همکاران (۲۰۱۴)، ابتدا نسخه‌ی اولیه‌ی الگوریتم گرگ خاکستری و سپس ساختار توسعه‌ی الگوریتم مذکور را برای حل مسائل چندهدفه ارائه کرده‌اند.^[۱۱] الگوریتم گرگ خاکستری بر مبنای ساختار اجتماعی گرگ‌های خاکستری طراحی شده است و عملگرهای سلسله‌مراتب اجتماعی، محاصره‌ی طعمه، شکار، حمله به طعمه، و جستجو برای شکار دارد. اگر \vec{X}_p بردار موقعیت طعمه و \vec{X} موقعیت گرگ خاکستری باشد؛ بنابراین، در الگوریتم ذکرشده، بهترین جواب به‌عنوان آلفا (α) در نظر گرفته می‌شود و دومین و سومین پاسخ برتر به ترتیب به‌عنوان بتا (β) و دلتا (δ) و سایر پاسخ‌ها نیز امگا (ω) نامیده می‌شوند. به‌منظور مدل‌سازی ریاضی رفتار محاصره‌ی، معادله‌های ۳۴ و ۳۵ استفاده می‌شود:

$$\vec{D} = \left| \vec{D} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t) \right| \quad (34)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (35)$$

که در آن‌ها، t شماره‌ی تکرار الگوریتم، و \vec{A} و \vec{C} بردار ضرایب هستند که توسط معادله‌های ۳۶ و ۳۷ محاسبه می‌شوند:

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r}_1 - a \quad (36)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (37)$$

که در آن‌ها، درایه‌های بردار \vec{a} به‌صورت خطی از ۲ به ۰ کاهش می‌یابند. بردارهای \vec{r}_1 و \vec{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، ۳ جواب بهتر به‌دست‌آمده ذخیره می‌شوند و عامل‌های دیگر جستجو (از جمله امگا) باید موقعیت خود را

جدول ۱. درصد پیشرفت بزرگراه‌های در حال احداث غرب ایران.

بزرگراه	درصد پیشرفت
همدان- سنندج	۸۰
کرمانشاه- میاندوآب	۷۲
ارومیه- سرو	۶۵
ارومیه- مهاباد	۴۶

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

سناریوی دوم: احداث کامل زیرساخت‌های ارتباطی بین‌هابی

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

سناریوی سوم: توجه ضمنی به حمل‌ونقل با کیفیت تر داخلی و بین‌المللی

حالت سوم، فرض مربوط به اهمیت برابر دو نوع لجستیک را به صورت صریح دارد؛ ولی از آنجایی که ارتباطات جاده‌یی بین‌هابی در این حالت از نوع آزادراه است، می‌توان نسبت به برنامه‌ریزی جهت توسعه‌ی حمل‌ونقل بین‌المللی کالا و لجستیک ترانزیت از طریق فراهم‌ساختن زیرساخت‌های با کیفیت و در حد استانداردهای منطقه‌یی و بین‌المللی اقدام کرد. به دلیل آنکه مابین شهرها و مناطق موردبررسی، آزادراه در حال احداثی وجود نداشته است، هزینه‌های کامل آن از ابتدا در محاسبات لحاظ شده است.

سناریوی چهارم: اهمیت بیشتر حمل‌ونقل داخلی

در این حالت، به دلیل فرض اهتمام بیشتر تصمیم‌گیرندگان به لجستیک درون‌کشوری، تعداد مراکز لجستیکی، ۳ و هاب‌های مرزی، ۲ در نظر گرفته شده است. ارتباطات بین‌هابی نیز به دلیل کفایت بزرگراه به نسبت هزینه‌ی احداث آن است.

سناریوی پنجم: اهمیت بیشتر حمل‌ونقل خارجی

برخلاف حالت قبل، حالت پنجم بر لجستیک خارجی تأکید داشته و تعداد هاب‌ها نیز برعکس موردقبل، ۳ هاب مرزی و ۲ مرکز لجستیکی در مناطق داخلی کشور، موردنظر بوده است. همان‌گونه که اشاره شد، به‌منظور بهره‌برداری بیشینه از مزایای لجستیک ترانزیت و حمل‌ونقل بین‌المللی کالا و نیز ترغیب شرکت‌های حمل‌ونقل و کشورهای همسایه برای استفاده از زیرساخت‌های با کیفیت و استاندارد داخل کشور، در این حالت ارتباطات جاده‌یی بین‌هابی احداثی از نوع آزادراه بوده است.

سناریوی 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 باید عواملی غیر از فاکتور هزینه هم در نظر گرفته شوند، در این حالت هزینه‌های ثابت احداث تسهیلات و زیرساخت ارتباطی بین‌هابی مناسب، تحت تأثیر ضریب مطلوبیت قرار گرفته و محاسبات مرتبط با فرض مذکور انجام شده است.

سناریوی هفتم: تأکید بیشتر بر مکان‌یابی تسهیلات

در این حالت، اهمیت مکان‌یابی تسهیلات به نسبت طراحی شبکه‌ی ارتباطی بین‌هابی بیشتر فرض شده است. این رابطه علی‌رغم اینکه تصویری واقعی از ایجاد ارتباطات بین‌هابی ارائه نمی‌دهد، تأثیر مکان‌یابی تسهیلات را در نتایج پایانی و پیاده‌سازی شبکه بیشتر می‌کند. ضمن آنکه تعداد هر دو نوع هاب، ۳ تسهیل در نظر گرفته شده است.

سناریوی هشتم: اهمیت راهبردی برابر لجستیک داخلی و ترانزیت، تعداد تسهیل کمتر

این حالت، تمامی فرض‌های حالت دوم را دارد، یعنی احداث کامل بزرگراه بین‌هاب‌ها مدنظر است. ولی تعداد تسهیلات نسبت به حالت‌های پیشین کمتر بوده و ضمن برابری اهمیت راهبردی حمل‌ونقل داخلی و خارجی، تعداد ۲ هاب از هر نوع جهت احداث در منطقه پیشنهاد شده است. در جدول ۲، نتایج تکمیلی هر یک از سناریوها و حالت‌های پیشنهادی ذکر شده ارائه شده است.

نکته: از آنجایی که هزینه‌ها و داده‌های مسئله براساس گزارش‌های سالانه و بر حسب سال محاسبه شده‌اند، جهت متعادل شدن هزینه‌های کل سیستم، باید مقدار معادل هزینه‌ی سالیانه‌ی احداث هاب به‌جای هزینه‌ی ثابت اولیه‌ی احداث در نظر گرفته شود. برای این منظور از روش‌های اقتصادی و از فاکتور تبدیل مقدار سرمایه‌گذاری اولیه به هزینه‌ی یکنواخت سالیانه مطابق رابطه‌ی ۴۱ استفاده شده است:

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

از آنجایی که در عبارت اخیر با بزرگ‌تر شدن مقدار n ، مقدار کسر به سمت i میل می‌کند، و نیز با توجه به اینکه عمر تسهیلات لجستیکی در دنیای واقعی معمولاً بیش از ۲۵ سال است، می‌توان مقدار فاکتور مذکور را برابر مقدار i یا نرخ بهره قرار داد. نرخ بهره در پژوهش حاضر، ۲۰٪ در نظر گرفته شده است. بنابراین، در جدول ۳ هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات به صورت متعادل‌شده‌ی سالیانه به همراه سایر هزینه‌ها ارائه شده است.

در اینجا نتایج تشریحی سناریوی اول ارائه شده است:

۱. شهرهای تبریز، سنندج، و همدان به‌عنوان نقاط مناسب برای احداث هاب‌های لجستیکی داخل کشور یا مراکز لجستیکی انتخاب شده‌اند.

۲. مرزهای بازرگان، ترمچین، و مهران به‌عنوان مراکز برای توسعه‌ی هاب‌های لجستیکی مرزی برگزیده شده‌اند.

۳. مابین شهرهای همدان- مهران، مهران- سنندج، بازرگان- تبریز، تبریز- ترمچین (پیرانشهر)، و ترمچین- سنندج جهت ارتباطات بهتر بین‌هابی، احداث بزرگراه‌های باکیفیت پیشنهاد شده است.

۴. هزینه‌ی ثابت احداث تسهیلات در مجموع مقدار ۱۲۰ میلیارد و ۸۶۴ میلیون تومان بوده است.

جدول ۲. نتایج محاسباتی حالت‌های مختلف مسئله.

سناریو / هزینه‌ها	ثابت احداث تسهیلات	حمل و نقل	احداث ارتباطات بین‌هابی	کل (تومان)
اول	۶۰۴۱۸۴۰۰۰۰۰	۵۳۱۱۹۱۰۰۰۰۰	۱۶۹۹۰۰۰۰۰۰۰	۷۶۱۵۱۰۰۰۰۰۰۰
دوم	۴۹۴۹۹۰۰۰۰۰۰	۷۳۱۷۹۴۰۰۰۰۰۰	۳۰۴۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۸۵۶۹۰۰۰۰۰۰۰
سوم	۵۰۹۸۹۶۰۰۰۰۰۰	۹۳۰۸۸۲۰۰۰۰۰۰	۷۳۳۵۰۰۰۰۰۰۰	۱۷۱۵۳۷۰۰۰۰۰۰۰
چهارم	۵۰۸۵۴۸۰۰۰۰۰۰	۶۸۳۲۸۶۰۰۰۰۰۰	۳۳۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۶۶۱۴۰۰۰۰۰۰۰
پنجم	۴۲۷۵۶۵۰۰۰۰۰۰	۹۷۵۸۴۸۰۰۰۰۰۰	۵۸۹۵۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۶۰۸۱۰۰۰۰۰۰۰۰
ششم	۵۱۶۹۱۴۰۰۰۰۰۰۰	۶۹۰۷۵۹۰۰۰۰۰۰	۳۲۱۳۸۵۰۰۰۰۰۰	۱۰۶۳۸۴۰۰۰۰۰۰۰
هفتم	۶۰۴۱۸۴۰۰۰۰۰۰	۵۳۱۱۹۱۰۰۰۰۰۰	۳۱۱۱۸۶۰۰۰۰۰۰	۵۹۱۶۱۰۰۰۰۰۰۰
هشتم	۳۴۹۹۳۵۰۰۰۰۰۰	۷۷۰۱۸۶۰۰۰۰۰۰	۲۶۲۸۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۶۷۹۸۰۰۰۰۰۰۰

جدول ۳. نتایج حالت‌های مختلف مسئله با تعدیل هزینه‌ی ثابت احداث.

سناریو / هزینه‌ها	ثابت احداث تسهیلات (سالانه)	حمل و نقل	احداث ارتباطات بین‌هابی	کل (تومان)
اول	۱۲۰۸۳۶۴۰۰۰۰۰	۵۳۱۱۹۱۰۰۰۰۰۰	۱۶۹۹۰۰۰۰۰۰۰	۷۱۳۱۷۴۶۴۰۰۰۰۰
دوم	۹۸۹۸۸۰۰۰۰۰۰	۷۳۱۷۹۴۰۰۰۰۰۰	۳۰۴۴۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۴۶۰۹۲۸۰۰۰۰۰
سوم	۱۰۱۹۷۹۲۰۰۰۰۰۰	۹۳۰۸۸۲۰۰۰۰۰۰	۷۳۳۵۰۰۰۰۰۰۰	۱۶۷۴۵۷۹۹۲۰۰۰۰۰
چهارم	۱۰۱۷۰۹۶۰۰۰۰۰۰	۶۸۳۲۸۶۰۰۰۰۰۰	۳۳۲۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۲۵۴۵۶۹۶۰۰۰۰۰
پنجم	۸۵۵۱۳۰۰۰۰۰۰۰	۹۷۵۸۴۸۰۰۰۰۰۰	۵۸۹۵۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۵۷۳۸۹۹۳۰۰۰۰۰۰
ششم	۱۰۳۳۸۲۸۰۰۰۰۰۰	۶۹۰۷۵۹۰۰۰۰۰۰	۳۲۱۳۸۵۰۰۰۰۰۰	۱۰۲۲۴۸۲۲۸۰۰۰۰۰
هفتم	۱۲۰۸۳۶۸۰۰۰۰۰۰	۵۳۱۱۹۱۰۰۰۰۰۰	۳۱۱۱۸۶۰۰۰۰۰۰	۵۴۳۲۷۴۷۱۰۰۰۰۰
هشتم	۶۹۹۸۷۰۰۰۰۰۰۰	۷۷۰۱۸۶۰۰۰۰۰۰	۲۶۲۸۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۳۹۹۸۴۷۰۰۰۰۰۰

دشواری‌های محاسباتی بسیاری روبروست، بنابراین به منظور حل مسئله از روش نیل به هدف استفاده شده است. داده‌های ورودی در مثال کنونی، شامل ۳۰ مرکز اصلی به عنوان نقاط شبکه، ۹ نقطه‌ی بالقوه جهت احداث هاب‌های لجستیکی، دو سیستم حمل و نقل زمینی و هوایی، و ۲ نوع محصول مختلف بوده است. اطلاعات مرتبط با مسافت‌ها، هزینه‌های احداث و جایابی از منابع داده‌ی استخراج شده است. سایر داده‌های ورودی، که دسترسی به آن‌ها محدودیت داشت، به صورت عددی و با ساختار تصادفی یکنواخت تولید شده است. در ادامه، تشریح برخی از مهم‌ترین داده‌های ورودی مسئله در جدول ۴ ارائه شده است.

۵. هزینه‌ی حمل و نقل سالانه در شبکه‌ی بررسی شده، در حدود ۵۳۱۱ میلیارد و ۹۱۰ میلیون تومان بوده است.

۶. هزینه‌ی توسعه و بهبود زیرساخت‌های شبکه‌ی بین‌هابی نیز ۱۶۹۹ میلیارد تومان بوده است.

شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران، با تأکید بر مکان‌یابی هاب‌های لجستیکی، با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف پیشنهادی در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

۲.۴. حل مورد مطالعاتی طراحی شبکه‌ی لجستیکی کل کشور

با توجه به بالای بودن حجم داده‌های ورودی، ارائه‌ی آن‌ها در متن رساله باعث ایجاد بار متنی زیادی می‌شود؛ بنابراین، می‌توان تمام داده‌های ورودی مرتبط

در بخش حاضر، مورد مطالعاتی در ابعاد بزرگ‌تر در نظر گرفته شده و البته تابع هدف دوم نیز لحاظ شده است. با توجه به اینکه حل مسائل چندهدفه با

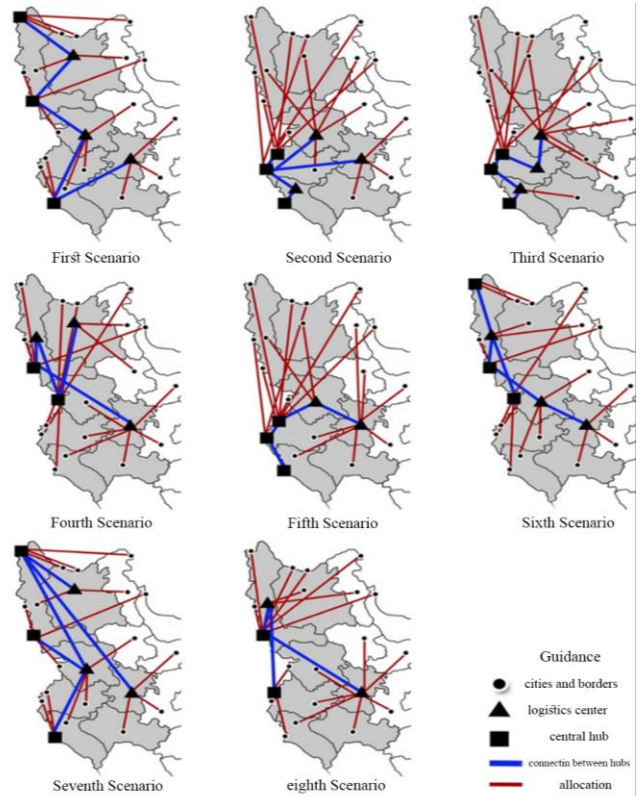
با مسئله را در قالب فایل اکسل، که به پیوست موجود است، مشاهده کرد. اما نقشه‌ی اولیه‌ی ساختار بالقوه‌ی شبکه‌ی لجستیکی کشور را می‌توان در شکل ۳ مشاهده کرد.

پس از حل مسئله‌ی پژوهش با استفاده از حل‌کننده‌ی Cplex در محیط نرم‌افزار GAMS، نمودار کاهش گپ محاسباتی در نرم‌افزار که با نام OPTCR شناخته می‌شود، در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

که مطابق آن، بخش زیادی از شاخه‌زنی‌ها برای رسیدن از گپ حدود ۲٪ به گپ صفر صرف شده است، که این موضوع خود تأییدی بر پیچیدگی بالای مسئله در ابعاد مذکور است.

پس از حصول پاسخ نهایی می‌توان مشاهده کرد که مقادیر عددی جملات توابع هدف اول و دوم در جدول ۵ ارائه شده است.

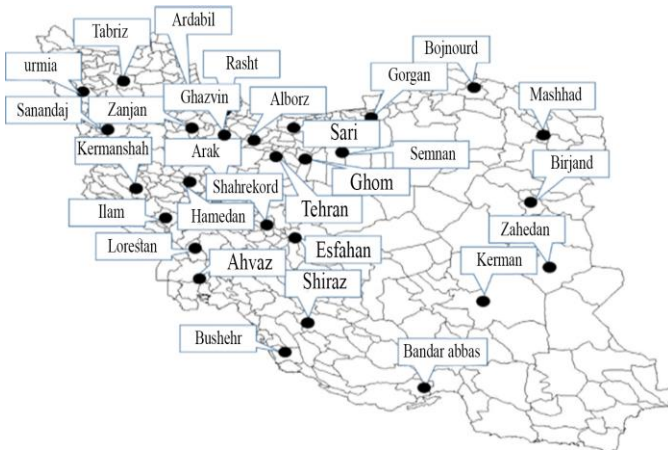
همچنین ساختار گرافیکی تخصیص نقاط به هاب‌های لجستیکی نیز در شکل ۵ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، شهرهای تهران، کرمانشاه، شیراز، و مشهد به‌عنوان هاب‌های لجستیکی کشور انتخاب شده‌اند و وظیفه‌ی پوشش سایر شهرها را به‌عهده دارند. برای مثال، شهرهای بیرجند، بجنورد، کرمان، و زاهدان به هاب مشهد تخصیص یافته‌اند. همچنین شهرهای همدان، قم، ساری، گرگان، رشت، زنجان، قزوین، و سایر شهرهای اطراف تهران به هاب تهران تخصیص داده شده‌اند. نکته‌ی جالب‌توجه این است که هیچ ارتباط مستقیمی بین نقاط شبکه وجود نداشته و کلیه‌ی تقاضاها از طریق شبکه‌ی هاب تأمین شده است.



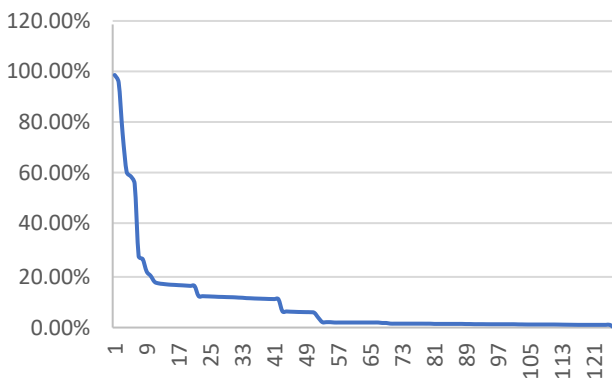
شکل ۲. شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران در سناریوهای مختلف.

جدول ۴. هزینه‌ی ثابت احداث هاب‌های لجستیکی.

هاب‌های بالقوه	سیستم حمل و نقل هوایی	سیستم حمل و نقل زمینی
آذربایجان شرقی	۱۳۸.۶۱۳.۶۰۰.۰۰۰/۰۰	۱۵۸.۰۱۹.۵۴۰.۰۰۰/۰۰
اصفهان	۱۰۷.۰۳۲.۰۰۰.۰۰۰/۰۰	۹۵.۲۵۸.۴۸۰.۰۰۰/۰۰
تهران	۸۰.۵۴۲.۰۰۰.۰۰۰/۰۰	۶۹.۲۶۶.۱۲۰.۰۰۰/۰۰
خراسان رضوی	۶۷.۴۲۵.۰۰۰.۰۰۰/۰۰	۸۰.۲۳۵.۷۵۰.۰۰۰/۰۰
فارس	۱۱۴.۹۶۱.۸۰۰.۰۰۰/۰۰	۱۲۶.۴۵۷.۹۸۰.۰۰۰/۰۰
کرمانشاه	۱۰۰.۰۵۵.۸۰۰.۰۰۰/۰۰	۱۰۴.۰۵۸.۰۳۲.۰۰۰/۰۰
کهگیلویه و بویر احمد	۷۵.۴۳۶.۶۰۰.۰۰۰/۰۰	۸۵.۲۴۳.۳۵۸.۰۰۰/۰۰
مازندران	۱۲۴.۵۸۶.۶۰۰.۰۰۰/۰۰	۱۴۵.۷۶۶.۳۲۲.۰۰۰/۰۰
مرکزی	۸۶.۳۷۵.۶۰۰.۰۰۰/۰۰	۸۴.۶۴۸.۰۸۸.۰۰۰/۰۰



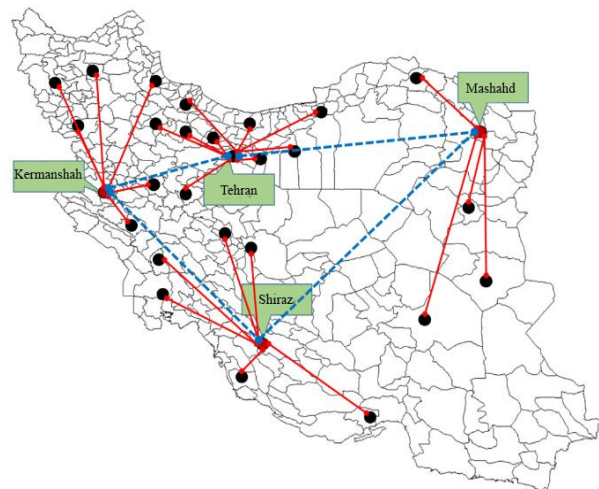
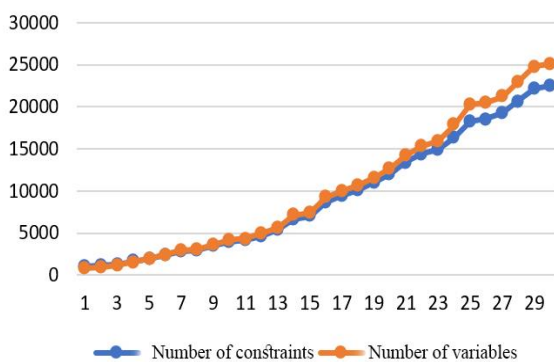
شکل ۳. ساختار بالقوه‌ی شبکه‌ی هاب لجستیکی کشور.



شکل ۴. نمودار کاهش گپ محاسباتی در الگوریتم Cplex.

جدول ۵. مقادیر عددی جملات توابع هدف.

تابع هدف اول	جمله‌ی اول	جمله‌ی دوم	جمله‌ی سوم	جمله‌ی چهارم	جمله‌ی پنجم	جمله‌ی ششم
	$1/19 \times 10^{11}$	$3/12 \times 10^{12}$	$1/71 \times 10^{13}$	$4/75 \times 10^{12}$	۱۴۴۰۰۰	$6/45 \times 10^7$
تابع هدف دوم	جمله‌ی اول	جمله‌ی دوم	جمله‌ی سوم	جمله‌ی چهارم		
	۲۵۰	۹۱	$4/29 \times 10^{14}$	$8/11 \times 10^5$		



شکل ۵. ساختار شبکه‌ی هاب لجستیکی کشور.

۳.۴. آنالیز ابعادی

با توجه به اینکه در سال‌های اخیر تأکید بسیار زیادی در استفاده از نرم-افزارهای تجاری به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی و حصول پاسخ‌های دقیق به‌جای پاسخ‌های نزدیک به بهینه شده است، لذا تحلیل رفتار مدل در مقابل تغییرات ابعاد مسئله، اهمیت زیادی دارد. بدین منظور در پژوهش حاضر، تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای تولیدشده در مثال‌های عددی مختلف بررسی شده‌اند. در شکل ۶، رویه‌ی رشد تعداد متغیرها و محدودیت‌ها مشاهده می‌شود.

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 شده است. در حقیقت، مطابق با تئوری‌های موجود در پژوهش در عملیات، افزایش تعداد محدودیت‌ها، دشواری مثال‌های عددی را بیشتر از افزایش تعداد متغیرها تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۵.۴. تحلیل نتایج با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

با توجه به اینکه مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی هاب لجستیکی از رده‌ی مسائل NP-hard بوده است، جهت حل نمونه‌های عددی با ابعاد متوسط و بزرگ از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شده است؛ اما یکی از موضوع‌های بسیار مهم در استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری، انتخاب مناسب آن‌ها با توجه به

شکل ۶. تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای تصمیم حاصل از حل نمودهای عددی.

ماهیت و ساختار عملکردی در یافتن پاسخ‌های نهایی است. مطابق با مرور ادبیات پژوهش، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر ازدحام، سطح عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌های مبتنی بر پاسخ دارند. بنابراین در پژوهش حاضر نیز از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت و مبتنی بر ازدحام استفاده شده است. از میان الگوریتم‌های ارائه‌شده در سال-های اخیر، الگوریتم گرگ خاکستری، قدرت محاسباتی بسیار بالایی داشته و تقریباً در تمامی مسائلی که استفاده شده‌اند، بر سایر الگوریتم‌ها برتری نسبی یا مطلق داشته‌اند. نسخه‌ی چندهدفه‌ی الگوریتم‌های مذکور نیز کارایی بسیار بالایی دارند و قادر هستند به‌صورت کاملاً مناسبی از فاز Exploration وارد فاز Exploitation شوند و پاسخ‌های نهایی مناسبی را گزارش دهند. بنابراین در پژوهش حاضر از الگوریتم MOGWO استفاده شده است. همچنین خانواده‌ی ژنتیک معمولاً در تمامی مسائل بهینه‌سازی، عملکرد مناسبی دارند و می‌توانند به‌عنوان یک معیار مقایسه‌ی خوب استفاده شوند. در خانواده‌ی ژنتیک، نسخه‌ی 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 پژوهش حاضر، نتایج الگوریتم‌های پیشنهادی با الگوریتم‌های NSGA-II و SPEA-II مقایسه شده‌اند، تا در نهایت بهترین نتایج گزارش شوند.

۱.۵.۴. معیارهای مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌های چندهدفه

DNS: تعداد نقاط جبهه‌ی پارتویی؛

جدول ۶. ابعاد نمودارهای عددی برای تحلیل ابعادی مسئله.

تعداد مد حمل و نقل	تعداد محصولات	تعداد هاب بالقوه	نقاط شبکه
۲	۲	۵	۵۰
۲	۲	۶	۶۰
۲	۲	۷	۷۰
۲	۲	۹	۹۰
۳	۲	۱۰	۱۰۰
۳	۲	۱۲	۱۲۰
۳	۲	۱۳	۱۴۰
۳	۲	۱۳	۱۵۰
۳	۳	۱۳	۱۶۰
۴	۳	۱۴	۱۷۰
۴	۳	۱۴	۱۸۰
۴	۳	۱۵	۲۰۰
۴	۳	۱۵	۲۵۰
۴	۴	۱۶	۲۸۰
۴	۴	۱۶	۳۰۰
۵	۴	۱۸	۳۴۰
۵	۴	۱۸	۳۸۰
۵	۴	۱۸	۴۲۰
۶	۴	۱۸	۴۵۰
۶	۴	۱۹	۴۸۰
۶	۴	۲۱	۵۰۰
۶	۴	۲۲	۵۲۰
۷	۴	۲۲	۵۳۰
۷	۵	۲۳	۵۴۰
۷	۵	۲۶	۵۵۰
۷	۵	۲۶	۵۶۰
۸	۵	۲۶	۵۷۰
۸	۵	۲۸	۵۸۰
۸	۵	۳۰	۵۹۰
۸	۵	۳۰	۶۰۰

NDNS: نسبت تعداد نقاط جبهه‌ی پارتویی برای هر الگوریتم حاصل از هم-افزایی تمام پاسخ‌های حاصل از حل الگوریتم‌های مختلف؛

QM: در ابتدا الگوریتم پیشنهادی چند بار به صورت مستقل اجرا می‌شود. سپس تمام پاسخ‌های به دست آمده به همراه جبهه‌ی سایر الگوریتم‌ها در یک مجموعه قرار می‌گیرد. حال درصدی از نقاط پارتویی که با جبهه‌ی الگوریتم مورد نظر منطبق هستند، به عنوان کیفیت جبهه‌ی آن الگوریتم استفاده می‌شود.

Max Spread (شاخص یکنواختی)، که یکنواختی توزیع جواب‌های پارتویی به دست آمده را در مرز جواب‌ها آزمایش می‌کند و به صورت رابطه‌ی ۴۲ تعریف می‌شود:

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

که در آن، d_i بیانگر فاصله‌ی اقلیدسی عضو i آم جبهه‌ی پارتویی تا مرز بهینه و d_{mean} بیانگر مقدار میانگین فواصل مذکور است. حال به تشریح نتایج حاصل از حل الگوریتم‌ها پرداخته شده است. اما لازم است که نتایج عددی بر روی مثال‌های عددی متنوع اعمال شوند. بدین منظور ۱۵۰ مثال عددی با داده‌های تصادفی و فرضی تولید و در دسته‌های ۳۰ تایی تقسیم شده‌اند، که در هر دسته نیز ابعاد مسئله بر حسب تعداد نقاط به مسائل با ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شده‌اند. همچنین هر دسته به ازاء تعداد هاب‌های بالقوه‌ی از پیش ثابت شده طراحی شده‌اند. برای مثال برای مطالعه‌ی بیشتر، ۳۰ مثال عددی با در نظر گرفتن ۵ هاب بالقوه در نظر گرفته شده‌اند. در واقع، در تمام ۳۰ مثال مذکور، تعداد هاب‌های بالقوه برابر با ۵ بوده و فقط تعداد نقاط تقاضا و پارامترهای ورودی تغییر یافته است (جدول ۶).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در هر یک از تحلیل‌های اخیر، تعداد نقاط تقاضا برای طراحی شبکه تغییر کرده است، اما تعداد هاب‌ها ثابت بوده است. مسائل ارائه شده به کمک الگوریتم پیشنهادی در ابعاد مختلف حل و نتایج به دست آمده‌ی هر یک از آن‌ها ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش ابعاد مسئله و ایجاد پاسخ‌های متفاوت که هر یک می‌توانند یکی از اعضاء جبهه‌ی پارتویی باشند، معیارهای DNS و ADNS نیز افزایش یافته‌اند. در واقع، با توجه به اینکه دو معیار اخیر مستقیماً به تعداد اعضاء جبهه‌ی پارتویی تولید شده وابسته هستند، با افزایش ابعاد مسئله، مقدار آن‌ها نیز افزایش یافته است. اما این نرخ رشد در الگوریتم گرگ خاکستری به مراتب بیشتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است. به عبارت دیگر، الگوریتم گرگ خاکستری توانایی بالاتری در یافتن پاسخ‌های پارتویی در مثال‌های مختلف داشته است. الگوریتم ژنتیک نیز کمترین مقدار نرخ رشد را داشته است، که حاکی از عدم توانایی کافی در تولید پاسخ‌های نهایی است. در مورد معیار کیفیت پاسخ (QM) نیز می‌توان تحلیلی مشابه ارائه کرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم گرگ خاکستری درصد‌های بالاتری را برای معیار اخیر نشان داده است؛ یعنی توانایی دارد که پاسخی تا حد زیادی مشابه به یکدیگر را در اجراهای مستقل تولید کند، و در نهایت درصد پاسخ‌های منطبق را افزایش دهد. از لحاظ زمان اجرا نیز این حالت توانایی یافتن پاسخ‌ها و همگراشدن به نتایج نهایی را در مدت زمان کمتری انجام می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که الگوریتم‌های ارائه شده کارایی مناسبی دارند؛ چرا که روند تفاوت در الگوریتم گرگ خاکستری و سایر الگوریتم‌ها منطقی است.

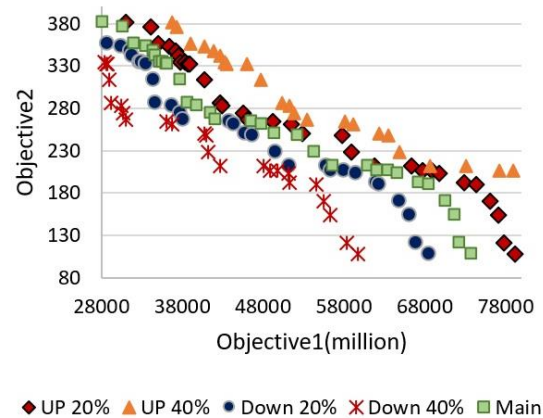
۶.۴. تحلیل حساسیت الگوریتم برتر

در بخش کنونی، به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار الگوریتم گرگ خاکستری که به عنوان الگوریتم برتر در تحلیل‌ها انتخاب شده است، تحلیل حساسیت لازم بر روی تغییر مقدار پارامتر تقاضا صورت پذیرفته است. لذا در بخش حاضر یک مثال عددی در ابعاد بزرگ‌تر با در نظر گرفتن ۵۰ هاب بالقوه و ۲۰۰ نقطه‌ی تقاضا در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه پیاده‌سازی نتایج مدل پیشنهادی پژوهش حاضر وابسته به رفتار متغیرهای تصمیم در مقابل تغییر برخی از پارامترهای مهم مانند هزینه‌ی احداث مراکز توزیع و مقدار جریان بین نقاط است؛ بنابراین، در اینجا از طریق تعریف مقادیر مختلف برای هر یک از پارامترها و بررسی تغییرات جبهه‌ی پارتویی برای هر یک از آن‌ها سعی شده است که تحلیل‌های مناسب ارائه شود. در واقع، 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 شده است. بدین منظور هر یک از پارامترهای مذکور در ۴ حالت مختلف در قالب سناریوهای عددی مقداردهی شده‌اند. سپس، رفتار مدل‌ها نسبت به تغییر هر یک از آن‌ها سنجیده شده است. جهت حل مدل، در ابتدا هزینه‌ی احداث تسهیلات در بازه‌ی ۱۰ تا ۲۰ میلیارد تومان در نظر گرفته شده است. میزان تقاضا نیز در بازه‌ی ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ به صورت یکنواخت و سایر پارامترهای ورودی به صورت تصادفی در بازه‌ی یکنواخت تولید شده‌اند. جهت تحلیل حساسیت، پارامترهای مذکور در سناریوهای موجود در جدول ۷ تغییر کرده‌اند.

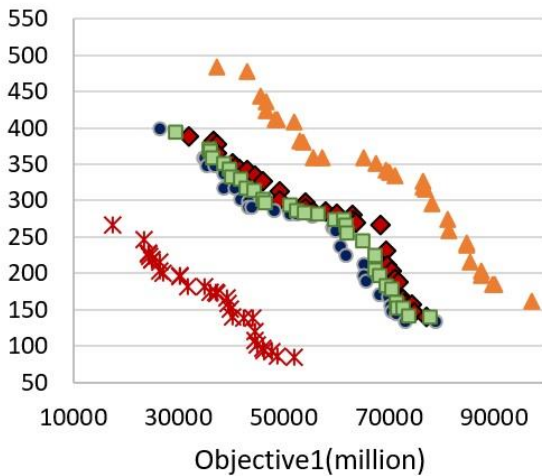
پس از حل مثال عددی بررسی شده، جبهه‌های پارتویی تولیدشده برای هر یک از پارامترهای هزینه‌ی احداث تسهیلات و انجام عملیات لجستیکی و تقاضا در شکل ۷ مشاهده می‌شوند.

جدول ۷. سطح تغییر پارامترهای هزینه‌ی احداث تسهیلات و تقاضای مشتریان.

سناریوی اول	سناریوی دوم	سناریوی سوم	سناریوی چهارم
۴۰٪ کاهش	۲۰٪ افزایش	۲۰٪ کاهش	۴۰٪ افزایش



شکل ۷. تغییرات جبهه‌ی پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف هزینه‌های احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی.



شکل ۸. تغییرات جبهه‌ی پارتویی در مقابل سناریوهای مختلف تقاضا.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییرات هزینه‌های مسئله، فقط مقدار تابع هدف اول دچار تغییر شده است. در حقیقت کاملاً مشهود است که حدود بالا و پایین جبهه‌ی پارتویی فقط برای تابع هدف اول دچار تغییر شده و حدود بالا و پایین جبهه‌ی دوم تغییر خاصی نداشته است؛ چرا که در نهایت مدل سعی کرده است احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی را به گونه‌ی در نظر بگیرد که کمترین تغییرات در تابع هدف زیست‌محیطی ایجاد شود. در واقع، در چنین شرایطی مدیران باید تمرکز خود را بر روی کاهش هزینه بگذارند و معیارهای زیست‌محیطی در اولویت بعدی قرار بگیرند. اما در تحلیلی دیگر، اگر سطح تقاضای مشتریان در شرایط مختلف آزمایش شود، رفتار مدل به صورت جبهه‌ی پارتویی در شکل ۸ مشاهده می‌شود.

کاملاً مشخص است که با تغییر مقادیر مختلف تقاضا، پاسخ‌های نهایی به شدت تحت تأثیر قرار گرفته و هر دو تابع هدف، مقادیر متفاوتی را تولید کرده‌اند. این موضوع اثر بسیار زیاد مدیریت تقاضا در حصول پاسخ‌های نهایی را نشان می‌دهد. در واقع، با تغییر تقاضا، هم سطح هزینه‌های سیستم و هم عناصر مرتبط با آثار زیست‌محیطی دچار تغییرات اساسی شده‌اند. بنابراین می‌توان به این جمع‌بندی رسید که توجه به تخمین سطح دقیق تقاضای مشتریان، اهمیتی به مراتب بیشتر نسبت به تخمین مقدار دقیق هزینه‌های احداث تسهیلات و عملیات لجستیکی از دیدگاه توسعه‌ی شبکه‌ی هاب لجستیکی پایدار دارد.

۵. نتیجه‌گیری

مسئله‌ی طراحی شبکه‌ی لجستیکی به عنوان یک مسئله‌ی بهینه‌سازی یک‌پارچه، در پژوهش حاضر بررسی شده است. ابتدا مدل ریاضی مسئله از طریق حل مورد مطالعاتی طراحی شبکه‌ی لجستیکی غرب کشور راستی‌آزمایی و نتایج عددی به صورت کامل تشریح شده است. سپس به تحلیل حساسیت مدل در ابعاد مختلف پرداخته شده است، که نشانگر عملکرد مناسب مدل است. پس از آن، مورد مطالعاتی دوم که طراحی شبکه‌ی لجستیکی ایران است، بررسی شده است تا بتوان پاسخ‌های نهایی در کل کشور را بررسی کرد. در پایان با توجه به اینکه روش‌های حل دقیق قادر به حل مسئله در ابعاد خیلی بزرگ نبودند، جهت حل مسئله در ابعاد خیلی بزرگ، روش حل فراابتکاری ژنتیک در ابتدا معرفی و سپس مثال‌هایی حل شده است. پس از

از نوع آزادراه بوده و عبارت‌اند از: همدان- سنندج، سنندج- پرویز خان، پرویز خان- خسروی، و خسروی- مهران. هزینه‌ی کل شبکه در سناریوی پنجم برابر با ۱۵.۷۳۸ میلیارد و ۹۹۳ میلیون تومان است.

• سناریوی ششم

در این حالت نیز سه مرکز لجستیکی در شهرهای ارومیه، سنندج، و همدان و سه هاب مرزی در مرزهای بازرگان، ترمچین، و باشماق احداث شده‌اند. ارتباط میان‌هایی بین زوج‌های بازرگان- ارومیه، ارومیه- ترمچین، ارومیه- باشماق، ترمچین- سنندج، و سنندج- مهران از نوع بزرگراه پیشنهاد شده است. تفاوت این سناریو با دیگر سناریوهای قبلی، تأثیر ضریب مطلوبیت به‌دست‌آمده از آزمایش لجستیکی منطقه به‌عنوان عامل کیفی در هزینه‌های احداث هاب و ارتباط بین‌هایی است. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت ۱۰.۲۲۴ میلیارد و ۸۲۲ میلیون تومان است.

• سناریوی هفتم

در این حالت با محاسبه‌ی هزینه‌ی ارتباط بین‌هایی به نحو دیگری، تأکید بیشتری بر بخش مکان‌یابی مسئله‌ی موردبررسی شده است. تعداد سه مرکز لجستیکی در شهرهای تبریز، سنندج، و همدان و سه هاب مرزی در مرزهای بازرگان، ترمچین، و مهران احداث شده است. همچنین ارتباط‌های بین‌هایی برقرار شده عبارت‌اند از: بازرگان- تبریز، بازرگان- همدان، بازرگان- سنندج، ترمچین- سنندج، و سنندج- مهران. هزینه‌ی شبکه‌ی لجستیک منطقه‌ی غرب ایران در این سناریو برابر با ۵.۴۳۲ میلیارد و ۷۴۷ میلیون تومان برآورد شده است.

• سناریوی هشتم

مطابق این سناریو، دو مرکز لجستیکی در شهرهای ارومیه و همدان و دو هاب مرزی در مرزهای ترمچین و پرویز خان جهت احداث پیشنهاد شده است. راه‌های ارتباطی بین شهرهای ارومیه- ترمچین، همدان- ترمچین، و ارومیه- پرویز خان از نوع بزرگراه و هزینه‌ی کل شبکه ۱۰.۳۹۹ میلیارد و ۸۴۷ میلیون تومان برآورد شده است.

در حل مورد مطالعاتی دوم، که کل کشور است، نیز می‌توان مشاهده کرد که شهرهای تهران، کرمانشاه، شیراز، و مشهد، که به‌عنوان هاب‌های لجستیکی کشور انتخاب شده‌اند، وظیفه‌ی پوشش سایر شهرها را به‌عهده دارند. برای مثال، شهرهای بیرجند، بجنورد، کرمان، و زاهدان به هاب مشهد تخصیص یافته‌اند. همچنین شهرهای همدان، قم، ساری، گرگان، رشت، زنجان، قزوین و سایر شهرهای اطراف تهران به هاب تهران تخصیص داده شده‌اند. نکته‌ی جالب توجه این است که هیچ ارتباط مستقیمی بین نقاط شبکه وجود نداشته و کلیه‌ی تقاضاها از طریق شبکه‌ی هاب تأمین شده‌اند. برای مطالعات آتی، استفاده از الگوریتم‌های حل دقیق، مانند شاخه و برش یا ابتکاری جهت به‌دست‌آوردن نتایج با قابلیت بالا و یا توسعه‌ی مدل به‌صورت برنامه‌ریزی دوسطحی و تعیین ساختار رهبر و پیرو پیشنهاد شده است.

بررسی مثال عددی طراحی‌شده و تحلیل نتایج، مشاهده شده است که پاسخ-های تولیدشده، ساختاری مناسب دارند. یکی از مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر، بررسی سناریوهای مختلف در حل مسئله برای طراحی شبکه‌ی لجستیکی بوده است.

• سناریوی اول

در این حالت شهرهای سنندج، تبریز، و همدان به‌عنوان مراکز لجستیکی و مرزهای بازرگان، ترمچین، و مهران به‌عنوان هاب‌های مرزی انتخاب شده‌اند. بزرگراه‌های پیشنهادی جهت احداث نیز عبارت‌اند از: همدان- مهران، مهران- سنندج، بازرگان- تبریز، تبریز- ترمچین (پیرانشهر)، و ترمچین- سنندج. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت برابر با ۷.۱۳۱ میلیارد و ۷۴۶ میلیون تومان است. در سناریوی اول، اهمیت لجستیک و خارجی برابر فرض شده است.

• سناریوی دوم

مشابه سناریوی اول، در این حالت نیز اهمیت هر دو نوع لجستیک یکسان بوده و هزینه‌ی احداث بزرگراه بین دو شهر به‌صورت کامل محاسبه شده است. در این حالت، شهرهای سنندج، همدان، و ایلام به‌عنوان مراکز لجستیکی و مرزهای پرویزخان، خسروی، و مهران به‌عنوان هاب‌های مرزی انتخاب شده‌اند. بزرگراه‌های پیشنهادی جهت احداث نیز عبارت‌اند از: سنندج- خسروی، پرویز خان (قصر شیرین)- خسروی، همدان- خسروی، ایلام، و ایلام- مهران. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت برابر با ۱۰.۴۶۰ میلیارد و ۹۲۸ میلیون تومان است.

• سناریوی سوم

تفاوت سناریوی سوم با دو مورد قبلی، احداث آزادراه در شبکه‌ی بین‌هایی برای تأکید بر اهمیت لجستیک پشتاز 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 باید احداث شوند. هزینه‌ی کل شبکه در این حالت، ۱۶.۷۴۵ میلیارد و ۷۹۹ میلیون تومان است.

• سناریوی چهارم

در این حالت سه مرکز لجستیکی در شهرهای تبریز، ارومیه، و همدان و دو هاب مرزی در مرزهای ترمچین و باشماق احداث شده‌اند. رویکرد سناریوی ذکرشده، بر توسعه‌ی حمل‌ونقل درون‌کشوری است. بزرگراه‌های احداثی تبریز- باشماق (مریوان)، ارومیه- ترمچین، ارومیه- باشماق، و ترمچین- همدان و هزینه‌ی کل شبکه‌ی طراحی‌شده ۱۰.۲۵۴ میلیارد و ۵۶۹ میلیون تومان است.

• سناریوی پنجم

سناریوی پنجم، رویکردی مخالف سناریوی چهارم داشته و تأکید بیشتری بر توسعه‌ی لجستیک ترانزیتی کشور از طریق منطقه‌ی غرب ایران شده است. دو مرکز لجستیکی در شهرهای سنندج و همدان و سه هاب مرزی در مناطق پرویزخان، خسروی، و مهران جهت احداث پیشنهاد شده‌اند. ارتباط بین‌هایی

منابع- References

- Hekmatfar, M. and Pishvae, M., 2009. Hub location problem. *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*, pp.243-270. https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2151-2_11
- O'Kelly, M.E., 1987. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, 32(3), pp.393-404. [https://doi.org/10.1016/S03772217\(87\)80007-3](https://doi.org/10.1016/S03772217(87)80007-3)
- Campbell, J.F., 1994. A survey of network hub location. *Studies in Locational Analysis Issue, 6*, pp.31-49. <https://doi.org/10.15807/jorsj.46.409>
- O'Kelly, M.E. and Miller, H.J., 1994. The hub network design problem: A review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, 2(1), pp.31-40. [https://doi.org/10.1016/0966-6923\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0966-6923(94)90032-9)
- Campbell, J. F., Ernst, A. T. and Krishnamoorthy, M. 2004. *Hub Location Problems*. In: Drezner, Z., Hamacher, H.W. (Eds.), *Facility Location: Applications and Theory*. Springer. https://www.researchgate.net/publication/319271133_Hub_location_problems
- Mokhtar, H., Krishnamoorthy, M. and Ernst, A.T., 2019. The 2-allocation p-hub median problem and a modified Benders decomposition method for solving hub location problems. *Computers & Operations Research*, 104, pp.375-393. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.09.006>
- Alumur, S.A., Campbell, J.F., Contreras, I., Kara, B.Y., Marianov, V. and O'Kelly, M.E., 2021. Perspectives on modeling hub location problems. *European Journal of Operational Research*, 291(1), pp.1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.09.039>
- Shahraki, M.R. and Shirvani, S., 2021. The Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem under Demand Uncertainty and Excess Capacity with Possibilistic Programming Approach. *Tehnicki glasnik*, 15(3), pp.330-338. <https://doi.org/10.31803/tg-20201208185701>
- Torkestani, S.S., Seyedhosseini, S.M., Makui, A. and 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, pp.39-86. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.05.027>
- Khodemani-Yazdi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Bashiri, M. and 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, pp.53-70. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.10.004>
- Shang, X., Yang, K., Wang, W., Wang, W., Zhang, H. and Celic, S., 2020. Stochastic hierarchical multimodal hub location problem for cargo delivery systems: Formulation and algorithm. *IEEE Access*, 8, pp.55076-55090. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981669>
- Alumur, S.A., Kara, B.Y. and Karasan, O.E., 2012. Multimodal hub location and hub network design. *Omega*, 40(6), pp.927-939. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2012.02.005>
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.A.M.T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), pp.182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M. and Lewis, A., 2014. Grey wolf optimizer. *Advances In Engineering Software*, 69, pp.46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Company, C. a. D. o. T. I., 2016. Retrieved from <http://www.cdtic.ir/>
- Shirvani, S., Shahraki, M. R. and 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. [In Persian].