

Proposing a Multi-objective Model for Ground Transportation of Hazardous Materials in the Hub Network (Case Study: National Iranian Oil Products Distribution Company)

Mohammadreza Mehregan

Prof. of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mehregan@ut.ac.ir

Ahmad Jafarnejad

Prof. of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: jafarnjd@ut.ac.ir

Milad Mohammadi

*Corresponding author, MA. of Industrial Management, Faculty of Management, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: mohammadi.milad@ut.ac.ir

Abstract

Objective: The purpose of this study is to provide a multi-objective model for ground transportation of hazardous materials in the hub network that tries to minimize the costs of transportation and construction of the hubs and the links, considering the existing risk in the hazardous materials transportation.

Methods: The problem with the proposed Hub Location model will be solved using the real data of National Iranian Oil Products Distribution Company and applying the Global Criterion Method. Then the sensitivity analysis of the model's results on some parameters is performed.

Results: Considering the results of the model for 10 hubs, Chaharmahal and Bakhtiari was chosen as the new hub location. The supply of oil products to each of the areas was also provided.

Conclusion: Hazardous materials as raw materials or strategic products in different industries play an important role in the industrial development of the country. Transportation of hazardous materials is very important due to their perilous nature and consequences. On the other hand, the proper design of a transportation network and optimal distribution of the products from production sources to consumers can reduce the costs of production and result in the optimum consumption of energy.

Keywords: Hazardous materials transportation, Hub location problem, Mathematical modeling, National Iranian oil products distribution company, Risk.

Citation: Mehregan, M., Jafarnejad, A., Mohammadi, M. (2018). Proposing a Multi-objective Model for Ground Transportation of Hazardous Materials in the Hub Network (Case Study: National Iranian Oil Products Distribution Company). *Industrial Management Journal*, 10(2), 201-220. (in Persian)

Industrial Management Journal, 2018, Vol. 10, No.2, pp. 201-220

DOI: 10.22059/imj.2018.205732.100704

Received: April 28, 2016; Accepted: March 1, 2018

© Faculty of Management, University of Tehran

ارائه مدل چندهدفه برای حمل و نقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب (مطالعه موردی: شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی)

محمد رضا مهرگان

استاد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mehregan@ut.ac.ir

احمد جعفرنژاد

استاد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: jafarnjd@ut.ac.ir

میلاذ محمدی

* نویسنده مسئول، کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohammadi.milad@alumni.ut.ac.ir

چکیده

هدف: هدف از این پژوهش، ارائه مدلی چندهدفه برای حمل و نقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب برای به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل و هزینه‌های احداث هاب و لینک با در نظر گرفتن ریسک موجود در حمل و نقل مواد خطرناک است.

روش: با استفاده از داده‌های واقعی شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی، مدل مکان‌یابی هاب ارائه شده در این پژوهش با روش معیار جامع حل شد و تحلیل حساسیت جواب‌های مدل روی برخی از پارامترها انجام گرفت.

یافته‌ها: با توجه به نتایج حل مدل با ۱۰ عدد هاب، منطقه چهار محال و بختیاری به‌عنوان هاب جدید انتخاب شد. نحوه تأمین فراورده نفتی هر یک از مناطق نیز ارائه شده است.

نتیجه‌گیری: مواد خطرناک که ماده اولیه یا محصول استراتژیک در صنایع گوناگون محسوب می‌شوند، نقش مهمی در توسعه صنعتی کشور ایفا می‌کنند. حمل و نقل مواد خطرناک با توجه به ماهیت خطرآفرین و تبعات آن از اهمیت خاصی برخوردار است. از سوی دیگر، طراحی صحیح شبکه حمل و نقل و توزیع بهینه فراورده‌ها از منابع تولید به مصرف‌کنندگان می‌تواند موجب کاهش هزینه تولید و در نتیجه مصرف بهینه انرژی شود.

کلیدواژه‌ها: حمل و نقل مواد خطرناک، ریسک، شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی، مدل‌سازی ریاضی، مسئله مکان‌یابی هاب.

استناد: مهرگان، محمد رضا؛ جعفرنژاد، احمد؛ محمدی، میلاذ (۱۳۹۷). ارائه مدل چندهدفه برای حمل و نقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب (مطالعه موردی: شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی). *فصلنامه مدیریت صنعتی*، ۱۰(۲)، ۲۰۱-۲۲۰.

فصلنامه مدیریت صنعتی، ۱۳۹۷، دوره ۱۰، شماره ۲، صص. ۲۰۱-۲۲۰

DOI: 10.22059/imj.2018.205732.1007047

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۱۰

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

مقدمه

روزانه میلیون‌ها تن کالا در راه‌های سراسر دنیا جابه‌جا می‌شود که بخشی از این محموله‌ها را مواد خطرناک تشکیل می‌دهند. جابه‌جایی مواد خطرناک همواره با نگرانی‌هایی در خصوص آسیب‌های احتمالی وارده به انسان‌ها و محیط زیست انجام می‌شود (ارکوت و گزارا، ۲۰۰۸). امروزه هزاران نوع مختلف مواد خطرناک وجود دارد. تقریباً در اکثر موارد، محل تولید و مصرف مواد خطرناک یکی نیست و این مواد باید از جایی به جایی دیگر حمل شوند (هونگ می، لین، ژیولینگ و هوپانگ، ۲۰۱۱). از طرفی، امروزه تصادفات جاده‌ای به یکی از معضلات اساسی کارشناسان حمل‌ونقل تبدیل شده است. در حمل‌ونقل مواد خطرناک به‌طور عمده از وسایل نقلیه سنگین یا نیمه‌سنگین (کامیون‌ها، تانکرها) استفاده می‌شود. این وسایل احتمال وقوع تصادف را بالا برده و در صورت بروز حادثه معمولاً خسارات سنگین‌تری را نیز به دنبال دارند (آیتی، قدیریان و احدی، ۱۳۸۷).

از سوی دیگر، ارائه خدمات حمل‌ونقل به قیمت ارزان منافع متعددی در توسعه روزافزون کشور دارد. طراحی صحیح شبکه حمل‌ونقل و توزیع بهینه فراورده‌ها از منابع تولید به مصرف‌کنندگان می‌تواند باعث کاهش هزینه تولید و در نتیجه مصرف بهینه انرژی شود (فریبرز، میربهاء و ابوالحسن‌نژاد، ۱۳۸۵: ۷۳). برای این منظور، بسیاری از محققان و سیاست‌گذاران، به مسئله مکان‌یابی هاب در دهه گذشته توجه کرده‌اند. در شبکه‌های توزیع هاب، به جای ارتباط مستقیم بین هر جفت مبدأ و مقصد، جریان‌ها از یک مبدأ با مقاصد متفاوت در هاب‌ها جمع می‌شوند و با جریان‌هایی که دارای مقصد یکسان هستند و از مبدأهای دیگری رسیده‌اند، ترکیب شده و ارسال می‌شوند (کانتریراس، فرناندز و مارین، ۲۰۱۰). به‌طور کلی هدف عمده این تحقیق، به‌کارگیری مدل ریاضی چندهدفه‌ای است که سعی در به حداقل رساندن هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های احداث هاب و لینک با در نظر گرفتن ریسک موجود در حمل‌ونقل مواد خطرناک دارد. این پژوهش به‌دلیل مدل‌سازی، فاقد فرضیه است اما پرسش‌های پژوهش به شرح زیر هستند: ۱. مکان‌هایی که به‌عنوان هاب برای حمل مواد خطرناک انتخاب می‌شوند، کدام‌اند؟ ۲. نحوه تخصیص مناسب مواد خطرناک به مناطقی که به‌عنوان هاب انتخاب نمی‌شوند، چگونه است؟ و ۳. چگونه با یک مدل چندهدفه امکان کاهش هزینه‌ها و ریسک حمل وجود دارد؟

پیشینه پژوهش

در سال ۱۹۳۹ کانترویچ درباره مسئله حمل‌ونقل مطالعه کرد. در سال ۱۹۴۱ هیچکاک فرمول‌بندی ریاضی‌ای را ارائه کرد که در حال حاضر به‌طور استاندارد استفاده می‌شود و به مسئله هیچکاک موسوم است (مهرگان، ۱۳۸۶: ۲۴۵). تقریباً از سال ۱۹۸۰ محققان نیز به حمل‌ونقل مواد خطرناک توجه کردند. در زمینه حمل‌ونقل مواد خطرناک و مسئله مکان‌یابی هاب به‌صورت جداگانه، پژوهش‌ها و مطالعات متعددی انجام شده است، اما تاکنون این دو در کنار هم بررسی نشده‌اند. یکی از جنبه‌های نوآوری این تحقیق، استفاده از مسئله مکان‌یابی هاب برای حمل‌ونقل مواد خطرناک است. در این بخش به برخی از تحقیقات انجام‌شده در این زمینه‌ها پرداخته می‌شود.

حمل و نقل مواد خطرناک

تحلیل ریسک، مکان‌یابی تسهیلات، مسیریابی و زمان‌بندی از جمله موضوعات اساسی در حمل و نقل مواد خطرناک هستند (ارکوت، تجاندر و ورتتر، ۲۰۰۷). در این پژوهش، به مباحث تحلیل ریسک و مکان‌یابی تسهیلات توجه شده است. به‌منظور مکان‌یابی تسهیلات، از مسئله مکان‌یابی هاب استفاده خواهد شد. در حمل و نقل مواد خطرناک، ریسک به‌صورت حاصل ضرب احتمال وقوع حادثه در شدت پیامدهای ناشی از آن به جمعیت در معرض خطر در نتیجه یک حادثه ناخوشایند در مواد خطرناک تعریف می‌شود (رمدونک، ماچاریس و میرس، ۲۰۱۳). کازانتزی و همکاران (۲۰۱۱) برای توسعه مدل حمل و نقل مواد خطرناک، چارچوبی سیستماتیک ارائه کردند. آنها به‌عنوان ابزاری جامع و ساده برای ارزیابی داده‌های موثر بر رفتار ریسک در سیستم حمل و نقل، از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کردند (کازانتزی، کازانتزیس و گروگانیس، ۲۰۱۱).

سمنلی اقلو (۲۰۱۳) مدل ریاضی چندهدفه‌ای برای مسئله مکان‌یابی - مسیریابی مواد خطرناک ارائه داد که در آن هزینه حمل مواد خطرناک، هزینه ثابت احداث مراکز بازیافت و انهدام ضایعات و ریسک حمل مواد خطرناک برای جمعیت در معرض خطر لحاظ شده است (سمنلی اقلو، ۲۰۱۳). ارکوت و گزارا (۲۰۰۸) موضوع تعیین مسیر حمل و نقل مواد خطرناک را با فرض عبور وسایل نقلیه از مراکز جمعیتی درون شهرها مدل‌سازی کردند که در عبور از شهرها وسایل نقلیه به دو بخش تقسیم شده‌اند. آنها یک مدل برنامه‌ریزی اعداد صحیح دو سطحی را برای تعیین مسیر توسعه دادند و از روشی ابتکاری با چهار سناریوی متفاوت برای حل آن استفاده کردند (ارکوت و گزارا، ۲۰۰۸). ورتتر و کارا در سال ۲۰۰۱، ریسک حمل و نقل مواد خطرناک را بر اساس چارچوب GIS ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که ریسک حمل این مواد در یک منطقه، به‌شدت به نوع ماده خطرناک، توپولوژی راه‌ها و شیوه توزیع جمعیت بستگی دارد (ورتتر و کارا، ۲۰۰۱).

مسئله مکان‌یابی هاب

ایده شبکه‌های هاب در سال ۱۹۶۹ توسط گلدمن مطرح شد. کمابیش اغلب مدل‌های مکان‌یابی هاب تعریف‌شده در ادبیات موضوع، مدل‌های مکانی مشابهی^۱ دارند. در ادامه، به بررسی پیشینه انواع مسائل مکان‌یابی هاب پرداخته می‌شود. کامپل (۱۹۹۲) برای نخستین بار مسئله مکان‌یابی هاب میانه را با تخصیص چندگانه و تعداد هاب مشخص به‌صورت مدل‌سازی خطی عدد صحیح فرمول‌بندی کرد (کامپل، ۱۹۹۲). رودریگز و همکاران (۲۰۱۴) مسئله مسیریابی و مکان‌یابی هاب را به‌منظور کمینه کردن هزینه‌های حمل و نقل مطالعه کردند. آنها از الگوریتم انشعاب و برش برای حل مثال‌های AP و CAB موجود در ادبیات تحقیق بهره بردند (رودریگز، سالازار و یامان، ۲۰۱۴). لابی و همکارانش (۲۰۰۵) مسئله مکان‌یابی هاب ظرفیت‌دار با تخصیص تکی را مطالعه کردند که هر هاب یک ظرفیت خاص از مواد را از خود عبور می‌داد. آنها از روش شاخه و کران برای حل مدل ارائه‌شده استفاده کردند (لابی، یامان و گوردین، ۲۰۰۵). بولاند و همکارانش (۲۰۰۴) خصوصیات جدیدی را برای هر دو نوع مسائل ظرفیت‌دار و بدون ظرفیت ارائه دادند که به یافتن جواب‌های بهتر و زمان محاسباتی کمتر برای مدل‌های بالا منجر شد (بولاند، کریشناپورثی، ارنست و ابری، ۲۰۰۴). ارنست و همکارانش (۲۰۰۲) مسئله مکان‌یابی هاب مرکز با تخصیص تکی که مکان هاب‌ها ثابت است را بررسی

کردند و برای آن یک مدل سازی خطی ارائه دادند. آنها همچنین برای حل مدل خود پنج روش ابتکاری پیشنهاد دادند (ارنست، هاماجر، جیانگ، کریشنامورثی و وجینجر، ۲۰۰۲). ارنست و همکاران (۲۰۰۵) برای مسئله مکان یابی هاب مرکز با تعداد هاب مشخص، تخصیص های تکی و چندگانه ای را در نظر گرفتند و برای حل مدل خود از الگوریتم شاخه و کران استفاده کردند (ارنست، جیانگ و کریشنامورثی، ۲۰۰۵). کارا و تانسل (۲۰۰۳) مسئله مکان یابی هاب پوششی با تخصیص تکی را بررسی کردند (کارا و تانسل، ۲۰۰۳). به طور مشابه، کامپل و همکاران (۲۰۰۷) مدلی جدید برای تعیین مسیرهای بهینه ارائه دادند، به گونه ای که شبکه هابها تشکیل گراف کامل نمی دهند و همچنین جریان های عبوری بین هابها در ضریب تخفیف ضرب نمی شود (کامپل، لوی و ژانگ، ۲۰۰۷).

شهانقی و همکاران (۲۰۱۵) یک مسئله هاب میانه سه سطحی با ظرفیت محدود را مطالعه کردند که در آن هزینه جریمه تأخیر در تحویل در نظر گرفته شد (شهانقی، یآوری و حمیدی، ۲۰۱۵). گاوریلیوک و هاماجر (۲۰۰۶) برای فائق آمدن بر مسائل سائز بالای مکان یابی هاب مدلی یکپارچه ارائه دادند. اوکلی (۲۰۱۲) به اهداف مربوط به مصرف سوخت و تأثیرات زیست محیطی آن در شبکه هاب خطوط هوایی توجه کرد. آومار و کارا (۲۰۰۸) در مطالعه خود برای انواع مسائل مکان یابی هاب فرض غیر کامل بودن گراف تشکیل دهنده هابها را در نظر گرفتند. مارتینز و همکاران (۲۰۱۳) مدل جدیدی برای مسئله مکان یابی هاب درختی ارائه کردند. آنها همچنین برای حل مدل، الگوریتمی ارائه دادند که قادر به حل مدل تا ۱۰۰ گره بود (مارتینز، سارایوا و میراندا، ۲۰۱۳). مسئله هاب مورد بررسی در این پژوهش نیز از نوع هاب درختی است. در هاب درختی، گراف تشکیل دهنده نقاط شبکه، گرافی بدون دور یا حلقه است. زیرا در برخی شرایط از جمله مطالعه موردی این پژوهش، فرض کامل بودن گراف، غیرممکن و پرهزینه است.

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای مسئله مد نظر ارائه خواهد شد که برخی از مفروضات مهم در نظر گرفته شده برای این مدل عبارتند از: ۱. مدل چند هدفه است؛ ۲. پارامترهای مدل قطعی است؛ ۳. مدل از نوع گسسته است؛ ۴. حمل و نقل مواد خطرناک از طریق جاده و خطوط لوله صورت می گیرد؛ ۵. فقط ریسک حمل و نقل جاده ای مد نظر است؛ ۶. هزینه احداث هاب یا خطوط لوله معین است و ۷. مدل به صورت چند کالایی است.

مجموعه ها، پارامترها و متغیرهای مدل

N : مجموعه نقاط موجود $i, j = 1, \dots, N$

C : مجموعه محصولات موجود $c = 1, \dots, C$

f_{km} : هزینه ثابت احداث لینک بین هابهای k و m

c_{mk} : هزینه انتقال یک واحد کالا از هاب m به هاب k

D_i^c : مجموع تقاضای گره i از محصول c ($D_i^c = \sum_j w_{ji}^c$)

w_{ij}^c : جریان تقاضا از گره i به گره j برای محصول c

dis_{ik} : فاصله بین گره غیرهاب i و هاب k

p : تعداد هابها

K : مجموعه نقاط کاندید برای هابها $m, k = 1, \dots, N$

f_k : هزینه ثابت احداث هاب در گره k

c_{ik} : هزینه انتقال یک واحد کالا از گره i به هاب k

$Prob_{ik}$: احتمال وقوع حادثه و خسارت برای مواد خطرناک در مسیر i و k

O_i^c : مجموع عرضه گره i از محصول c ($O_i^c = \sum_j w_{ij}^c$)

M : عددی بی‌نهایت بزرگ

λ_c : شعاع تأثیر محصول c

α : ضریب تخفیف مربوط به حمل‌ونقل بین هاب‌ها

Z_{ik} : اگر گره غیرهاب i به هاب k تخصیص یابد، عدد ۱ لحاظ می‌شود و در غیر این صورت صفر است.

x_{ijkm} : جریان تقاضای بین گره‌های i و j از هاب‌های k و m عبور کند، عدد ۱ به آن اختصاص می‌یابد و در غیر این صورت صفر لحاظ می‌شود.

y_{km} : اگر بین هاب k و m مسیر مستقیم وجود داشته باشد ۱ لحاظ می‌شود و در غیر این صورت صفر است.

تابع هدف اول مدل

کمینه کردن هزینه حمل‌ونقل مواد خطرناک بین گره‌های هاب و گره‌های غیرهاب؛ هزینه حمل‌ونقل مواد خطرناک بین هاب‌ها که به دلیل جریان عمده حمل‌ونقل بین آنها از یک ضریب تخفیف (α) برخوردارند؛ هزینه‌های مربوط به احداث هاب و در نهایت هزینه ثابت احداث لینک بین هاب‌ها.

$$\min \left(\sum_i \sum_{\substack{k \\ k \neq i}} \sum_c (O_i^c c_{ik} + D_i^c c_{ki}) Z_{ik} + \sum_i \sum_{\substack{j \\ j > i}} \sum_k \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \sum_c (c_{km} w_{ij}^c + c_{mk} w_{ji}^c) \alpha x_{ijkm} \right. \\ \left. + \sum_k f_k Z_{kk} + \sum_k \sum_{\substack{m \\ k \neq m}} f_{km} y_{km} \right) \quad \text{(رابطه ۱)}$$

تابع هدف دوم مدل

کمینه کردن ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک که مربوط به حمل‌ونقل جاده‌ای است و خود شامل چهار جزء است که عبارت‌اند از: ۱. احتمال وقوع حادثه و خسارت برای مواد خطرناک که در مسیر i و k حمل‌ونقل می‌شوند، ۲. شعاع تأثیر مواد خطرناک که برای مواد مختلف متفاوت است، ۳. مقدار محصول C که در مسیر i و k حمل‌ونقل می‌شود و ۴. فاصله جاده‌ای بین گره غیرهاب i و هاب k که مواد خطرناک در آن حمل می‌شود.

$$\min \left(\sum_i \sum_k \sum_c Prob_{ik} \cdot \pi \lambda_c^2 \cdot (O_i^c + D_i^c) \cdot dis_{ik} \cdot Z_{ik} \right) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

بر خلاف مدل تک‌هدفه مارتینز و همکارانش (۲۰۱۳) در مدل پژوهش حاضر، w_{ij}^c به‌عنوان متغیر در نظر گرفته شده است و تعیین جریان بین دو گره مشخص i و j بر عهده مدل گذاشته شده، یعنی به‌عنوان پارامتر در نظر گرفته نشده است. ولی در عوض، دو محدودیت $\sum_j w_{ji}^c = D_i$ و $\sum_j w_{ij}^c = O_i$ به مدل اضافه شده است. با این تغییرات، تابع

هدف نخست به دلیل ضرب دو متغیر w در x غیرخطی می‌شود. به منظور خطی کردن مدل، متغیر جدید wx_{ijkm}^c ، تعریف و به همراه محدودیت‌های ۱۳ تا ۱۵ به صورت زیر به مدل ارائه شده اضافه می‌شود:

$$\min \left(\sum_i \sum_{\substack{k \\ k \neq i}} \sum_c (O_i^c c_{ik} + D_i^c c_{ki}) z_{ik} + \sum_i \sum_{\substack{j \\ j > i}} \sum_k \sum_{\substack{m \\ m \neq k}} \sum_c (c_{km} w x_{ijkm}^c + c_{mk} w x_{jikm}^c) \alpha \right. \\ \left. + \sum_k f_k z_{kk} + \sum_k \sum_{\substack{m \\ k \neq m}} f_{km} y_{km} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$\min \left(\sum_i \sum_k \sum_c \text{Prob}_{ik} \cdot \pi \lambda_c^2 \cdot (O_i^c + D_i^c) \cdot \text{dis}_{ik} \cdot z_{ik} \right) \quad \text{رابطه ۴}$$

s.t:

$$z_{ik} \leq z_{kk} \quad \forall i \neq k \quad \text{رابطه ۵}$$

$$\sum_k z_{ik} = 1 \quad \forall i \quad \text{رابطه ۶}$$

$$y_{km} \leq z_{kk} \quad \forall k < m \quad \text{رابطه ۷}$$

$$y_{km} \leq z_{mm} \quad \forall k < m \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_k \sum_{\substack{m \\ m > k}} y_{km} = \sum_k z_{kk} - 1 \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_{\substack{k \\ k \neq m}} x_{ijkm} + z_{im} = \sum_{\substack{k \\ k \neq m}} x_{ijmk} + z_{jm} \quad \forall i < j, \forall m \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$x_{ijkm} + x_{ijmk} \leq y_{km} \quad \forall i < j, \forall k < m \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_{\substack{m \\ m \neq k}} x_{ijkm} \leq z_{kk} \quad \forall i < j, \forall k \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$\sum_{\substack{m \\ m \neq k}} x_{ijmk} \leq z_{kk} \quad \forall i < j, \forall k \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$\sum_k z_{kk} = p \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\sum_j w_{ij}^c = O_i^c \quad \forall i, c \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\sum_j w_{ji}^c = D_i^c \quad \forall i, c \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$wx_{ijkm}^c \leq x_{ijkm} \times M \quad \forall c, \forall i < j, \forall k < m \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$wx_{ijkm}^c \geq w_{ij}^c - (1 - x_{ijkm}) \times M \quad \forall c, \forall i < j, \forall k < m \quad \text{رابطه ۱۸}$$

$$wx_{ijkm}^c \leq w_{ij}^c \quad \forall c, \forall i < j, \forall k < m \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$wx_{ijkm}^c \geq 0 \quad \text{رابطه ۲۰}$$

$$w_{ij}^c \geq 0 \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$x_{ijkm}, y_{km}, z_{ik} \in \{0,1\} \quad \text{رابطه ۲۲}$$

محدودیت‌ها

رابطه ۵ نشان می‌دهد زمانی یک گره به هاب تخصیص می‌یابد که آن هاب ایجاد شده باشد. رابطه ۶ محدودیت تخصیص تکی است که بیان می‌کند هر گره غیرهاب فقط به یک هاب تخصیص پیدا کند. روابط ۷ و ۸ نشان می‌دهند مسیر بین دو هاب زمانی برقرار می‌شود که به ترتیب گره‌های k و m هاب شده باشند. رابطه ۹ نشان‌دهنده شرط ایجاد درخت در شبکه هاب است. بنابراین برای ایجاد یک گراف بدون حلقه (درختی)، تعداد یال‌های موجود بین هاب‌ها باید یک واحد کمتر از تعداد هاب‌های شبکه باشد. رابطه ۱۰، بالانس کمان‌های بین گره‌ها را نشان می‌دهد. رابطه ۱۱ تضمین می‌کند که انتقال محصول از گره i به گره j توسط هاب k و m زمانی میسر است که کمان بین این دو هاب ایجاد شده باشد. روابط ۱۲ و ۱۳ تضمین می‌کنند که جریان از هاب‌های m و k زمانی عبور می‌کند که آنها ایجاد شده باشند. رابطه ۱۴، محدودیت تعداد هاب مشخص (p) است که می‌توان با کمی تغییر در مدل آن را درون‌زا کرد و خود مدل تعداد هاب‌ها را مشخص کند. روابط ۱۵ و ۱۶ به ترتیب، کل جریان خروجی از گره i و کل جریان ورودی به گره i را نشان می‌دهند. روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹ نیز به واسطه خطی کردن تابع هدف نخست به مدل نهایی اضافه شده‌اند. روابط ۲۰-۲۲، وضعیت متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

روش‌شناسی پژوهش

پژوهش حاضر از نظر نحوه گردآوری داده، توصیفی از نوع تحلیلی و مدل‌سازی ریاضی است. اجرای تحقیق توصیفی می‌تواند صرفاً برای شناخت بیشتر شرایط موجود یا یاری دادن به فرایند تصمیم‌گیری باشد (سرمد، بازرگان و حجازی، ۱۳۸۷: ۸۱ و ۸۲). روش تحقیق این پژوهش از نظر هدف، کاربردی به‌شمار می‌رود. زیرا هدف تحقیقات کاربردی توسعه دانش کاربردی در یک زمینه خاص است. به بیان دیگر تحقیقات کاربردی به سمت کاربرد عملی دانش هدایت می‌شود (سرمد و همکاران، ۱۳۸۷: ۷۹). در اینجا مطالعه موردی ما، شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی است. از نظر روش تحلیل اطلاعات نیز به دلیل تمرکز بر مدل‌سازی از تحلیل‌های کمی اطلاعات استفاده خواهد شد.

پس از گردآوری اطلاعات مربوط به تقاضا و عرضه و همچنین وجود خطوط لوله بین مناطق مختلف، این نتیجه حاصل شد که مناطق جنوبی و مرکزی کشور به دلیل وجود دو پالایشگاه اصلی بندرعباس و آبادان و حمل عمده فرآورده‌های نفتی ناشی از آنها، برای بررسی مسئله مکان‌یابی هاب، شرایط مناسب‌تری دارند. بنابراین از داده‌های به‌دست‌آمده از ۱۸ منطقه جنوبی و مرکزی کشور برای حل مدل ارائه‌شده استفاده خواهد شد. قلمرو زمانی تحقیق نیز شامل داده‌های مربوط به سال ۹۱ است. قلمرو موضوعی تحقیق، مدل‌سازی ریاضی چندهدفه برای تعیین هاب‌ها و شیوه بهینه توزیع مواد خطرناک است. منظور از مواد خطرناک در این تحقیق بنزین، نفت گاز و نفت سفید است.

مراحل اجرای پژوهش

۱. بررسی ادبیات موضوعی، ۲. گردآوری داده‌های مربوط به ریسک حمل‌ونقل مواد خطرناک، تقاضای مناطق مختلف کشور از فرآورده‌های نفتی، میزان عرضه پالایشگاه‌ها، همچنین کسب اطلاعات مربوط به وجود خطوط لوله بین مناطق مختلف، ۳. مدل‌سازی مسئله مد نظر، ۴. حل مدل با استفاده از روش معیار جامع، ۵. تحلیل کمی نتایج مدل، ۶. نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها مناسب و ۷. تدوین گزارش تحقیق.

بهینه‌سازی و روش حل مدل ارائه‌شده

به‌طور کلی روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی به سه دسته زیر تقسیم می‌شوند: ۱. روش‌های حل دقیق یا قطعی، ۲. روش‌های ابتکاری و ۳. روش‌های فراابتکاری. روش‌های حل قطعی مسائل بهینه‌سازی، روش‌هایی هستند که در صورت رسیدن به جواب، می‌توان مطمئن بود که آن جواب بهینه است. از آن جمله می‌توان به برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی آرمانی و برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح اشاره کرد. برنامه‌ریزی خطی، جزء نخستین روش‌های بهینه‌سازی با فرض کردن محدودیت‌های خطی است. در صورتی که ابعاد مسئله مد نظر بزرگ باشد، روش‌های حل دقیق یا قطعی کارایی لازم را نخواهند داشت و روش‌های ابتکاری و فراابتکاری از کارایی بالاتری برخوردار هستند (گلاور، کاکس، کلی و پاتیل، ۲۰۰۸).

بهینه‌سازی چندهدفه

هنگامی که یک مسئله بهینه‌سازی بیش از یک تابع هدف داشته باشد، یافتن یک یا چند پاسخ بهینه برای آن، بهینه‌سازی چندهدفه نامیده می‌شود. بیشتر مسائل جست‌وجو و بهینه‌سازی در دنیای واقعی به‌طور طبیعی چندین هدف را در بر دارند. در اغلب موارد اهداف با هم ناسازگار هستند. این امر مانع انتخاب جوابی می‌شود که فقط با در نظر گرفتن یک هدف بهینه است (ربانی، معنوی‌زاده و ضیائی، ۱۳۸۸: ۸). برای حل مسائل چندهدفه روش‌های مختلفی از قبیل تبدیل تابع هدف به محدودیت، روش وزن دادن به اهداف، برنامه‌ریزی آرمانی، روش اولویت مطلق^۱ و روش معیار جامع وجود دارد. از آنجا که در این تحقیق برای حل مدل ریاضی ارائه‌شده از روش معیار جامع استفاده شده است در این قسمت به تشریح آن پرداخته می‌شود.

روش معیار جامع

روش معیار جامع^۱، که یکی از روش‌های حل مسائل چندهدفه است، درصدد حل مسئله به گونه‌ای است که تفاوت بین هر تابع هدف و مقدار بهینه آن به حداقل ممکن برسد. حل مسائلی با p تابع هدف خطی که همه محدودیت‌های آن نیز از درجه یک باشد، ابتدا مستلزم حل p مسئله برنامه‌ریزی خطی است که هر مسئله فقط با یک تابع هدف حل می‌شود. در صورتی که جواب بهینه هر یک از مسائل با Z_t^* نشان داده شود ($t = 1, 2, \dots, k$)، آنگاه جواب مسئله از حل مسئله زیر به دست خواهد آمد.

$$\text{Min } Z' = \sum_{i=1}^t \left[\frac{Z_t^* - Z_t(x_j)}{Z_t^*} \right] \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$g_i(x_j) \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad \text{رابطه ۲۵}$$

حل این مسئله با استفاده از روش معیار جامع مستلزم به‌کارگیری سه گام زیر است:

گام ۱: حل p مسئله برنامه‌ریزی خطی که هر یک فقط یک تابع هدف از p تابع هدف را در بر می‌گیرد، گام ۲: ایجاد جدولی از جواب‌های به‌دست‌آمده در گام ۱ و گام ۳: به‌دست آوردن جواب نهایی (مهرگان، ۱۳۹۰: ۱۸۱-۱۹۲). مدل ارائه‌شده در این پژوهش برای مسائل با اندازه متوسط در زمان معقول قابل حل است. مسئله مطالعه موردی پژوهش حاضر با ۹۷۹۹۶۰ محدودیت گسترش‌یافته و ۴۲۱۳۵۶ متغیر گسترش‌یافته، مسئله‌ای متوسط است که در ۷۵۹۶۶ ثانیه با نرم‌افزار گمز^۲ نسخه ۲۳.۶ به‌وسیله سیستمی با پردازش‌گر Pentium(R) Dual-Core T۴۴۰۰ ۲/۲۰GHz حل شده است. نتایج حاصل از آن، در قسمت بعد تشریح می‌شود. بدیهی است که برای مسائل بسیار بزرگ، مدل‌های ریاضی در زمان معقول قابل حل نیستند. بنابراین کارایی مدل‌های فراابتکاری در این مسائل بیشتر از مدل‌های ریاضی است.

نتایج محاسباتی و تحلیل آن

مطالعه موردی این تحقیق، شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی است. از داده‌های به‌دست‌آمده از ۱۸ منطقه جنوبی و مرکزی کشور برای حل مدل ارائه‌شده استفاده شده است. فراورده نفتی این مناطق توسط ۵ پالایشگاه آبادان، بندرعباس، اصفهان، اراک و شیراز تأمین می‌شود. از آنجا که تقاضای منطقه فارس بیشتر از عرضه پالایشگاه شیراز است، کل عرضه این پالایشگاه به منطقه فارس تخصیص پیدا کرده، مقدار آن به صفر می‌رسد و باقی تقاضای این منطقه باید از طریق سایر پالایشگاه‌ها تأمین شود. داده‌های مورد نیاز، از جدیدترین آمارنامه‌های رسمی منتشر شده شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی و سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای که مربوط به سال ۹۱ هستند، گردآوری شده‌اند. داده‌های مورد نیاز برای حل مدل عبارت‌اند از: ۱. میزان تقاضای مناطق هجده‌گانه از سه فراورده بنزین، نفت گاز و نفت سفید، ۲. میزان

عرضه پالایشگاه‌ها، ۳. مسافت بین مناطق هجده‌گانه، ۴. هزینه حمل فرآورده‌های نفتی از طریق نفتکش‌های جاده‌پیما، ۵. هزینه حمل فرآورده‌های نفتی از طریق خطوط لوله، ۶. هزینه ثابت مربوط به احداث هاب و ۷. داده‌های مربوط به ریسک حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی.

احتمال وقوع حادثه و خسارت ($Prob_{ik}$)، با استفاده از داده‌های سازمان راهداری و حمل‌ونقل جاده‌ای و از تقسیم کل متوفیات و مصدومان ناشی از تصادفات هر استان در سال ۹۱ به مجموع مسافران جابه‌جاشده درون استانی و مسافران واردشده و خارج‌شده برای هر استان به‌دست آمده است. سپس احتمال به‌دست‌آمده را در نسبت متوسط تعداد سفر تانکرهای نفتکش به متوسط تعداد سفر کلیه وسایل نقلیه اعم از اتوبوس، مینی‌بوس، کامیون و سواری ضرب می‌کنیم تا سهم نفتکش‌ها از این احتمال به‌دست آید:

$$\text{رابطه ۲۶)} \quad \frac{\text{متوسط تعداد سفر تانکرهای نفتکش}}{\text{متوسط تعداد سفر کلیه وسایل نقلیه}} \times \frac{\text{کل متوفیات و مصدومین}}{\text{مجموع مسافران جابجا شده}}$$

برای محاسبه وسعت منطقه در معرض خطر، کسب داده‌های مربوط به شعاع تأثیر هر یک از فرآورده‌ها ضروری است، که با توجه به ادبیات تحقیق، این مقادیر برای فرآورده‌های بنزین، نفت گاز و نفت سفید به‌ترتیب برابر با ۰/۱۱۴۹، ۰/۳۰۹ و ۰/۰۲۱۱ کیلومتر هستند (چاکرابارتی و پاربخ، ۲۰۱۳). با استفاده از داده‌های گردآوری‌شده، مدل ریاضی ارائه‌شده را توسط نرم‌افزار گمز نسخه ۲۳/۶ برای تعداد هاب ۹ و ۱۰ با $\alpha = 0/7$ حل کرده و نتایج در این قسمت آورده شده است. دلیل حل مدل با ۹ عدد هاب این است که از بین مناطق هجده‌گانه با توجه به مطالعه انجام‌شده، ۹ منطقه آن از امکانات کافی نظیر خطوط لوله و انبار مناسب برای حمل مواد به‌صورت عمده برخوردار هستند. حل مدل با ۱۰ عدد هاب نیز به‌دنبال پاسخ به این پرسش است که در صورت نیاز به توسعه خطوط لوله، با توجه به کلیه هزینه‌های ذکرشده در مدل همچنین ریسک حمل، کدام منطقه در اولویت قرار دارد و نحوه توزیع فرآورده‌ها در شبکه جدید چگونه است.

حل مدل به‌وسیله روش معیار جامع با ۹ هاب

ابتدا مدل مد نظر، با تابع هدف نخست (کمینه کردن هزینه‌ها) حل شده و جواب بهینه منحصر به فردی برابر با ۲۶۷۱۱۶۴۸۵۳۹۱۷/۰۴ ریال به‌دست آمد. سپس این مدل با تابع هدف دوم (کمینه کردن ریسک حمل) حل شده و جواب بهینه منحصر به فردی برابر با ۴۳۴۱/۹۸ به‌دست آمد. در روش معیار جامع، تفاوت بین هر تابع هدف و مقدار بهینه آن که در بالا آمده است محاسبه می‌شود. در جواب نهایی حاصل از حل به‌وسیله روش معیار جامع، مقدار هزینه بهینه برابر با ۳۰۲۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰ ریال و مقدار ریسک بهینه برابر با ۴۴۳۴/۳۴ به‌دست آمد. مقدار متغیرهای $Z_{11,11}$ ، $Z_{15,15}$ ، $Z_{17,17}$ ، $Z_{17,17}$ ، $Z_{2,2}$ ، $Z_{10,10}$ ، $Z_{14,14}$ ، $Z_{13,13}$ ، $Z_{4,4}$ و $Z_{1,1}$ برابر با یک شده است. این به آن معنا است که گره‌های ۱، ۴، ۱۳، ۱۴، ۱۰، ۲، ۱۷، ۱۱ و ۱۵ یعنی مناطق آبادان، اهواز، لرستان، استان مرکزی، قم، اصفهان، یزد، کرمان و هرمزگان که از امکانات لازم نظیر خطوط لوله و انبارهای کافی برای انتقال فرآورده‌ها به‌صورت عمده برخوردار هستند، به‌عنوان هاب انتخاب شده‌اند.

مقدار متغیرهای $Z_{8,11}$ ، $Z_{6,15}$ ، $Z_{5,1}$ ، $Z_{9,2}$ ، $Z_{7,2}$ ، $Z_{3,4}$ ، $Z_{16,14}$ ، $Z_{12,4}$ و $Z_{18,11}$ برابر با یک شده است. یعنی گره غیرهاب ۸ (منطقه زاهدان) به هاب ۱۱ (منطقه کرمان)، گره غیرهاب ۶ (منطقه چابهار) به هاب ۱۵ (منطقه هرمزگان)، گره غیرهاب

تأمین تقاضای فراورده‌های نفتی هر یک از مناطق

شیوه تأمین تقاضای فراورده‌های نفتی هر یک از مناطق به صورت زیر است:

قم: متغیر $W_{1,1}$ برابر با ۱۰۹۱۶۰۰ به دست آمده است؛ به این معنا که بخشی از تقاضای بنزین ($c=1$) قم ($j=10$) به میزان ۱۰۹۱۶۰۰ تن از مبدأ یا پالایشگاه آبادان ($i=1$) تأمین می‌شود. کلیه اعداد مربوط به عرضه و تقاضا بر حسب تن است. تأمین بنزین قم مستلزم عبور از هاب‌های اهواز (گره ۴)، لرستان (گره ۱۳) و استان مرکزی (گره ۱۴) است. با توجه به مقدار گرفتن متغیر $W_{1,1}$ و یک شدن متغیرهای $X_{1,10,14}$ ، $X_{1,10,13}$ و $X_{1,10,14}$ هزینه حمل بنزین از هاب ۱ به هاب ۴، از هاب ۴ به هاب ۱۳، از هاب ۱۳ به هاب ۱۴ و از هاب ۱۴ به هاب ۱۰ در تابع هدف نخست محاسبه می‌شود. متغیر $W_{1,1}$ برابر با ۱۳۲۸۲۰ به دست آمده است، یعنی بخشی از تقاضای بنزین ($c=1$) قم ($j=10$) به میزان ۱۳۲۸۲۰ از مبدأ یا پالایشگاه اصفهان ($i=2$) تأمین می‌شود. به منظور جلوگیری از تکرار، از توضیح سایر متغیرهای $W_{i,j}$ و $X_{i,j,k,m}$ خودداری شده است و صرفاً شیوه تأمین فراورده هر یک از مناطق آورده می‌شود. بخشی از تقاضای بنزین قم به میزان ۱۹۰۱۱۰۰ از پالایشگاه اراک تأمین می‌شود. بخشی از تقاضای بنزین قم به میزان ۲۲۹۳۱۰ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. بخشی از تقاضای نفت گاز قم به میزان ۱۹۳۳۲۰۰ از مبدأ یا پالایشگاه آبادان، ۲۶۹۰۲۰۰ از پالایشگاه اصفهان، ۲۹۸۹۴۰۰ از پالایشگاه اراک و ۴۲۰۳۴۰ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. بخشی از تقاضای نفت سفید قم به میزان ۴۶۰۸۵۰ از مبدأ یا پالایشگاه آبادان، ۶۳۵۹۹۰ از پالایشگاه اصفهان، ۱۷۰۰۸۰ از پالایشگاه اراک و ۱۷۳۶۱۰ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. بنابراین تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید قم، از چهار پالایشگاه آبادان، اراک، بندرعباس و اصفهان تأمین می‌شود.

فارس: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید فارس به میزان ۵۸۰۸۰۷، ۹۰۲۸۰۹ و ۱۳۴۷۵۷ از پالایشگاه اصفهان تأمین می‌شود. به منظور تأمین فراورده‌های مورد نیاز فارس از پالایشگاه آبادان، ابتدا فراورده‌ها از طریق خطوط لوله از هاب ۱ (آبادان) به هاب ۴ (اهواز) منتقل و پس از آن توسط نفتکش‌های جاده‌پیما از هاب ۴ (منطقه اهواز) به گره غیرهاب ۹ (منطقه فارس) ارسال می‌شوند.

اهواز: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید اهواز به میزان ۷۶۹۷۶۷، ۱۹۷۷۲۸۲ و ۳۷۴۷۳ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

کهگیلویه و بویراحمد: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید کهگیلویه و بویراحمد به میزان ۱۲۰۸۲۲، ۱۱۳۹۲۹ و ۳۴۲۷۹ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

ایلام: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید ایلام به میزان ۱۰۹۷۶۶، ۱۵۲۶۷۳ و ۸۴۶۳۴ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

بوشهر: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید بوشهر به میزان ۳۰۰۶۲۵، ۱۰۲۷۹۰۳ و ۲۱۷۰۵ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

لرستان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید لرستان به میزان ۲۶۴۶۹۷، ۴۶۱۶۲۱ و ۱۲۷۳۷۱ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

همدان: کل تقاضای بنزین و نفت سفید همدان به میزان ۳۰۶۷۱۲ و ۶۷۰۱۷ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود، ولی تقاضای نفت گاز همدان به میزان ۴۸۰۰۲۰ از پالایشگاه اراک تأمین می‌شود.

چهارمحال و بختیاری: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید چهارمحال و بختیاری به میزان ۱۶۰۴۸۶، ۱۸۹۹۲۱ و ۲۵۸۶۲ از پالایشگاه اصفهان تأمین می‌شود.

یزد: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید یزد به میزان ۳۲۳۹۶۳، ۱۱۶۱۱۷۰ و ۷۲۸۹۸ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

چابهار: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید چابهار به میزان ۱۱۷۲۹۸، ۸۵۲۵۸۵ و ۲۳۰۴ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

زاهدان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید زاهدان به میزان ۴۶۸۴۶۹، ۸۰۸۴۴۰ و ۲۴۵۰۰۹ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

کرمان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید کرمان به میزان ۷۷۵۴۳۴، ۱۲۸۵۰۴ و ۱۲۲۳۰۷ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

خراسان جنوبی: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید خراسان جنوبی به میزان ۱۴۳۳۳۱، ۲۹۲۶۱۵ و ۸۲۷۰۹ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. فراورده نفتی هر یک از مناطق آبادان، اصفهان، استان مرکزی و هرمزگان نیز از پالایشگاه همان مناطق تأمین می‌شود.

حل مدل به‌وسیله روش معیار جامع با ۱۰ هاب

جواب مدل مد نظر، با تابع هدف نخست (کمینه کردن هزینه‌ها) برابر با $5080580147701/061$ ریال به‌دست آمد. سپس این مدل با تابع هدف دوم (کمینه کردن ریسک حمل) حل و جوابی برابر با $2766/63$ به‌دست آمد.

در جواب نهایی حاصل از حل به‌وسیله روش معیار جامع، مقدار هزینه بهینه برابر با $5,428,000,000,000$ ریال و مقدار ریسک بهینه برابر با $4323/297$ به‌دست آمد. مقدار متغیرهای $Z_{15,15}$ ، $Z_{11,11}$ ، $Z_{17,17}$ ، $Z_{2,2}$ ، $Z_{10,10}$ ، $Z_{14,14}$ ، $Z_{13,13}$ ، $Z_{4,4}$ و $Z_{1,1}$ برابر با یک انتخاب شده‌اند. این به آن معنا است که گره‌های ۱، ۴، ۱۳، ۱۴، ۱۰، ۲، ۱۷، ۱۱ و ۱۵ یعنی مناطق آبادان، اهواز، لرستان، استان مرکزی، قم، اصفهان، یزد، کرمان و هرمزگان که از امکانات لازم نظیر خطوط لوله و انبارهای کافی برای انتقال فراورده‌ها به‌صورت عمده برخوردار هستند، به‌عنوان هاب انتخاب شده‌اند. با افزایش تعداد هاب‌ها به ۱۰ عدد، متغیر $Z_{7,7}$ نیز برابر با یک شد و منطقه چهارمحال و بختیاری با صرف هزینه ثابت احداث هاب و احداث لینک یا همان خطوط لوله به‌عنوان هاب جدید انتخاب شد. یک شدن متغیر $Z_{7,7}$ نشان می‌دهد که هاب جدید یعنی منطقه چهارمحال و بختیاری مستقیماً به هاب ۲ یعنی منطقه اصفهان متصل شده است و جریان بین این دو منطقه

از طریق خطوط لوله و به طور عمده منتقل خواهد شد. نحوه تخصیص بقیه گره‌های غیرهاب به این هاب‌ها به صورت زیر است:

مقدار متغیرهای $Z_{8,11}$ ، $Z_{6,15}$ ، $Z_{5,1}$ ، $Z_{9,2}$ ، $Z_{3,4}$ ، $Z_{16,14}$ ، $Z_{12,7}$ و $Z_{18,11}$ برابر با یک شد، یعنی گره غیرهاب ۸ (منطقه زاهدان) به هاب ۱۱ (منطقه کرمان)، گره غیرهاب ۶ (منطقه چابهار) به هاب ۱۵ (منطقه هرمزگان)، گره غیرهاب ۵ (منطقه بوشهر) به هاب ۱ (منطقه آبادان)، گره غیرهاب ۹ (منطقه فارس) به هاب ۲ (منطقه اصفهان)، گره غیرهاب ۳ (منطقه ایلام) به هاب ۴ (منطقه اهواز)، گره غیرهاب ۱۶ (منطقه همدان) به هاب ۱۴ (منطقه استان مرکزی)، گره غیرهاب ۱۲ (منطقه کهگیلویه و بویراحمد) به هاب ۷ (منطقه چهارمحال و بختیاری) و گره غیرهاب ۱۸ (منطقه خراسان جنوبی) به هاب ۱۱ (منطقه کرمان) اختصاص داده شده است. نحوه تأمین تقاضای فرآورده‌های نفتی هر یک از مناطق در شبکه‌ای با ۱۰ هاب به صورت زیر است:

قم: بخشی از تقاضای بنزین قم به میزان ۱۵۱۹۱۰۰ از مبدأ یا پالایشگاه آبادان، ۲۴۱۳۱۰ از پالایشگاه اصفهان و ۱۵۹۴۳۰۰ از پالایشگاه اراک، تأمین می‌شود. متغیر $W_{15,1}$ نیز صفر شد. بنابراین تقاضای بنزین قم، از سه پالایشگاه آبادان، اراک و اصفهان تأمین می‌شود. بخشی از تقاضای نفت گاز قم به میزان ۲۰۴۷۱۰۰۰ از پالایشگاه آبادان، ۲۸۸۰۱۰۰ از پالایشگاه اصفهان، ۲۹۸۹۴۰۰ از پالایشگاه اراک و ۱۱۶۵۰۰ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. بخشی از تقاضای نفت سفید قم به میزان ۵۶۲۱۵۰ از مبدأ یا پالایشگاه آبادان، ۶۶۱۸۵۰ از پالایشگاه اصفهان، ۱۰۳۰۶۰ از پالایشگاه اراک و ۱۱۳۴۷۰ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. بنابراین تقاضای نفت گاز و نفت سفید قم، از چهار پالایشگاه آبادان، اراک، بندرعباس و اصفهان تأمین می‌شود.

فارس: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید فارس به میزان ۵۸۰۸۰۷، ۹۰۲۸۰۹ و ۱۳۴۷۵۷ از پالایشگاه اصفهان تأمین می‌شود. به منظور تأمین فرآورده‌های مورد نیاز فارس از پالایشگاه آبادان، ابتدا فرآورده‌ها از طریق خطوط لوله از هاب ۱ (آبادان) به هاب ۴ (اهواز) منتقل و پس از آن توسط نفتکش‌های جاده‌پیما از هاب ۴ (منطقه اهواز) به گره غیرهاب ۹ (منطقه فارس) ارسال می‌شوند.

اهواز: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید اهواز به میزان ۷۶۹۷۶۷، ۱۹۷۷۲۸۲ و ۳۷۴۷۳ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

کهگیلویه و بویراحمد: بخشی از تقاضای بنزین کهگیلویه و بویراحمد به میزان ۶۸۸۲۹ از پالایشگاه بندرعباس و باقی تقاضای بنزین کهگیلویه و بویراحمد به میزان ۵۱۹۹۳ از پالایشگاه اصفهان تأمین می‌شود. کل تقاضای نفت گاز و نفت سفید کهگیلویه و بویراحمد به میزان ۱۱۳۹۲۹ و ۳۴۲۷۹ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

ایلام: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید ایلام به میزان ۱۰۹۷۶۶، ۱۵۲۶۷۳ و ۸۴۶۳۴ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

بوشهر: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید بوشهر به میزان ۳۰۰۶۲۵، ۱۰۲۷۹۰۳ و ۲۱۷۰۵ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

لرستان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید لرستان به میزان ۲۶۴۶۹۷، ۴۶۱۶۲۱ و ۱۲۷۳۷۱ از پالایشگاه آبادان تأمین می‌شود.

همدان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید همدان به میزان ۳۰۶۷۱۲، ۴۸۰۰۲۰ و ۶۷۰۱۷ از پالایشگاه اراک تأمین می‌شود.

چهارمحال و بختیاری: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید چهارمحال و بختیاری به میزان ۱۶۰۴۸۶، ۱۸۹۹۲۱ و ۲۵۸۶۲ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

یزد: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید یزد به میزان ۳۲۳۹۶۳، ۱۱۶۱۱۷۰ و ۷۲۸۹۸ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

چابهار: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید چابهار به میزان ۱۱۷۲۹۸، ۸۵۲۵۸۵ و ۲۳۰۴ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

زاهدان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید زاهدان به میزان ۴۶۸۴۶۹، ۸۰۸۴۴۰ و ۲۴۵۰۰۹ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

کرمان: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید کرمان به میزان ۷۷۵۴۳۴، ۱۲۸۵۰۴ و ۱۲۲۳۰۷ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود.

خراسان جنوبی: کل تقاضای بنزین، نفت گاز و نفت سفید خراسان جنوبی به میزان ۱۴۳۳۲۱، ۲۹۲۶۱۵ و ۸۲۷۰۹ از پالایشگاه بندرعباس تأمین می‌شود. فراورده نفتی هر یک از مناطق آبادان، اصفهان، استان مرکزی و هرمزگان نیز از پالایشگاه همان مناطق تأمین می‌شود.

تحلیل حساسیت

با توجه به نتایج تحلیل حساسیت پارامتر α (ضریب تخفیف) می‌توان دریافت که تغییر این پارامتر در دامنه $0/5 \leq \alpha \leq 0/9$ ، نحوه هاب شدن گره‌ها و همچنین نحوه تخصیص گره‌های غیرهاب به هاب‌ها را تغییر نمی‌دهد و صرفاً در نقاط مرزی یعنی $\alpha=0/5$ و $\alpha=0/9$ برخی از متغیرهای w را تغییر می‌دهد. این نشان می‌دهد که جواب‌های بهینه به‌دست‌آمده، حساسیت زیادی نسبت به α در مرز $0/7$ ندارند.

به‌منظور تحلیل حساسیت گره‌های هاب و نحوه تخصیص بقیه گره‌ها به این هاب‌ها، مدل پیشنهادی با روش اولویت مطلق نیز حل شده است. در روش اولویت مطلق، ابتدا باید اهداف را از مهم‌ترین به کم‌اهمیت‌ترین رده‌بندی کرد، در گام دوم باید با استفاده از تابع هدف دارای بالاترین اولویت، مسئله را حل کرده و جواب بهینه را به‌دست آورد. سپس

باید تابع هدف گام دوم را با مساوی قرار دادن مقدار تابع هدف نخست با مقدار بهینه به دست آمده از گام قبل، به محدودیت تبدیل کرد و به گام دوم بازگشت.

در حل مدل با ۹ عدد هاب، هم به روش معیار جامع و هم با روش اولویت مطلق (چه زمانی که هزینه حمل در اولویت نخست قرار داشته باشد و چه زمانی که ریسک حمل در اولویت نخست قرار گرفته باشد) گره غیرهاب زاهدان به هاب کرمان، گره غیر هاب بوشهر به هاب آبادان، گره غیرهاب چهارمحال و بختیاری به هاب اصفهان و در نهایت گره غیرهاب همدان به هاب استان مرکزی تخصیص پیدا می کند، بنابراین جواب های غالب هستند. ولی نحوه تخصیص بقیه گره های غیرهاب به هاب ها در دو روش اولویت مطلق و روش معیار جامع یکسان نیست. به نظر می رسد که نحوه تخصیص روش معیار جامع که همزمان ریسک و هزینه حمل را در محاسبات خود لحاظ می کند، منطقی تر باشد.

با افزایش تعداد هاب های مسئله به ۱۰ عدد و انجام تحلیل حساسیت بالا، این نتیجه حاصل شد که در هر دو روش معیار جامع و اولویت مطلق، گره غیرهاب زاهدان به هاب کرمان و گره غیرهاب همدان به هاب استان مرکزی تخصیص پیدا می کند، بنابراین جواب های غالب هستند. اما نحوه تخصیص سایر گره های غیرهاب به هاب ها در دو روش اولویت مطلق و روش معیار جامع متفاوت است.

نتیجه گیری و پیشنهاد برای تحقیقات آتی

در این تحقیق، برای حمل و نقل زمینی مواد خطرناک در شبکه هاب، مدلی چندهدفه ارائه شد که سعی در به حداقل رساندن هزینه های حمل و نقل و هزینه های احداث هاب و لینک با در نظر گرفتن ریسک موجود در حمل و نقل مواد خطرناک دارد. پس از ارائه مدل ریاضی، با استفاده از داده های واقعی شرکت ملی پخش فرآورده های نفتی مدل ذکر شده حل و نتایج ارائه شد. با توجه به نتایج حل مدل با ۱۰ عدد هاب، منطقه چهارمحال و بختیاری به عنوان هاب جدید انتخاب و نحوه تأمین فرآورده نفتی هر یک از مناطق نیز ارائه شده است. شایان ذکر است که مدل معرفی شده در این تحقیق با استفاده از داده های واقعی سال ۱۳۹۱ حل و نتایج ارائه شده است. بدیهی است که این مدل با داشتن داده ها و اطلاعات سال های بعد نیز قابل استفاده است.

با توجه به نتایج حاصل از حل مدل به وسیله روش معیار جامع با ۹ عدد هاب، مشاهده می شود که خطوط لوله حدود سه چهارم فرآورده های مورد نیاز (۲۰,۱۴۰,۰۰۰ تن از ۲۶,۸۸۰,۰۰۰ تن) را حمل می کنند در حالی که یک چهارم هزینه ها (۶۶۷,۸۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال از ۲,۶۷۱,۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال) را به خود اختصاص می دهند. در مقابل، نفتکش های جاده پیما تقریباً یک چهارم فرآورده ها (۶,۷۴۰,۰۰۰ تن از ۲۶,۸۸۰,۰۰۰ تن) را حمل می کنند، در حالی که حدود سه چهارم هزینه ها (۲,۰۰۳,۴۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال از ۲,۶۷۱,۲۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال) را به خود اختصاص می دهند. بنابراین با مقایسه سهم خط لوله و نفتکش های جاده پیما، اهمیت و ضرورت استفاده از خط لوله، به وسیله افزایش ظرفیت و ساخت خطوط لوله جدید در منطقه تعیین شده توسط مدل پیشنهادی، برای کاهش هزینه ها و صرفه جویی ها در بلندمدت مشخص است. بر اساس روش معیار جامع، هزینه به دست آمده از به کارگیری مدل ارائه شده برای سیستم حمل و نقل موجود، برابر با ۳,۰۲۱,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال است که در مقایسه با هزینه واقعی حمل و نقل فرآورده های نفتی (که طبق آمار استخراج شده

از شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی برابر با ۳,۲۲۷,۰۰۰,۰۰۰ ریال است) ۲۰۶,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال کمتر است. بنابراین به‌کارگیری مدل پیشنهادی علاوه بر کاهش ریسک، به میزان ۲۰۶,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ ریال باعث صرفه‌جویی اقتصادی در هزینه‌های حمل‌ونقل شرکت ملی پخش فراورده‌های نفتی می‌شود. مدل پیشنهادی این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یکی از ابزارهای برنامه‌ریزی حمل‌ونقل زمینی با رعایت مشخصات فنی و ضوابط مربوط به محورهای استفاده‌شده برای حمل انواع کالاهای خطرناک باشد و به شکل‌گیری سیستمی نوین برای مدیریت مسیر ناوگان ترابری حمل مواد خطرناک منجر شود. نوآوری‌های اصلی این پژوهش، استفاده از مسئله مکان‌یابی هاب در حمل‌ونقل مواد خطرناک، در نظر گرفتن هزینه ثابت احداث لینک نظیر هزینه احداث خطوط لوله بین نقاط هاب به‌منظور حمل عمده مواد و چند محصولی کردن مسئله مکان‌یابی هاب درختی هستند.

با توجه به وارد شدن مفروضات جدید به مدل پیشنهادی، می‌توان توسعه‌هایی را برای تحقیقات آتی در نظر گرفت که موجب جذاب شدن هر چه بیشتر این مدل شود. به‌طور مثال: ۱. فرض کردیم که تمامی پارامترهای مدل به‌صورت قطعی هستند، ولی می‌توان مدل مد نظر را با فرض احتمالی، و یا فازی بودن پارامترها استفاده کرد، ۲. استفاده از افق برنامه‌ریزی پویا (چنددوره‌ای) برای حل مدل ارائه‌شده، ۳. مدل‌سازی مسئله با در نظر گرفتن اهداف دیگری نظیر کمینه کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای یا کمینه کردن آلودگی صوتی و...، ۴. وارد کردن مدل‌های صف در شبکه هاب درختی و محاسبه ریسک متقابل تانکرهای در انتظار بارگیری یا تخلیه فراورده‌های نفتی در انبارهای نفت، ۵. در نظر گرفتن عدالت^۱ در توزیع ریسک، یعنی ریسک در هر مسیر از حد معینی بیشتر نشود. برای این منظور می‌توان از نظریه بازی^۲ برای برنامه‌ریزی دوسطحی حمل‌ونقل مواد خطرناک استفاده کرد و ۶. توسعه روش‌های حمل‌ونقل نظیر استفاده از خطوط ریلی یا حمل‌ونقل دریایی.

منابع

- آیتی، اسماعیل؛ قدیریان، فرامرز؛ احدی، محمدرضا (۱۳۸۷). محاسبه هزینه‌های آسیب به وسایل نقلیه در تصادفات جاده‌ای ایران در سال ۱۳۸۳، *پژوهشنامه حمل و نقل*، (۱)۵، ۲۳-۸.
- بهره‌ا، نقشه ایران، <http://www.behrah.com>، تیر ۱۳۹۳.
- ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۱، <http://www.saba.org.ir>، فروردین ۱۳۹۴.
- خیرخواه‌زاده، معصومه (۱۳۸۶). *ارائه یک الگوریتم مبتنی بر روش‌های مبنی بر جمعیت در بهینه‌سازی ترکیبی*. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه امیرکبیر کبیر ایران.
- ربانی، مسعود؛ معنوی‌زاده، ندا؛ ضیائی، بهاره (۱۳۸۸). *طرح‌ریزی الگوهای ریاضی در بهینه‌یابی سیستم‌های کسب و کار*، تهران: انتشارات نبوی.
- فریبرزی عراقی، فرشید؛ میربهاء، بابک؛ ابوالحسن نژاد، وحید (۱۳۸۵). *آشنایی با مفاهیم حمل و نقل جاده‌ای مواد خطرناک*، تهران: اندیشه نگاران کیا.

- سازمان راهداری و حمل و نقل جاده‌ای، سالنامه آماری حمل و نقل جاده‌ای ۱۳۹۱.
- سرمد، زهره؛ بازرگان، عباس؛ حجازی، الهه (۱۳۸۷). روش‌های تحقیق در علوم رفتاری، تهران: انتشارات آگاه.
- شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران، آمارنامه سال ۱۳۹۱.
- مهرگان، محمدرضا (۱۳۸۶). پژوهش عملیاتی: برنامه‌ریزی خطی و کاربردهای آن، تهران: نشر کتاب دانشگاهی.
- مهرگان، محمدرضا (۱۳۹۰). پژوهش عملیاتی پیشرفته، تهران: نشر کتاب دانشگاهی.

References

- Alumur, S. & Kara, B. Y. (2008). Network hub location problems: The state of the art, *European Journal of Operational Research* 190 (1), 1-21.
- Ayati, E. & Ghadiriyan, F. & Ahadi, M.R. (2008). Calculate the cost of damage to vehicles in Iran road accidents in 2004. *Journal of Transportation Research*, 5 (1), 1-13. (in Persian)
- Behrah, Map of Iran, Online available at (<http://www.behrah.com>), accessed 2 June 2014.
- Boland, N. & Krishnamoorthy, M. & Ernst, A.T. & Ebery, J. (2004). Preprocessing and cutting for multiple allocation hub location problems. *European Journal of Operational Research* 155 (3), 638–653.
- Campbell, A.M. & Lowe, T.J. & Zhang, L. (2007). The p-hub center allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 176(2), 819–835.
- Campbell, J.F. (1992). Location and allocation for distribution systems with transshipments and transportation economies of scale. *Annals of Operations Research*, 40 (1), 77–99.
- Chakrabarti, U.K. & Parikh, J.K. (2013). Risk-based route evaluation against country-specific criteria of risk tolerability for hazmat transportation through Indian State Highways, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries xxx*, 26 (4), 1-14.
- Contreras, I. & Fernandez, E. & Marin, A. (2010). The Tree of Hubs Location Problem. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 390–400.
- Energy Balance Sheet of 2012, available at (<http://www.saba.org.ir>), accessed 17 November of 2015.
- Erkut, E. & Gzara, F. (2008). Solving the Hazmat transport network design problem, *Computers and Operations Research*, 35 (7), 2234–2247.
- Erkut, E., Tjandra, S. A., & Verter, V. (2007). Hazardous materials transportation. *Handbooks in operations research and management science*, 14, 539-621.
- Ernst, A., Hamacher, H., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Woeginger, G. (2002). *Heuristic algorithms for the uncapacitated hub center single allocation problem*. Unpublished Report, CSIRO Mathematical and Information Sciences, Australia.
- Ernst, A.T. & Jiang, H. & Krishnamoorthy, M. (2005). *Reformulations and computational results for uncapacitated single and multiple allocation hub covering problems*. Unpublished Report, CSIRO Mathematical and Information Sciences, Australia.

- Fariborz-Araghi, F. & Mirbahae, B. & Abolhasan-nezhad, V. (2006). *An introduction to carriage of dangerous goods by road*. Tehran, Andishe Negarane Kia publication. (in Persian)
- Gavriliouk, E.O. & Hamacher, H.W. (2006). Aggregation for hub location problems. *Computers & Operations Research*, 36 (12), 3136–3142.
- Glover, F. & Cox, L. & Kelly, J. & Patil, R. (2008). Exact, Heuristic and Metaheuristic Methods for Confidentiality Protection by Controlled Tabular Adjustment. *International Journal of Operations Research*, 5 (2), 117-128.
- Hongmei, J. & Lin, Z. & Xiuling, L. & Huiyun, C. (2011). A fuzzy-stochastic Constraint Programming Model for Hazmat Road Transportation Considering Terrorism Attacking. *Systems Engineering Procedia* 1 (1), 130–136.
- Iran Road Maintenance and Transportation Organization, Statistical Yearbook of road transportation 2012.
- Kara, B.Y. & Tansel, B.C. (2003). The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations. *Journal of the Operational Research Society*, 54 (1), 59–64.
- Kazantzi, V. & Kazantzis, N. & Gerogiannis, V.C. (2011). Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (6), 767-773.
- Labbe, M. & Yaman, H. & Gourdin, E. (2005). A branch and cut algorithm for the hub location problems with single assignment. *Mathematical Programming*, 102 (2), 371–405.
- Martins de Sa, E. & Saraiva de Camargo, R. & Miranda, M. (2013). An improved Benders decomposition algorithm for the tree of hubs location problem. *European Journal of Operational Research*, 226 (2), 185–202.
- Mehregan, M.R. (2007). *Operations Research: Linear Programming and its applications*. Tehran, Ketabe Daneshgahi publication. (in Persian)
- Mehregan, M.R. (2011). *Advanced Operations Research*. Tehran, Ketabe Daneshgahi publication. (in Persian)
- Mohammadi, M. & Jolai, F. & Rostami, H. (2011). An M/M/c queue model for hub covering problem. *Mathematical and Computer Modelling* 54 (11), 2623-2638.
- National Iranian Oil Products Distribution Company, Statistical Yearbook of 2012.
- O'Kelly, M. E. (2012). Fuel burn and environmental implications of airline hub networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(7), 555-567.
- Rabbani, M. & Manavizadeh, N. & Ziyaei, B. (2009). *Design of mathematical models*. Tehran, Nabavi publication. (in Persian)
- Raemdonck, KV., Macharis, C., & Mairesse, O. (2013). Risk analysis system for the transport of hazardous materials. *Journal of safety research*, 45(2), 55-63.
- Rodríguez-Martín, I., Salazar-González, J. J., & Yaman, H. (2014). A branch-and-cut algorithm for the hub location and routing problem. *Computers & Operations Research*, 50, 161-174.

- Samanlioglu, F. (2013). A multi-objective mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2), 332-340.
- Sarmad, Z. & Bazargan, A. & Hejazi, E. (2008). *Research methods in behavioral sciences*. Tehran, Agah publication. (in Persian)
- Shahanaghi, K., Yavari, A., & Hamidi, M. (2015). Developing a model for capacitated hierarchical hub location with considering delivery time restriction. *Applied mathematics in Engineering, Management and Technology*, 3(1), 540-548.
- Verter, V. & Kara, B. (2001). A GIS-Based Framework for Hazardous Materials Transport Risk Assessment. *Risk Analysis*, 21 (6), 1109-1120.