

بسمه تعالی

موضوع:

معرفی یک مدل بهینه‌سازی در لجستیک

مربوط به درس حمل و نقل و لجستیک

استاد راهنما :

دکتر امیر محمد گل محمدی

ارائه دهندگان:

محمد حسین صدری

محمد مهدی سلیمانی نژاد

امیر رضا نمازدوست

تاریخ ارائه:

۱۴۰۴/۰۲/۲۹



عنوان مقاله: مساله مکان یابی هاب های چندوجهی سلسله
مراتبی برای شبکه های لجستیکی برون مرزی با در نظر
گرفتن سطوح ظرفیت چندگانه، ازدحام و اقتصاد مقیاس

The hierarchical multimodal hub location problem for cross-border
logistics networks considering multiple capacity levels, congestion
and economies of scale



چکیده



در طراحی این شبکه‌ها که شامل هاب‌ها و مدل‌های مختلف حمل و نقل می‌شوند، در نظر گرفتن صرفه‌جویی‌های مقیاسی در حمل و نقل چندوجهی و نیز مشکل ازدحام از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا هر دو عامل می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر مکان‌یابی هاب‌ها و اندازه آن‌ها داشته باشند. بنابراین، در این مقاله، ما این ویژگی‌ها را در چارچوب مسئله مکان‌یابی هاب‌های چندوجهی برای تجارت بین‌الملل که ساختار سلسله‌مراتبی شبکه را مد نظر قرار می‌دهد، مورد بررسی قرار می‌دهیم. با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های زیرساختی، عملیاتی و ازدحام توسعه داده شده است.

مقدمه

با رشد مداوم تجارت بین‌المللی، شبکه‌های لجستیکی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که هم اتصال بین مبدا، مقصد و هاب‌ها حفظ شود و هم هزینه‌ها کاهش یابد. به‌ویژه در کشورهایی مانند چین که مراکز تولید از بنادر فاصله دارند، استفاده از بنادر خشک برای حمل و نقل چندوجهی ضروری است.

مقاله به بررسی مسئله مکان‌یابی هاب‌های سلسله‌مراتبی می‌پردازد که در آن توازن بین صرفه‌جویی هزینه ناشی از تجمع بار و افزایش هزینه‌های ناشی از ازدحام در هاب‌ها مد نظر قرار می‌گیرد. مدل ارائه‌شده شامل تعیین مکان‌های بهینه و سطح ظرفیت هر هاب، طراحی اتصالات شبکه با به کارگیری سه مدل حمل (جاده، ریلی و دریایی) و امکان تخصیص چندگانه جریان به هاب‌های مختلف به منظور کاهش هزینه‌های زیرساختی، عملیاتی و ازدحام می‌باشد.

ساختار شبکه و چالش‌ها

شبکه شامل سه لایه هاب است که قوانین اتصال ویژه‌ای دارند؛ برای مثال، کالاهای صادراتی از طریق بنادر دریایی یا بندرهای داخلی مرزی به مقصد می‌رسند.

مدل به دو جنبه مهم تأکید دارد که باید به‌طور همزمان مدیریت شوند:

- صرفه‌جویی‌های ناشی از تجمیع بار
- هزینه‌های ناشی از ازدحام هاب‌ها

ویژگی های مدل

- ❑ گره های مبدا و مقصد در مناطق مختلف قرار دارند و برای هر کدام مکان های پیشنهادی جهت برپایی هاب ها همراه با سطوح ظرفیت تعیین شده اند.
- ❑ سه مدل حمل و نقل (جاده ای، ریلی، دریایی) مد نظر قرار می گیرند؛ هزینه واحد حمل به سطح تجمیع بار وابسته است.
- ❑ امکان تقسیم جریان از یک هاب به چندین هاب (multiple allocation) به مدل انعطاف می بخشد.



روش حل

- یک مدل MILP از طریق تکنیک‌های خطی‌سازی برای ساده‌سازی توابع هزینه غیرخطی توسعه داده شده است.

مدل MILP مخفف Mixed-Integer Linear Programming است، که نوعی مدل ریاضی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌باشد

- الگوریتم هیبریدی HAVNS با عملگرها و استراتژی‌های سرعت‌بخشی جهت حل نمونه‌های بزرگ به کار رفته است.

ترکیبی از الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر با رویکردهای تطبیقی و گاهی الگوریتم‌های دیگر مثل الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد.

نتایج و نوآوری ها

□ مطالعه موردی بر روی کریدور جدید زمینی-دریایی چین نشان می دهد که مدل ارائه شده به تصمیم گیرندگان این امکان را می دهد تا مکان یابی هاب ها، سطح ظرفیت و پیکربندی شبکه را بهینه کنند.

□ این پژوهش به صورت یکپارچه ابعاد سلسله مراتبی، انتقال چندوجهی، تحلیل ازدحام و صرفه جویی در مقیاس را در یک ساختار مدل ترکیب می کند.

مقایسه با مطالعات پیشین

- ترکیب چند بعد

تحقیقات قبلی عمدتاً روی یک یا دو جنبه مانند صرفه‌جویی در مقیاس یا ازدحام تمرکز داشته‌اند؛ برای مثال، اکثر آن‌ها از شبکه‌های تک اختصاصی یا تک مدل استفاده کرده‌اند. در مقابل، مقاله حاضر تمام عوامل (ساختار سلسله‌مراتبی، چند مدل حمل‌ونقل، اختصاص چندگانه، اثرات صرفه‌جویی در مقیاس و ازدحام) را به‌صورت یکپارچه مدلسازی می‌کند.

- تعیین ظرفیت هاب به عنوان متغیر تصمیم

مطالعات قبلی معمولاً ظرفیت هاب‌ها را ثابت در نظر می‌گرفتند، اما در این مقاله ظرفیت هاب‌ها به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده که مستقیماً بر هزینه‌های ازدحام و جریان‌ها تأثیر دارد.

مقایسه با مطالعات پیشین

- مدلسازی هزینه‌های مرتبط

مقاله حاضر از تقریب توابع خطی تکه‌ای برای مدلسازی صرفه‌جویی در مقیاس بهره می‌برد و همچنین از مدل‌های صف (مثلاً $M/M/1$) برای بهتر منعکس کردن هزینه‌های غیرخطی ناشی از ازدحام استفاده می‌کند؛ رویکردی که در بسیاری از مدل‌های پیشین به‌طور کامل اعمال نشده است.

- رویکرد چند مدل حمل و نقل و شبکه‌های پیچیده

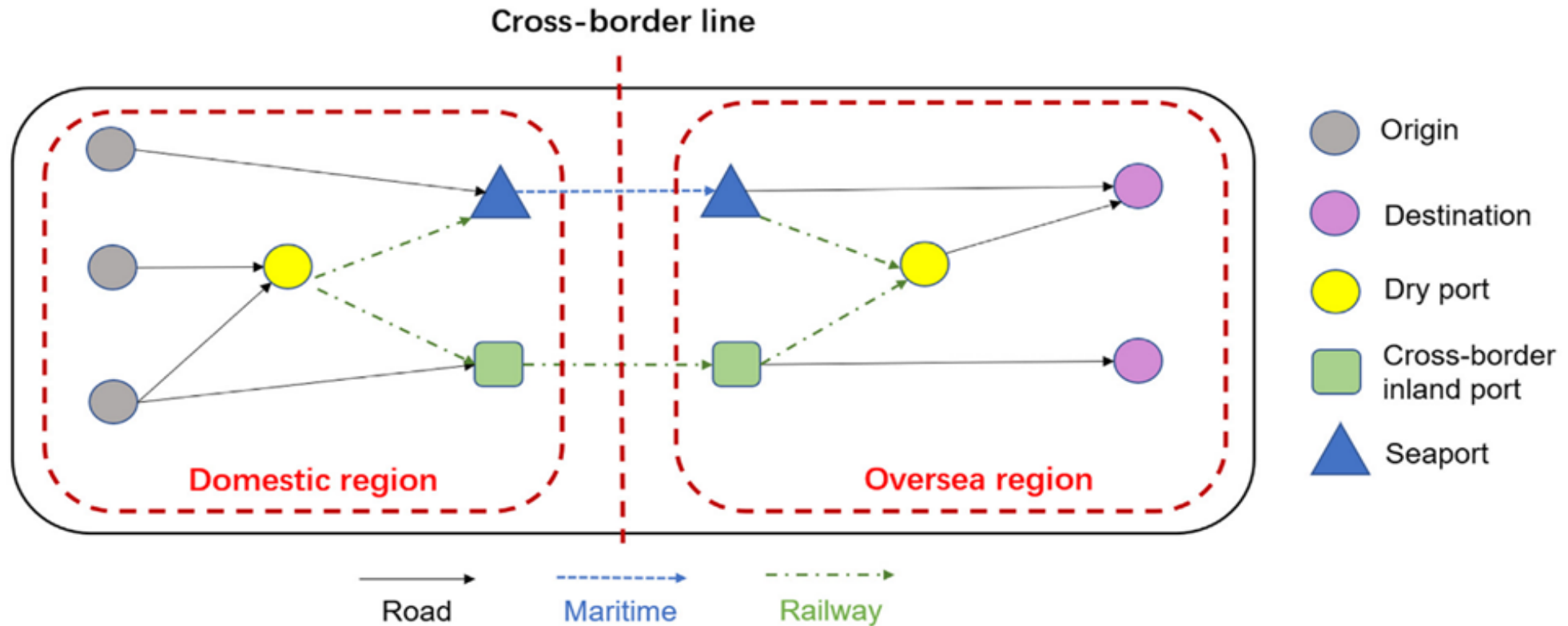
در حالی که پژوهش‌های گذشته غالباً روی شبکه‌های ساده با یک مدل تمرکز داشتند، این مقاله سه مدل حمل و نقل (جاده‌ای، ریلی و دریایی) را بررسی کرده و پیچیدگی‌های ناشی از ارتباط چندگانه هاب‌ها را در یک ساختار سلسله‌مراتبی مدلسازی می‌کند

مقایسه با مطالعات پیشین

به طور خلاصه، در مقابل تحقیقات پیشین که به صورت مجزا یا ساده تر به ابعاد مختلف پرداخته اند، مقاله حاضر با یکپارچه سازی تمام این جنبه های کلیدی، فضای مدلسازی را دقیق تر و کاربردی تر در محیط های لجستیکی بین المللی ارائه می دهد.



شرح مساله و مدل سازی



شکل ۱. فرآیند حمل و نقل صادراتی شبکه بین المللی حمل و نقل کانتینری چند وجهی

شرح مساله و مدل سازی

- **نقاط خاکستری:** مثل نقطه شروع یا خانه‌ی اصلی هستند. این‌ها نشان می‌دهند که کالا از اینجا حرکت را شروع می‌کند.
- **نقاط زرد:** مثل مکان‌های خاصی هستند که کالاها ابتدا به آنجا می‌روند؛ مثل یک ایستگاه مهم.
- **نقاط آبی:** این نقاط نشان‌دهنده بندرهای دریایی هستند، جایی که کالا از طریق دریا منتقل می‌شود.
- **نقاط سبز:** این نقاط مربوط به مکان‌های مرزی هستند؛ یعنی جایی که کالا از یک کشور به کشور دیگر می‌رود.
- **مقاصد:** همان جایی هستند که کالا باید برسد، یعنی مقصد نهایی.
- **تقسیم‌بندی داخل و خارج:** در نقشه یک خط یا مرز وجود دارد که داخل کشور و خارج کشور رو از هم جدا می‌کند.
- **مسیرها:** خطوط روی نقشه نشان می‌دهد که کالا چگونه از نقطه‌ی شروع به هاب‌ها (مکان‌های واسطه) حرکت می‌کند و در نهایت به مقصد می‌رسد.



مجموعه ها

N : مجموعه تمامی گره‌های شبکه.

O : مجموعه گره‌های مبدا.

D : مجموعه گره‌های مقصد.

H : مجموعه هاب‌های پیشنهادی.

K : مجموعه کالاها عبوری از مبدا O به مقصد D .

A_{ODP} : مجموعه قوس‌های مسیر مبدا به بنادر خشک.

A_{OCB} : مجموعه قوس‌های مسیر مبدا به مراکز کراس‌بردر.

A_{OSP} : مجموعه قوس‌های مسیر مبدا به بنادر دریایی.



پارامترها

- f_u^h : هزینه ثابت تأسیس هاب در مکان u
- f_{uv}^a : هزینه فعال سازی (راه اندازی) مسیر بین u و v
- c_{uv} : هزینه واحد حمل کالا از u به v
- w_k : وزن کالای عبوری از جفت مبدا مقصد k
- l_{uv}^p : طول یا فاصله مسیر جزئی p بین هاب های u و v
- b_{uv}^p : هزینه ثابت اضافی مربوط به انتخاب مسیر جزئی p بین هاب های u و v



پارامترها

θ_1 : ضریب هزینه تغییر مدل حمل و نقل بین جاده و ریلی

θ_2 : ضریب هزینه تغییر مدل حمل و نقل بین جاده و دریایی

θ_3 : ضریب هزینه تغییر مدل حمل و نقل بین ریلی و دریایی

ψ_u : ضریب تنظیم‌کننده هزینه‌های ازدحام برای هاب u

c_u^q : ظرفیت هاب u در حالت انتخاب ظرفیت q

m_{uq}^r : شیب تابع هزینه قطعه‌ای برای هاب u در گزینه ظرفیت q (تکه r)

e_{uq}^r : مقدار پایه تابع هزینه قطعه‌ای برای هاب u در گزینه ظرفیت q (تکه r)



متغیرهای تصمیم‌گیری

- y_q^a : متغیر باینری؛ نشان می‌دهد هاب h با ظرفیت q تاسیس شده است یا خیر
- x_{uv} : متغیر باینری؛ تعیین می‌کند مسیر بین u و v فعال است یا خیر.
- f_{uv}^k : میزان جریان کالا k در مسیر اصلی بین u و v .
- f_{uvp}^k : میزان جریان کالا k از هاب u به v از طریق گزینه مسیر جزئی p
- z_{uv}^p : متغیر باینری؛ نشان می‌دهد آیا مسیر جزئی p برای انتقال کالا بین u و v انتخاب شده است یا خیر
- ω_u : هزینه هزینه ازدحام در هاب h .
- g_u : u مجموع جریان‌های ورودی به هاب.



$$\omega_u = \psi_u \frac{g_u}{\sum_{q \in Q} C_u^q y_u^q - g_u + \varepsilon} \quad (1)$$

Finally, we formulate the problem as a mixed-integer nonlinear programming as follows:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{u \in H} \sum_{q \in Q} y_u^q F_{uq}^h + \sum_{u \in N} \sum_{v \in N} x_{uv} F_{uv}^a + \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in A_{ODP} \cup A_{OCB} \cup A_{OSP}, u \neq v} W_k f_{uv}^k c_{uv} \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{u \in H} \sum_{v \in H, u \neq v} \sum_{p \in P} c_{uv} (W_k f_{uvp}^k l_{uv}^p + b_{uv}^p z_{uv}^p) + \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in A_{ODP} \cup A_{OCB} \cup A_{OSP}, u \neq v} W_k f_{uv}^k c_{uv} \\ & + \theta_1 \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in A_{ODP} \cup A_{OCB}, u \neq v} W_k f_{uv}^k + \theta_2 \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in A_{OSP}, u \neq v} W_k f_{uv}^k + \\ & \theta_3 \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in A_{DPS}, u \neq v} W_k f_{uvp}^k + \sum_{u \in H} \omega_u \end{aligned} \quad (2)$$

Subject to:

$$\sum_{q \in Q} y_u^q \leq 1 \quad \forall u \in H \quad (3)$$

$$\sum_{v \in H} f_{uv}^k - \sum_{v \in H} f_{vu}^k = 1 \quad \forall k \in K, u \in O \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{v \in H} f_{uvp}^k + \sum_{v \in N} f_{uv}^k = \sum_{p \in P} \sum_{v \in H} f_{vup}^k + \sum_{v \in N} f_{vu}^k \quad \forall k \in K, u \in H \quad (5)$$

$$\sum_{v \in H} f_{uv}^k - \sum_{v \in H} f_{vu}^k = -1 \quad \forall k \in K, u \in D \quad (6)$$

$$f_{uv}^k \leq x_{uv} \quad \forall k \in K, (u, v) \in A_{ODP} \cup A_{OCB} \cup A_{OSP}, u \neq v \quad (7)$$

$$x_{uv} \leq \sum_{q \in Q} y_u^q \quad \forall u \in H, v \in N, u \neq v \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P} z_{uv}^p \leq x_{uv} \quad \forall u, v \in H, u \neq v \quad (9)$$

$$f_{uvp}^k \leq z_{uv}^p \quad \forall k \in K, p \in P, (u, v) \in H, u \neq v \quad (10)$$

$$g_u = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{v \in H} f_{uvp}^k W_k + \sum_{k \in K} \sum_{v \in OUD} f_{uv}^k W_k \quad \forall u \in H \quad (11)$$



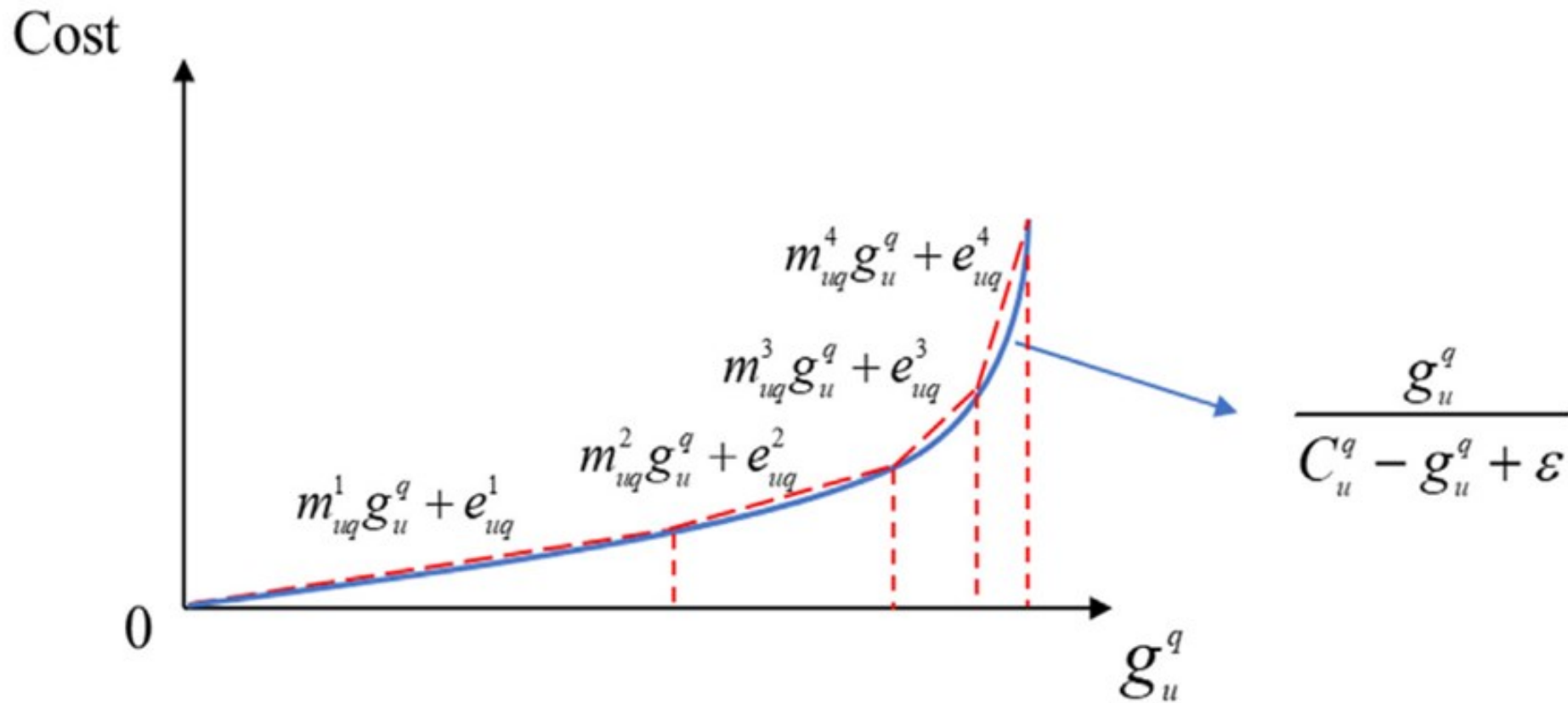


Fig. 2. An illustration of the piecewise linear approximation of congestion cost.

$$g_u \leq \sum_{q \in Q} y_u^q C_u^q \quad \forall u \in H \quad (12)$$

$$y_u^q \in \{0, 1\} \quad \forall u \in H, q \in Q \quad (13)$$

$$x_{uv} \in \{0, 1\} \quad \forall u, v \in N, u \neq v \quad (14)$$

$$z_{uv}^p \in \{0, 1\} \quad \forall u, v \in N, u \neq v, p \in P \quad (15)$$

$$f_{uvp}^k \geq 0 \quad \forall k \in K, p \in P, u, v \in H, u \neq v \quad (16)$$

$$f_{uv}^k \geq 0 \quad \forall k \in K, (u, v) \in A_{ODP} \cup A_{OCB} \cup A_{OSP}, u \neq v \quad (17)$$

$$g_u \geq 0 \quad \forall u \in H \quad (18)$$

$$\sum_{u \in H} \omega_u = \sum_{u \in H} \sum_{q \in Q} \psi_u \frac{g_u^q}{C_u^q - g_u^q + \epsilon} \quad (19)$$

We also update constraints (11), (12), and (18) with the following ones:

$$\sum_{q \in Q} g_u^q = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{v \in H} f_{uvp}^k W_k + \sum_{k \in K} \sum_{v \in O \cup D} f_{uv}^k W_k \quad \forall u \in H \quad (20)$$

$$g_u^q \leq y_u^q C_u^q \quad \forall u \in H, q \in Q \quad (21)$$

$$g_u^q \geq 0 \quad \forall u \in H \quad (22)$$

take the value of the largest output of any segment, the cost is given by:

$$\psi_u \max(m_{uq}^r g_u^q + e_{uq}^r) \quad (23)$$

Thus, the linear congestion cost term ω_u at hub u can be expressed as:

$$\min\{\omega_u : \omega_u \geq \psi_u(m_{uq}^r g_u^q + e_{uq}^r), \forall q \in Q, r \in R\} \quad (24)$$

Finally, the total congestion cost term $\sum_{u \in H} \omega_u$ can be calculated by incorporating the following constraints:

$$\omega_u \geq \psi_u(m_{uq}^r g_u^q + e_{uq}^r), \forall u \in H, q \in Q, r \in R \quad (25)$$

بررسی پاسخ بهینه دریافتی از الگوریتم در حالت های
مختلف بکارگیری عملگرهای پنجگانه

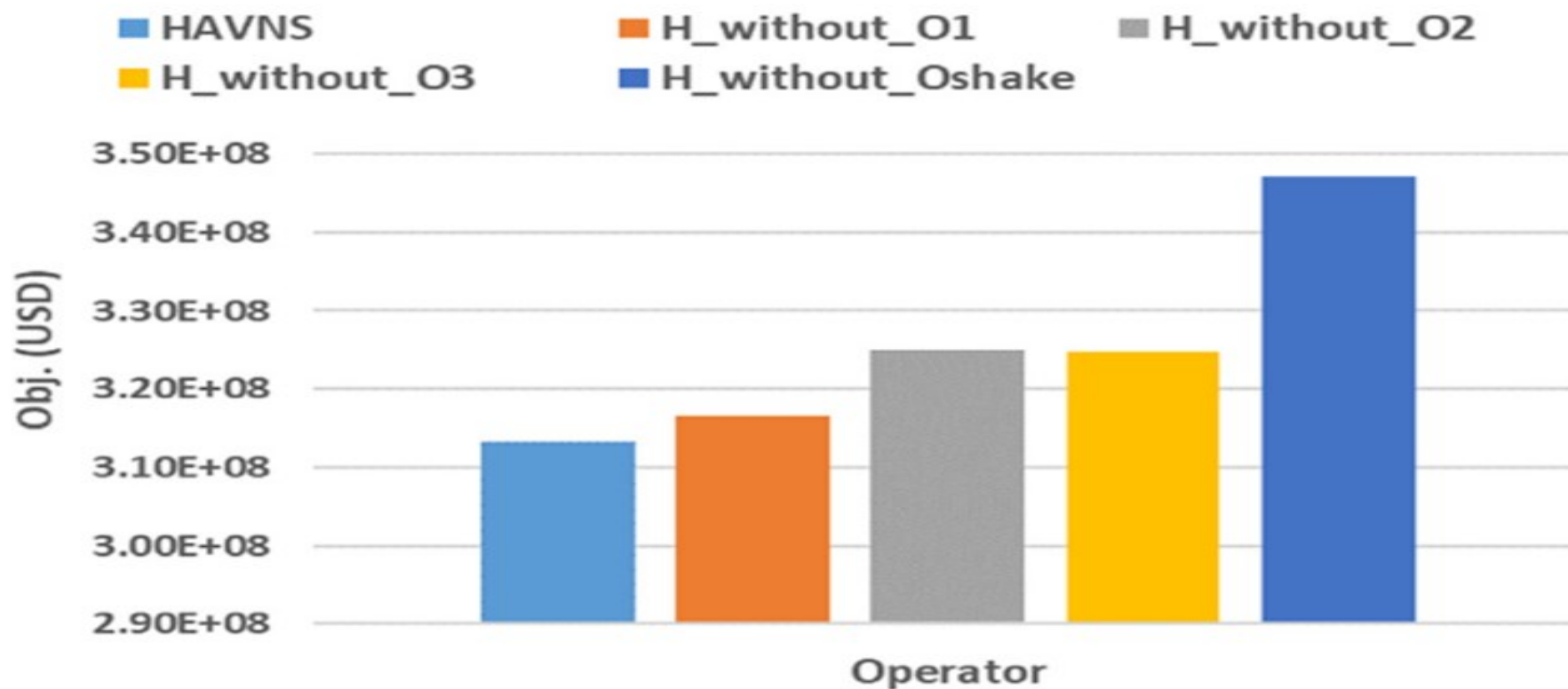
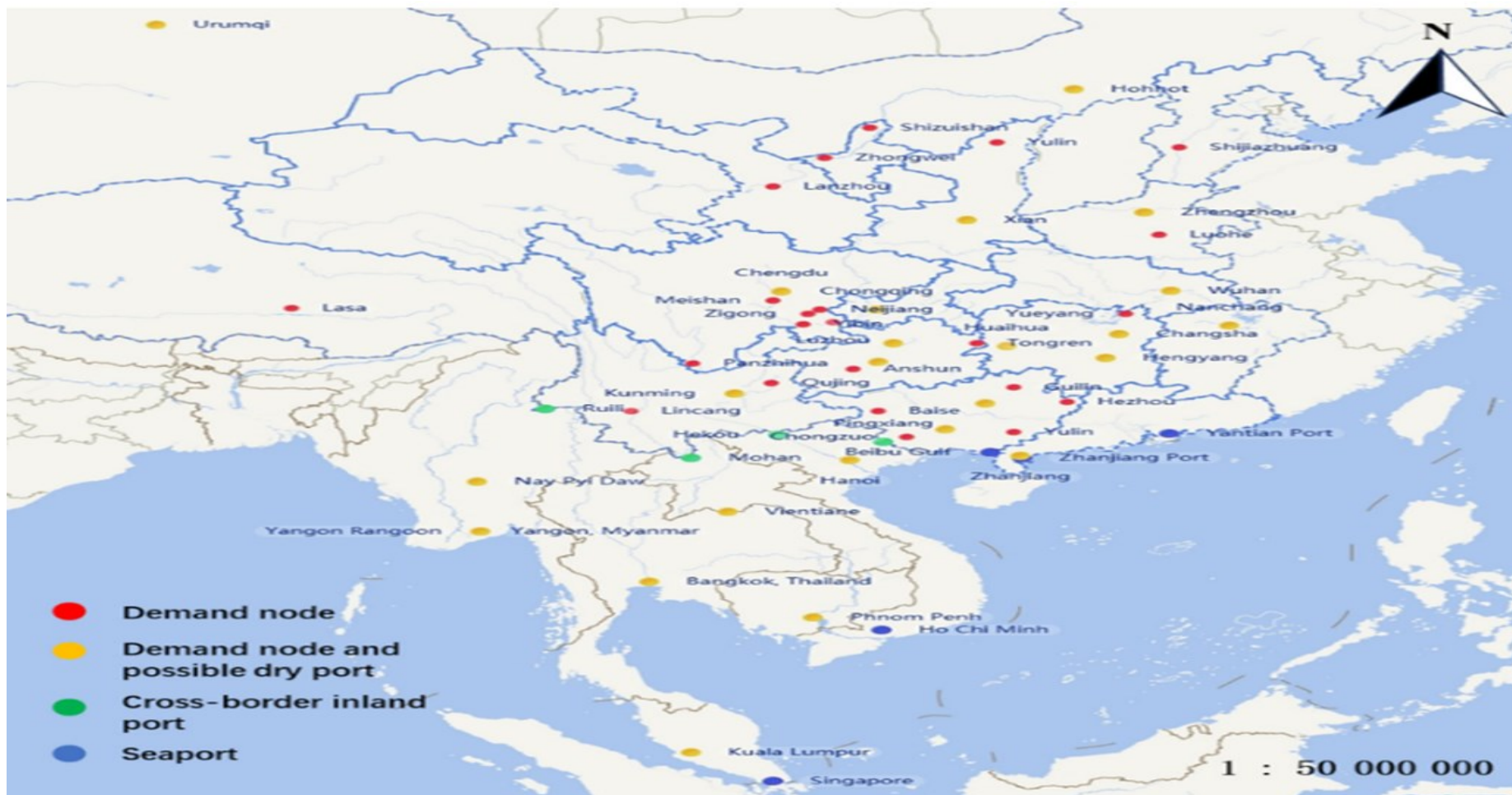


Fig. 10. The performance comparison of operators in S7.

توزیع گره های لجستیک در کریدور جدید زمینی - دریایی غرب



آزمایش های نمونه های واقعی

- برای نشان دادن کاربرد مدل و الگوریتم، ما یک مطالعه موردی در دنیای واقعی در مورد یک مرز متقاطع پیشنهاد می کنیم.
- شبکه لجستیک حمل و نقل چند وجهی در کریدور جدید زمینی - دریایی در چین.
- سپس، نتایج و تحلیل حساسیت مورد بحث قرار می گیرند.
- چین به تازگی طرحی را برای ساخت کریدور زمینی - دریایی غربی به منظور ارائه خدمات حمل و نقل سریع تر بین مناطق داخلی غربی چین و اطراف منطقه آسه آن.
- شبکه لجستیک حمل و نقل چند وجهی فرامرزی شامل گره هایی در چین و گره هایی در منطقه ASEAN ما گره های کاندید را انتخاب می کنیم.
- از جمله گره های O / D، پورت های خشک، داخلی فرا مرزی.



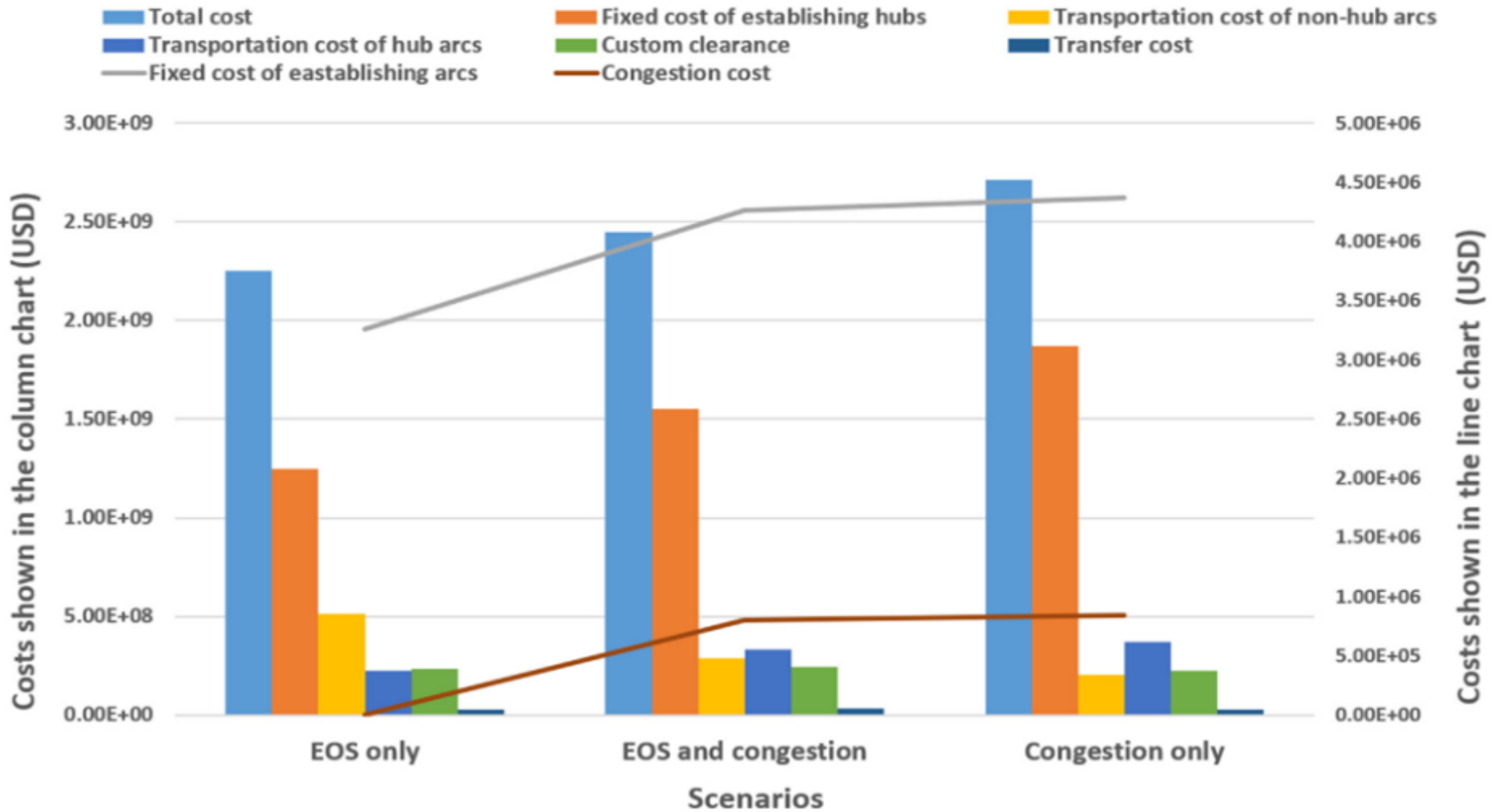


Fig. 12. The changes in the cost components under three different scenarios.



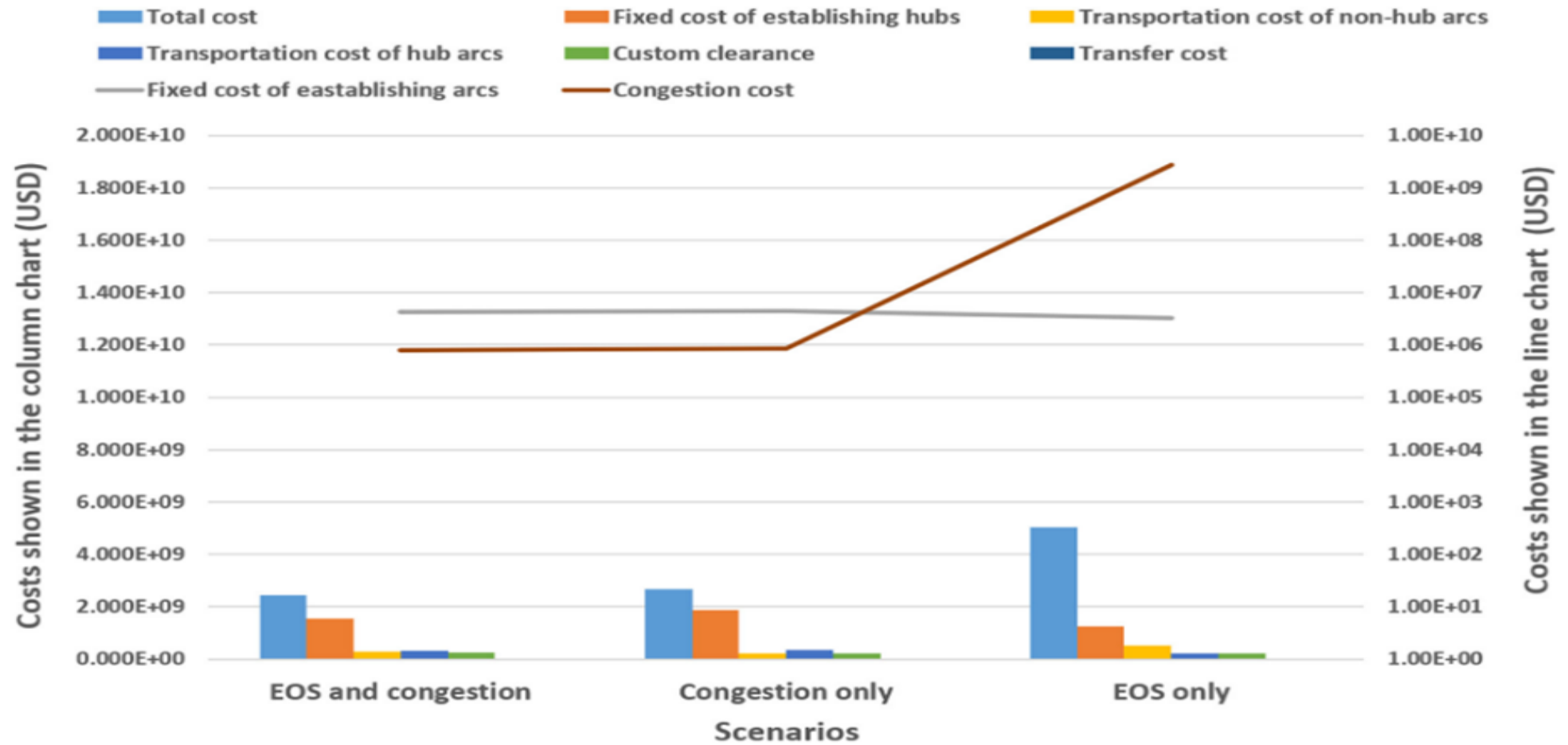


Fig. 13. The changes in the cost components under three different scenarios when further considering EOS and Congestion in the congestion-only and EOS-only solutions, respectively. (The vertical axis on the right is converted to a logarithmic scale.)



In this appendix, we present the results of the sensitivity analysis.

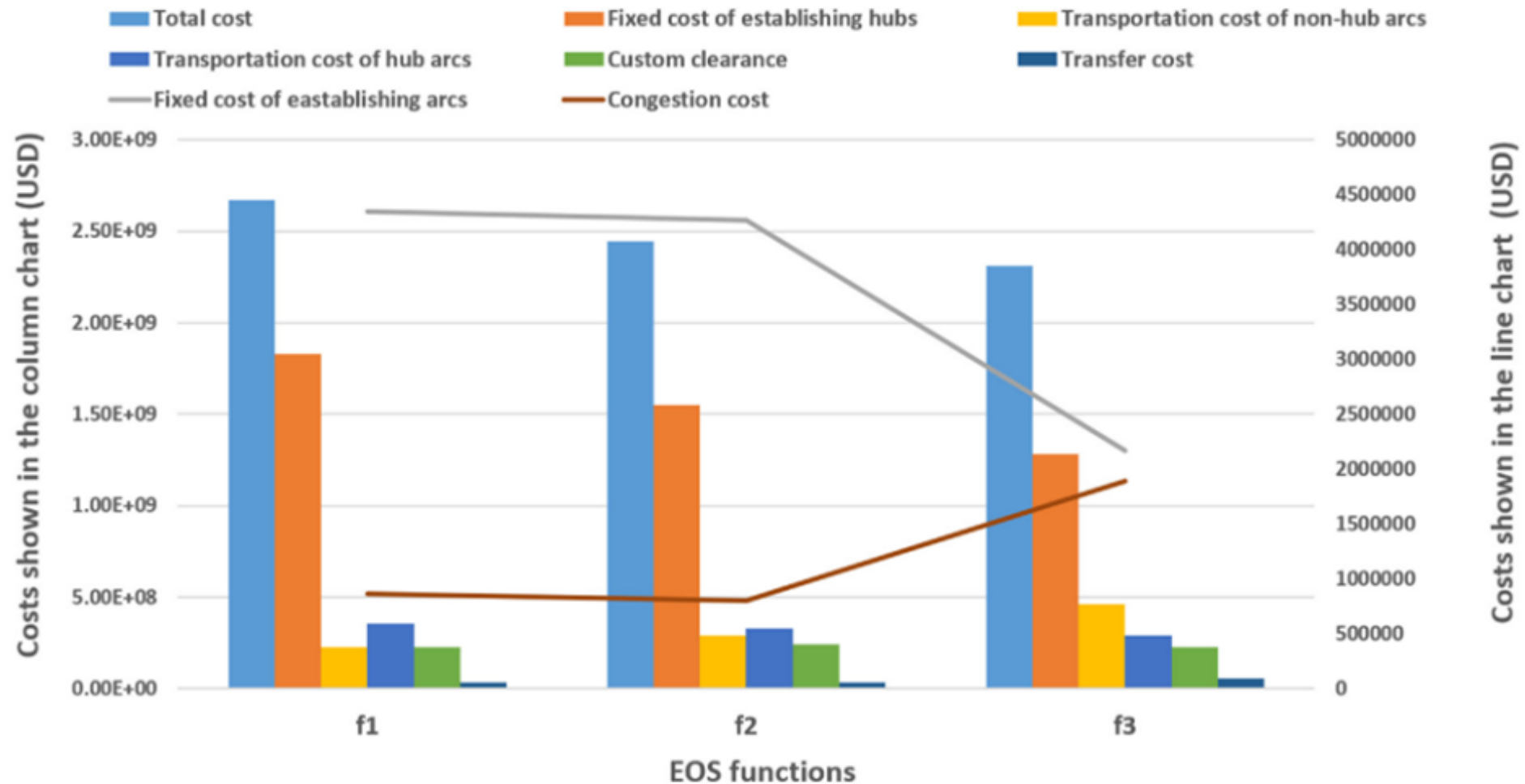


Fig. C.1. The changes in the cost components under different EOS functions.



پیامدهای مدیریتی

❑ ترکیب صرفه‌جویی در مقیاس و ازدحام: تلفیق این دو اثر لازم و مفید است؛ به طوری که با تجمع جریان‌ها (در سرویس‌های با ظرفیت بالا مانند ریلی و دریایی) هزینه‌ها کاهش یابد و همزمان نقاط ازدحام شناسایی و کنترل شوند.

❑ مکان‌یابی هاب‌ها: انتخاب هاب‌ها به ویژه بنادر خشک در مرز چین باید بر اساس موقعیت جغرافیایی و حجم تقاضا انجام شود؛ هاب‌های نزدیک به مناطق پرتقاضا در اولویت هستند.



پیامدهای مدیریتی

□ **توسعه شبکه:** در شرایط افزایش هزینه‌های ازدحام، می‌توان با افزایش تعداد یا ظرفیت هاب‌های کلیدی (مانند بندرهای دریایی) گلوگاه‌ها را برطرف کرد.

□ **تنظیم ظرفیت و تخصیص چندگانه:** استفاده از استراتژی تخصیص چندگانه باعث انعطاف‌پذیری و گسترش پوشش خدمات می‌شود؛ در شبکه‌های با EOS قوی، تعداد هاب‌ها کاهش یافته و ظرفیت‌ها افزایش می‌یابد.



نتیجه گیری و جهت گیری های پژوهشی

- مدل جامع HMHLP-C-EOS، با تلفیق ظرفیت‌دهی هاب‌ها، صرفه‌جویی در مقیاس وابسته به جریان و ازدحام، مسئله را به واقع‌بینی نزدیک می‌کند.
- جهت‌های پژوهشی آتی شامل بررسی عدم قطعیت تقاضا و هزینه‌ها، مدلسازی چند دوره‌ای و استفاده از چارچوب برنامه‌ریزی دو سطحی جهت تحلیل تعامل ذینفعان است.
- الگوریتم هیبریدی HAVNS عملکرد مناسبی در حل نمونه‌های بزرگ ارائه می‌دهد.
- نتایج عددی مبتنی بر مطالعه موردی کریدور جدید زمینی-دریایی چین، کاربرد مدل و بینش‌های مدیریتی لازم برای بهبود شبکه‌های لجستیکی را نشان می‌دهد.



با تشکر از توجه شما