مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (تابستان ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۱-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۳۵-۱۴۷، (یادداشت فنی)

Research Note

برنامه‌ریزی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی چندگانه با در نظرگرفتن پنجره زمانی برای عرضه، تقاضا و مسیرهای حمل‌ونقل (مطالعه‌ی موردی: استان کردستان)

مریم کبیری (کارشناس ارشد)
محمود شهرخی (استادیار)
علیرضا عیدی * (استادیار)
امیرحسین براهیمی (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان، سنندج

در این پژوهش، شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی در سطح پایین‌دستی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این شبکه شامل خطوط حمل‌ونقل جاده‌یی و لوله‌یی است. با توجه به مفروضات و محدودیت‌های این شبکه، زمان توزیع فراورده‌ها و تقاضای مصرف آن‌ها و مسیرهای حمل‌ونقل می‌تواند دارای پنجره زمانی باشد. هدف پژوهش حاضر ارائه‌ی یک برنامه‌ی زمانی برای حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی با درنظرگرفتن اهداف، بیشینه‌کردن سطح پوشش تقاضاها، و کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل است. به‌منظور ارائه‌ی قالب ریاضی برای مسئله، ابتدا به‌صورت یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرمول‌بندی می‌شود. در فرمول‌بندی ارائه شده برخی از انواع مفروضاتی که مسئله‌را به شرایط دنیای واقعی نزدیک می‌کند، لحاظ شده‌است. همچنین برای حل مسئله از الگوریتم فرابتکاری NSGAII استفاده شده است. در انتها الگوریتم حل پیشنهادی برای تحلیل مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل در شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی استان کردستان مورد استفاده قرارگرفته است.

واژگان کلیدی: برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، بهینه‌سازی چندهدفه، شبکه‌ی توزیع، فراورده‌های نفتی، پنجره زمانی، NSGAII.

m.kabiri.68@gmail.com
shahrokhi292@yahoo.com
eydi81@yahoo.com
ah.barahimi@gmail.com

۱. مقدمه

بحث حمل‌ونقل در سیستم‌های اقتصادی ــ اعم از تولیدی و خدماتی ــ از چنان جایگاه ویژه‌یی برخوردار است که بخش قابل توجهی از درآمد ملی هرکشوری را به خود اختصاص می‌دهد. یکی از مباحث مهمی که در چند دهه‌ی اخیر در زمینه‌ی حمل‌ونقل اهمیت به‌سزایی پیدا کرده، مسائل حوزه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی است. با توجه به پیچیدگی این مسائل، در تحقیقات صورت‌گرفته در این حوزه از مفروضات ساده‌کننده‌یی برای مدل‌سازی این مسائل استفاده شده است. از این رو، با توجه به اهمیت روزافزون نقش سیستم‌های توزیع فراورده‌های نفتی، ارائه‌ی مدل‌هایی که انطباق بیشتری با شرایط دنیای واقعی داشته باشد، می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی این شبکه‌ها ایفا کند.

چگونگی توزیع فراورده‌های نفتی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر هزینه و میزان مصرف انرژی است؛ از طرفی سطح دسترسی مشتریان به فراورده‌های نفتی به‌لحاظ سیاسی، اقتصادی و حتی جانی از اهمیت خاصی برخوردار است.

زنجیره‌ی تأمین فراورده‌های نفتی در سه سطح مورد بررسی قرار می‌گیرد: سطح بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی. سطح بالادستی اشاره به مبدأ و سرچشمه‌ی سوخت ــ یعنی استخراج نفت و حمل آن به پالایشگاه ــ دارد؛ سطح میان‌دستی به پالایش نفت مربوط می‌شود و سطح پایین‌دستی نیز فرایندهایی را توصیف می‌کند که در ادامه پالایش یعنی انبارش و توزیع به مشتریان است.[۱]

اکثر مسائلی که در حوزه‌ی توزیع و حمل فراورده‌های نفتی بررسی شده، در سطح بالادستی این زنجیره بوده و در تعریف مسائل از مفروضات ساده‌کننده‌یی استفاده شده است. در این نوشتار شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی، شامل نفت سفید، گازوئیل، بنزین و مازوت در سطح پایین‌دستی مورد نظر قرار می‌گیرد. این شبکه شامل خطوط حمل‌ونقل جاده‌یی و لوله‌یی است. با توجه به مفروضات و محدودیت‌های این شبکه، زمان توزیع فراورده‌ها و تقاضای مصرف آن‌ها و مسیرهای حمل‌ونقل می‌تواند دارای پنجره زمانی باشد. همچنین برای انتقال فراورده‌های نفتی گزینه‌های متفاوتی از نظر وسایل حمل‌ونقل وجود دارد. هدف پژوهش حاضر ارائه‌ی یک برنامه‌ی زمانی برای حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی، شامل زمان‌بندی حمل هریک از این فراورده‌ها، نوع و مقدار و وسیله‌ی حمل‌ونقل، و مسیرهای حمل هریک از آن‌هاست.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۵/۲۸، پذیرش ۱۳۹۴/۶/۲۸.

در بین مطالعات انجام شده در زمینه‌ی زمان‌بندی و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل، تعداد زیادی از تحقیقات به ترکیب مسائل کنترل و مدیریت موجودی و مسیریابی وسایل حمل‌ونقل پرداخته‌اند. در تحقیقی کامل و جامع پیرامون این موضوع،[۲] محققین به دنبال یافتن نقطه‌ی بهینه‌ی بازپرسازی موجودی در مراکز نگه‌داری متفاوت‌بوده‌اند، طوری که فراورده‌ها در زمان‌های مناسب و به‌موقع توسط وسایل حمل‌ونقل به مشتریان مورد نظر تحویل شود. در علوم مدیریت و تحقیق در عملیات، این‌گونه مسائل را با نام «مسئله‌ی موجودی مسیریابی» می‌شناسند که یکی از مسائل هسته‌یی و مهم در مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. در مقابل، برخی مطالعات دیگر در مرور ادبیات موضوع وجود دارند که بحث موجودی را مد نظر قرار نمی‌دهند و تمامی توجه‌شان به مسئله‌ی زمان‌بندی توزیع محموله‌ها توسط وسایل حمل‌ونقل است. در واقع این تحقیقات به دنبال تعیین زمان ارسال هر محموله توسط وسایل مربوطه، مسیر حرکت وسایل، زمان تحویل و... هستند.

فراورده‌های نفتی به‌طور عمده توسط وسایل حمل‌ونقل دریایی به بازارهای بین‌المللی منتقل می‌شود. تقریباً ۶۰٪ فراورده‌های نفتی تولید شده از طریق خطوط دریایی به بازارهای مصرف‌کنندگان ارسال می‌شود.[۳] علاوه بر خطوط دریایی، عملیات توزیع و حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی مانند برخی دیگر از فراورده‌ها توسط جاده‌ها، ریل راه آهن، مسیرهای دریایی، و خطوط لوله انجام می‌گیرند. در جدول ۱ مطالعات انجام شده درمورد توزیع و حمل‌ونقل مواد نفتی با استفاده از کامیون‌ها ارائه شده است.

ادبیات موضوع زمان‌بندی حمل‌ونقل خطوط لوله مربوط به اواخر سال ۱۹۶۰ است. خطوط لوله از سایر روش‌های حمل‌ونقل متفاوت است چرا که در این شیوه، خطوط لوله که وسیله‌ی حمل‌ونقل هستند ثابت بوده و فراورده‌ها درون آن حرکت می‌کنند. این عملیات به‌طور پیوسته در خطوط لوله انجام می‌شود و چنین خصیصه‌یی در شرایطی که مقدار زیادی از فراورده‌ها در فواصل طولانی ارسال می‌شوند بسیار مهم است. تعداد مطالعات کمی درزمینه‌ی زمان‌بندی حمل‌ونقل خطوط لوله ــ که یک خط لوله‌ی چندمحصولی حجم پایینی از فراورده‌ها را حمل می‌کند ــ وجود دارد. ابزار موجود برای حل این‌گونه مسائل بر پایه‌ی محاسبات دستی است.[۴و۵] بیشتر مطالعات انجام شده در ادبیات موضوع شامل یک خط لوله‌ی چندمحصولی است که با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط حل شده‌اند.[۶-۱۸] علاوه بر مدل‌های برنامه‌ریزی خطی که برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی خط لوله ارائه شده، در تعدادی از تحقیقات برای حل این مسئله‌مدل‌ها برنامه‌ریزی غیرخطی ارائه شده است.[۱۸و۱۹] در کنار تحقیقات مربوط به تک‌خط لوله، تحقیقاتی در ادبیات موضوع وجود دارد که در آن خطوط لوله به‌صورت شبکه‌یی فرض شده است. در چنین سیستم‌هایی چندین تلمبه در طول شبکه برای روانه ساختن فراورده‌ها به سمت مقاصدشان توزیع شده است. در جدول ۱ مطالعات انجام شده درمورد توزیع و حمل‌ونقل مواد نفتی با استفاده از خطوط لوله معرفی شده است.

در این پژوهش تلاش می‌شود تا مدل‌سازی یک شبکه‌ی توزیع چندکالایی فراورده‌های نفتی ــ شامل نفت سفید، نفت گاز (گازوئیل)، بنزین و نفت کوره (مازوت) ــ با در نظرگرفتن مفروضاتی که مدل را حتی‌الامکان به شرایط دنیای واقعی نزدیک کند، مورد بررسی قرارگیرد. این مفروضات شامل در نظرگرفتن ترکیب شبکه‌ی حمل‌ونقل جاده‌یی و لوله‌یی، لحاظ کردن پنجره زمانی برای زمان توزیع فراورده‌ها و تقاضای مصرف آن‌ها، و نیز لحاظ کردن گزینه‌های متفاوت برای وسایل حمل ونقل است. تابع هدف این پژوهش نیز شامل کمینه‌کردن کل هزینه‌ی حمل‌ونقل فراورده‌ها و بیشینه‌کردن سطح پوشش تقاضا در پنجره زمانی مربوطه است. برای حل مسئله‌از الگوریتم فراابتکاری NSGAII استفاده شده و نهایتاً پیاده‌سازی مدل پیشنهادی و الگوریتم حل، با اجرای مطالعه‌ی موردی روی شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی استان کردستان انجام شده است.

۲. مدل‌سازی مسئله

پیش از ارائه‌ی فرمول‌بندی ریاضی، مفروضات مسئله‌ی مورد بررسی را می‌توان چنین برشمرد:

- فراورده‌های نفتی شامل چندکالای متفاوت (نفت سفید، گازوئیل، بنزین و مازوت) است.
- شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی شامل پالایشگاه‌ها، انبارهای اصلی، نیروگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت، انبارهای میانی و مشتریان (جزئی) است.
- مکان اجزاء اصلی شبکه‌ی توزیع و مسیرهای بین اجزاء مشخص و ثابت است.
- مسیرهای حمل‌ونقل جاده‌یی شامل مسیرهای اتصال پالایشگاه به انبارهای اصلی، نیروگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت و انبارهای میانی، انبارهای اصلی به نیروگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت و انبارهای میانی، و نیز انبارهای میانی به مشتریان جزئی است.
- انتقال فراورده‌های نفتی توسط خط لوله از پالایشگاه‌ها به نیروگاه‌ها امکان‌پذیر است.
- وسایل حمل‌ونقل متنوع، و ظرفیت هریک مشخص است.
- تعداد وسایل حمل‌ونقل در هر بازه زمانی مشخص و قطعی است.
- برنامه‌ریزی به تفکیک ماه‌های سال انجام می‌شود.
- هزینه و مدت سیر مسیر حمل‌ونقل هر وسیله از هر مسیر برای هر فراورده در هر ماه مشخص و قطعی است.
- حمل فراورده در برخی از کمان‌ها تنها توسط وسایل نقلیه‌ی خاصی امکان‌پذیر است.
- برخی از مسیرها تنها در پنجره زمانی خاصی قابل استفاده است.
- هزینه‌ی تولید فراورده‌های نفتی ثابت است و بنابراین در توابع هدف و محدودیت‌ها وارد نمی‌شوند.
- ظرفیت عرضه‌ی هر فراورده‌ی نفتی توسط هریک از پالایشگاه‌ها در هر ماه مشخص و قطعی است.
- تقاضای هریک از فراورده‌ها در هر روز مشخص و قطعی است.
- هریک از مراکز ذخیره‌سازی و وسایل حمل‌ونقل را می‌توان برای فراورده‌های متفاوت مورد استفاده قرار داد.
- چنانچه یک وسیله‌ی حمل‌ونقل فراورده‌های متفاوتی را حمل کند، هزینه‌ی شست‌وشوی آن لحاظ می‌شود.
- تقاضای نیروگاه‌ها و جایگاه‌های سوخت در هر روز مشخص و قطعی است و باید در همان روز برآورده شود.
- تقاضای مشتریان جزئی دارای پنجره زمانی است و یک موعد نهایی برای تحویل دارد.

جدول ۱. بخشی از مقالات ارائه شده در ادبیات موضوع.

الف) توزیع و حمل‌ونقل مواد نفتی با استفاده از کامیون‌ها		
نویسندگان	سال انتشار	موضوع مورد بررسی
برون و گریوز[۲۰]	۱۹۸۱	مسئله‌ی حمل‌ونقل گازوئیل با ارسال‌های مستقیم از یک ترمینال مخازن در شورون آمریکا
برون و همکاران[۲۱]	۱۹۸۷	توسعه‌ی مسئله‌ی حمل‌ونقل گازوئیل با در نظرگرفتن ارسال‌های چندگانه در طول یک سفر
فرانز و وودمنز[۲۲]	۱۹۹۰	ارائه‌ی یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری شبیه‌سازی شده بر مبنای قواعد برای یک شرکت نفتی منطقه‌یی
رونن[۲۳]	۱۹۹۵	انجام یک مطالعه جامع و کامل در مورد کاربردهای تحقیق در عملیات در فراورده‌های نفتی و مقایسه‌ی کاربردهای مختلف آن در صنایع نفتی
باوسچ و همکاران[۲۴]	۱۹۹۵	ارائه‌ی تکنیک تقسیم مجموعه، برای حل مسئله‌ی پیشنهادی توسط برون و همکاران (۱۹۸۷)
نوسباوم و سپولودا[۲۵]	۱۹۹۷	مطالعه و بررسی مسئله‌ی توزیع و حمل‌ونقل فراورده‌های بزرگ‌ترین شرکت نفتی در شیلی
تاکالا و همکاران[۲۶]	۲۰۰۰	توسعه‌ی مسئله‌ی زمان‌بندی توزیع و تحویل فراورده‌های نفتی و سوختی در حالت چند دوره زمانی
بن عبدالعزیز و همکاران [۲۷]	۲۰۰۲	ارائه‌ی یک مدل ریاضی برای شرایط تک پریودی برای مسئله‌ی زمان‌بندی توزیع فراورده‌ها وبکارگیری یک الگوریتم جست‌وجوی همسایگی برای اولویت‌بندی کامیون‌های ارسال محموله‌های سوختی
مالپارت و همکاران[۲۸]	۲۰۰۳	ارائه‌ی چهار روش تقریبی برای حل مسئله‌ی تحویل مواد نفتی و سوختی برای یک شرکت کانادایی
اولا و همکاران[۲۹]	۲۰۰۴	مطالعه و بررسی مسئله‌ی تحویل روزانه مواد نفتی با استفاده ازکامیون‌های ناهمگون
فو و همکاران[۳۰]	۲۰۰۵	پیشنهاد یک الگوریتم بازپخت شبیه‌سازی شده برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی کامیون‌ها که مسئله‌یی مشابه با شرایط دنیای واقعی داشت
هماچر و همکاران[۳۱]	۲۰۰۶	حل مسئله‌ی کوتاه‌ترین مسیر وابسته به زمان مواد نفتی با در نظرگرفتن پنجره زمانی برای مسیر با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی حمل و ریسک با استفاده از الگوریتم ابتکاری
شریعت و همکاران[۳۲]	۲۰۰۷	ارائه‌ی یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در مسیریابی شبکه‌ی حمل‌ونقل شهری مواد پرخطر با هدف کمینه‌کردن ریسک اجتماعی و طول سفر و حل آن به کمک یک الگوریتم ابتکاری
کرنیلیر و همکاران[۳۳]	۲۰۰۷	مطالعه و بررسی مسئله‌ی بازپرسازی ایستگاه‌های نفتی در شرایطی که مقادیر تحویل داده شده متغیرهای تصمیم هستند و این متغیرها مجاز به تغییر در یک بازه مشخص هستند
کرنیلیر و همکاران[۳۴]	۲۰۰۸	تعمیم مسئله‌ی بازپرسازی ایستگاه‌های نفتی، به حالت چنددوره‌یی و ارائه‌ی یک الگوریتم تقریبی چندمرحله‌یی برای حل آن
کرنیلیر و همکاران[۳۵]	۲۰۰۹	مطالعه‌ی مسئله‌ی بازپرسازی ایستگاه‌های نفتی را با فرض پنجره زمانی و ارائه‌ی دو روش تقریبی برای حل آن
ارهان ارکات و گازارا [۳۶]	۲۰۰۸	مدل کردن مسئله‌ی مسیریابی شبکه‌ی مواد نفتی به‌صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح دو سطحی با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی حمل و ریسک مسیر
دی و همکاران[۳۷]	۲۰۰۹	پیشنهاد یک روش تقریبی سه مرحله‌یی برای مسئله‌ی مسیریابی سیکلی موجودی‌های در یک شرکت تولیدی گاز دی اکسید کربن در هند
هانانگا و همکاران[۳۸]	۲۰۱۰	طرح مسئله‌ی مسیریابی حمل مواد نفتی را با در نظرگرفتن پنجره زمانی سخت برای تقاضا با هدف کمینه‌کردن کل تعداد وسایل نقلیه مورد استفاده، زمان کل سفر و ریسک
زاگرافوس و همکاران [۳۹]	۲۰۱۰	ارائه‌ی مسئله‌ی مسیریابی حمل مواد نفتی با در نظرگرفتن پنجره زمانی برای مسیر و ثابت نگه داشتن ترتیب سرویس‌دهی مشتریان با هدف کمینه‌کردن هزینه و ریسک مسیر
چاجاکیس و گویگنارد [۴۰]	۲۰۰۳	مطالعه و بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی تحویل فراورده‌ها با کامیون‌های مشابه چند کابینه و استفاده از الگوریتم لاگرانژین برای حل آن
اوزر و کتی[۴۱]	۲۰۱۲	مسئله‌ی توزیع فراورده‌ها روغنی متفاوت از یک کارخانه تولیدی به مشتریان صنعتی با استفاده از وسایل حمل‌ونقل غیر همگون. ناوگان حمل‌ونقل شامل کامیون‌های چند کابینه

ادامه‌ی جدول ۱.

ب) توزیع و حمل‌ونقل مواد نفتی با استفاده از خطوط لوله		
ساسیکومار و همکاران [۴۲]	۱۹۹۷	حل مسئله‌ی زمان‌بندی یک خط لوله که فراورده‌ها را از یک پالایشگاه دریافت می‌کند و چندین مخزن را که به‌طور پیوسته به هم مرتبط هستند تأمین می‌کند
ماگاتائو و همکاران [۴۳]	۲۰۰۲	ارائه‌ی یک روش برنامه‌ریزی خطی ترکیبی به‌منظور تصمیم‌گیری برای زمان‌بندی کالاها در یک خط لوله‌یی که هیچ‌گونه انشعابی ندارد
میلیدیو [۴۴]	۲۰۰۲	بررسی مسئله‌ی پیدا کردن یک جواب شدنی برای مسئله‌ی حمل‌ونقل نفتی خطوط لوله‌یی
ریدی [۴۵]	۲۰۰۴	ارائه‌ی یک مدل پیوسته و یک الگوریتم تکرار شونده برای حذف ترکیبات ناسازگار
ژانگ [۴۶]	۲۰۰۷	ادامه‌ی کار ریدی (۲۰۰۴) و توسعه‌ی روشی برای بهره‌برداری بهتر انرژی
میرحسنی و قربانعلیزاده [۴۷]	۲۰۰۸	ارائه‌ی یک الگوریتم برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی مشتقات نفتی
هران و همکاران [۴۸]	۲۰۱۰	مطالعه و بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی ارسال محموله‌ها از طریق خطوط لوله چندمحصولی
میرحسنی و جهرمی [۴۹]	۲۰۱۱	بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی کوتاه مدت توزیع مشتقات نفتی از یک پالایشگاه نفتی به تعدادی از مخازن در طول یک خطوط لوله‌ی سه‌ساختاری
هران و همکاران [۵۰]	۲۰۱۲	بررسی مسئله‌ی زمان‌بندی حمل‌ونقل و توزیع چندین محصول نفتی در سیستم چندگانه‌ی خطوط لوله
فیلهو و همکاران [۵۱]	۲۰۱۳	ارائه‌ی یک روش حل یا ابزار کارآمد و مؤثر برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی خطوط لوله
دسوزا و همکاران [۵۲]	۲۰۱۰	حل مسئله‌ی توزیع فراورده‌های نفتی در حالت دوهدفه با استفاده از NSGAII و الگوریتم ازدحام ذرات

-- تعداد، مکان و ظرفیت هریک از انبارهای اصلی و میانی مشخص و ثابت است.

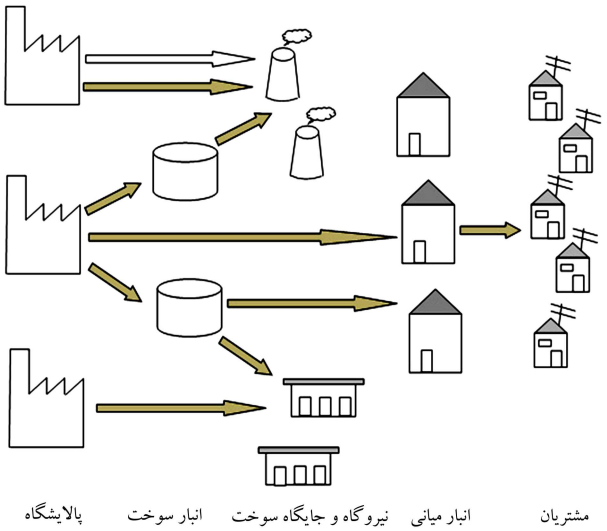
-- براساس قوانین، کل حجم یک فراورده‌ی نفتی که از طریق پالایشگاه‌ها در طول افق برنامه‌ریزی به شبکه‌ی مورد نظر وارد می‌شود از یک مقدار ثابت (POMPS) بیشتر نیست.

-- هرکامیون حتماً باید پر باشد تا پلمپ و سپس ارسال شود؛ از طرفی هرکامیون فقط برای یک مشتری ارسال می‌شود.

-- هرکامیون در هر روز فقط یک بار بارگیری می‌کند.

-- کمینه‌ی حجم قابل انتقال فراورده‌ها توسط خط لوله مشخص و قطعی است.

در شکل ۱ شمای کلی شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی در مسئله‌ی مورد نظر نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که دو روش متفاوت برای انتقال سوخت به نیروگاه وجود دارد: حمل‌ونقل جاده‌یی و حمل و نقل توسط خط لوله.



شکل ۱. شمای کلی شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی.

۱.۲. مدل ریاضی مسئله

اندیس‌ها و نمادگذاری به کار رفته در مدل ریاضی به شرح زیر است.

۱.۱.۲. مجموعه‌ها

P: مجموعه‌ی کلیه فراورده‌ها؛

J: مجموعه‌ی تمامی کامیون‌ها؛

V: مجموعه‌ی روزها؛

K: مجموعه‌ی مشتریان (جزئی)؛

I: مجموعه‌ی انبارهای میانی؛

F: مجموعه‌ی انبارهای اصلی؛

G: مجموعه‌ی جایگاه‌های سوخت؛

H: مجموعه‌ی نیروگاه‌ها؛

E: مجموعه‌ی پالایشگاه‌ها؛

O: مجموعه‌ی نوع کامیون‌ها.

۲.۱.۲. پارامترها

r_{jo}: اگر کامیون j از نوع o باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است؛

C_{ikpo}: هزینه‌ی انتقال محصول p توسط کامیون نوع o از انبار میانی i به مشتری

جزئی k؛

C'_{ehp}: هزینه‌ی انتقال هر واحد از محصول p از پالایشگاه e به نیروگاه h از طریق خط لوله؛

C''_o: هزینه‌ی شست‌وشوی کامیون نوع o؛

Cap_o: ظرفیت کامیون نوع o؛

D^K_{kpt}: تقاضای مشتری k از محصول p با موعد تحویل t؛

d^{ik}_{ijkp}: فاصله‌ی زمانی انبار میانی i تا مشتری k توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{ik}_{ikov}: اگر مسیر انبار میانی i تا مشتری k و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

S_{ip}: ظرفیت انبار میانی i برای محصول p؛

d^{fi}_{fjip}: فاصله‌ی زمانی انبار اصلی f تا انبار میانی i توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{fi}_{fiov}: اگر مسیر انبار اصلی f تا انبار میانی i و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

S'_{fp}: ظرفیت انبار اصلی f برای محصول p؛

a^{fh}_{fhov}: اگر مسیر انبار اصلی f تا نیروگاه h و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{fh}_{fjhp}: فاصله‌ی زمانی انبار اصلی f تا نیروگاه h توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{fg}_{fgov}: اگر مسیر انبار اصلی f تا جایگاه سوخت g و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{fg}_{fjgp}: فاصله‌ی زمانی انبار اصلی f تا جایگاه سوخت g توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{ei}_{eiov}: اگر مسیر پالایشگاه e تا انبار میانی i و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{ei}_{ejip}: فاصله‌ی زمانی پالایشگاه e تا انبار میانی i توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{eg}_{egov}: اگر مسیر پالایشگاه e تا جایگاه سوخت g و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{eg}_{ejgp}: فاصله‌ی زمانی پالایشگاه e تا جایگاه سوخت g توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{ef}_{efov}: اگر مسیر پالایشگاه e تا انبار اصلی f و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{ef}_{ejfp}: فاصله‌ی زمانی پالایشگاه e تا انبار اصلی f توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

a^{eh}_{ehov}: اگر مسیر پالایشگاه e تا نیروگاه h و بالعکس برای کامیون نوع o در روز v در دسترس باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

d^{eh}_{ejhp}: فاصله‌ی زمانی پالایشگاه e تا نیروگاه h توسط کامیون j که محصول p را حمل می‌کند؛

MV_p: کمینه‌ی حجم محصول p که می‌تواند توسط خط لوله انتقال یابد؛

Cap'_{eh}: ظرفیت روزانه خط لوله انتقال فراورده‌های نفتی از پالایشگاه e به نیروگاه h؛

D^G_{gpv}: میزان تقاضای جایگاه سوخت g از محصول p در روز v؛

D^H_{hpv}: میزان تقاضای نیروگاه h از محصول p در روز v؛

$POMPS_p$: بیشینه‌ی حجم محصول p که در طول افق برنامه‌ریزی می‌تواند به شبکه وارد شود؛

M: یک عدد اختیاری بزرگ.

۲.۲. متغیرهای تصمیم

y_{ijkptv}: اگر کامیون j از انبار میانی i در روز v برای برآورده‌کردن تقاضای مشتری k از محصول p که موعد تحویل آن روز t است اعزام شود برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

x_{fjipv}: اگر کامیون j از انبار اصلی f در روز v محصول p را جهت حمل به انبار میانی i بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

w_{fjhpv}: اگر کامیون j از انبار اصلی f در روز v محصول p را جهت حمل به نیروگاه h بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

z_{fjgpv}: اگر کامیون j از انبار اصلی f در روز v محصول p را جهت حمل به جایگاه سوخت g بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

b_{ejfpv}: اگر کامیون j از پالایشگاه e در روز v محصول p را جهت حمل به انبار اصلی f بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت صفر است؛

s_{ejipv}: اگر کامیون j از پالایشگاه e در روز v محصول p را جهت حمل به انبار میانی i بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

m_{ejhpv}: اگر کامیون j از پالایشگاه e در روز v محصول p را جهت حمل به نیروگاه h بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

n_{ejgpv}: اگر کامیون j از پالایشگاه e در روز v محصول p را جهت حمل به جایگاه g بارگیری کند برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

q_{jv}: اگر کامیون j در روز v در دسترس باشد (در حال حمل یک محصول نباشد) برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

$PIPE_{ehpv}$: حجم فراورده p که از پالایشگاه e در روز v از طریق خط لوله به نیروگاه h انتقال می‌یابد؛

$Clean_{jv}$: اگر کامیون j در روز v نیاز به شست‌وشو داشته باشد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

Q_{ipv}: موجودی انبار میانی از محصول p در روز v؛

Q'_{fpv}: موجودی انبار اصلی از محصول p در روز v؛

R_{ehpv}: اگر در روز v محصول p توسط خط لوله از پالایشگاه e به نیروگاه h انتقال یابد برابر ۱، و در غیر این صورت برابر صفر است؛

use_{jpv}: اگر مخزن کامیون j در روز v آغشته به محصول p باشد برابر ۱، و در غیر این‌صورت برابر صفر است (مخزن کامیون j از روزی که محصول p را بارگیری می‌کند تا زمانی که محصول دیگری را بارگیری کند آغشته به محصول p است).

۳.۲. تابع هدف

مدل ارائه شده دارای دو تابع هدف است. نخستین تابع هدف این مدل شامل کمینه‌کردن هزینه‌های حمل‌ونقل جاده‌یی، انتقال فراورده‌ها از طریق خط لوله و هزینه‌ی شست‌وشوی کامیون‌هاست. هزینه‌ی حمل‌ونقل جاده‌یی شامل هزینه‌های ارسال فراورده‌های نفتی توسط کامیون‌های ارسالی از انبارهای میانی به مشتریان جزئی، از انبارهای اصلی به انبارهای میانی، نیروگاه‌ها و جایگاه‌های سوخت و همچنین از پالایشگاه‌ها به انبارهای اصلی، انبارهای میانی، نیروگاه‌ها و جایگاه سوخت است.

$$\begin{aligned}\text{Min} \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{k\in K}\sum_{v\in V} y_{ijkptv} r_{jo} C_{ikpo} \\ + \sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\sum_{i\in I}\sum_{v\in V} x_{fjipv} r_{jo} C_{fipo} \\ + \sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\sum_{h\in H}\sum_{v\in V} w_{fjhpv} r_{jo} C_{fhpo} \\ + \sum_{f\in F}\sum_{j\in J}\sum_{g\in G}\sum_{v\in V} z_{fjgpv} r_{jo} C_{fgpo} \\ + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{f\in F}\sum_{v\in V} b_{ejfpv} r_{jo} C_{efpo} \\ + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{i\in I}\sum_{v\in V} s_{ejipv} r_{jo} C_{eipo} \\ + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{h\in H}\sum_{v\in V} m_{ejhpv} r_{jo} C_{ehpo} \\ + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{g\in G}\sum_{v\in V} n_{ejgpv} r_{jo} C_{egpo} \\ + \sum_{e\in E}\sum_{h\in H}\sum_{p\in P}\sum_{v\in V} PIPE_{ehpv} C'_{ehp} \\ + \sum_{j\in J}\sum_{v\in V} Clean_{jv} r_{jo} C''_{o} \end{aligned} \quad (۱)$$

دومین تابع هدف مدل ارائه‌شده شامل بیشینه‌کردن پوشش تقاضای مشتریانی است که تقاضاشان دارای پنجره زمانی است.

$$\text{Max} \frac{\sum_{t\in T}\sum_{i\in I}\sum_{j\in J} y_{ijkptv} r_{jo} Cap_o}{\sum_{k\in K}\sum_{p\in P}\sum_{t\in T} D^K_{kpt}} \quad (۲)$$

۴.۲. محدودیت‌ها

نخستین محدودیت تضمین می‌کند که کامیون j در روز v فقط به یک انبار و یک مشتری تخصیص می‌یابد و تنها یک محصول را حمل می‌کند که موعد نهایی تحویل آن محصول روز t است. با در نظرگرفتن این نکته که بین انبار میانی i و مشتری k فاصله‌ی زمانی وجود دارد، کامیون j باید زمانی بارگیری کند که با توجه به فاصله‌ی زمانی بتواند پیش از موعد تحویل، تقاضای مشتری را برآورده کند (محدودیت ۴). محدودیت ۵ تضمین می‌کند که کامیون j که در روز v بارگیری می‌شود، در آن روز در دسترس قرار دارد. به‌عبارت دیگر این محدودیت از تخصیص یک کامیون به مشتری جدید، تا زمانی که در حال خدمت‌دهی به مشتری دیگری است، جلوگیری می‌کند. هنگامی که یک کامیون به یک تقاضا از یک مشتری تخصیص می‌یابد تا زمانی که فراورده را به مشتری تحویل دهد و به انبار میانی بازگردد نمی‌تواند محصول جدیدی را بارگیری کند و در این مدت در دسترس نخواهد بود (محدودیت ۶). کامیون j از نوع o در صورتی برای حمل یک فراورده به یک مشتری تخصیص می‌یابد که مسیر بین انبار میانی تا مشتری مورد نظر برای آن نوع کامیون در طول مدت سفر در دسترس باشد. مجموع خروجی‌ها از هر انبار میانی در هر روز به‌ازای هر فراورده نباید بیشتر از موجودی آن انبار از آن محصول در آن روز باشد (محدودیت ۸). با توجه به ظرفیت مشخص انبارهای میانی برای هر نوع فراورده‌ی نفتی، موجودی هر انبار نباید از ظرفیت آن انبار برای آن فراورده بیشتر شود. موجودی هر انبار میانی از هر محصول در هر روز وابسته به موجودی روز قبل، مجموع میزان ارسال آن محصول به انبارهای میانی، جایگاه‌های سوخت و نیروگاه‌ها و میزان دریافت آن محصول از پالایشگاه‌ها و انبارهای اصلی است (محدودیت ۱۰). هر کامیون در هر روز فقط می‌تواند به یک انبار اصلی و یک انبار میانی تخصیص یابد و یک محصول را از انبار اصلی به انبار میانی حمل کند (محدودیت ۱۱). هر کامیون در هر روز در صورتی می‌تواند برای انتقال یک محصول از یک انبار اصلی به یک انبار میانی تخصیص یابد که در آن روز در دسترس باشد (محدودیت ۱۲). کامیونی که برای انتقال یک محصول از یک انبار اصلی به یک انبار میانی در یک روز بارگیری می‌کند، در تمام روزهایی که در حال حمل فراورده و بازگشت به مبدأ است در دسترس نیست (محدودیت ۱۳). هر کامیون در صورتی برای انتقال یک محصول از یک انبار اصلی به یک انبار میانی در یک روز بارگیری می‌کند که در تمام روزهایی که در حال حمل فراورده و بازگشت به مبدأ است، مسیر مورد نظر در دسترس باشد (محدودیت ۱۴). مجموع ظرفیت کامیون‌هایی که از انبار اصلی یک محصول را در یک روز به مقصد انبارهای میانی، جایگاه‌های سوخت و نیروگاه‌ها بارگیری می‌کند نمی‌تواند از موجودی آن انبار اصلی از آن محصول در آن روز بیشتر باشد (محدودیت ۱۵). موجودی هر انبار اصلی از هر محصول در هر روز وابسته به موجودی روز قبل، مجموع میزان ارسال آن محصول به انبارهای میانی، جایگاه‌های سوخت و نیروگاه‌ها و میزان دریافت آن محصول از پالایشگاه‌هاست. موجودی انبار اصلی از هر محصول در هر روز توسط محدودیت ۱۶ محاسبه می‌شود. در محدودیت ۱۷ موجودی هر انبار اصلی در هر روز از یک محصول نمی‌تواند از ظرفیت آن انبار برای آن محصول بیشتر باشد. محدودیت‌های ۱۸ تا ۲۱ محدودیت‌های مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از انبارهای اصلی به نیروگاه‌ها هستند؛ این عبارات به‌ترتیب بیان‌گر محدودیت تخصیص کامیون‌ها، محدودیت دسترسی به کامیون در روز بارگیری، محدودیت عدم دسترسی به کامیون در حین حمل محصول، و محدودیت دسترسی به مسیر در طول سفر (برای کامیونی که بارگیری می‌کند) است. محدودیت‌های ۲۲ تا ۲۵ نیز مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از انبارهای اصلی به جایگاه‌های سوخت هستند. محدودیت‌های ۲۶ تا ۲۹ محدودیت‌های مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از پالایشگاه‌ها به انبارهای میانی هستند؛ این عبارت‌ها به‌ترتیب بیان‌گر محدودیت تخصیص کامیون‌ها، محدودیت دسترسی به کامیون در روز بارگیری، محدودیت عدم دسترسی به کامیون در حین حمل محصول و محدودیت دسترسی به مسیر در طول سفر (برای کامیونی که بارگیری می‌شود) است. مشابه عبارات فوق، محدودیت‌های ۳۰ تا ۳۳ بیان‌گر محدودیت‌های مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از پالایشگاه‌ها به جایگاه‌های سوخت است. محدودیت‌های مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از پالایشگاه‌ها به انبارهای اصلی در عبارات ۳۴ تا ۳۷ بیان شده‌است. عبارات ۳۸ تا ۴۱ نیز بیان‌گر محدودیت‌های مرتبط با تخصیص کامیون و ارسال محصول از پالایشگاه‌ها به نیروگاه‌ها هستند. عبارات ۴۲ و ۴۳ مرتبط با انتقال فراورده‌های نفتی از پالایشگاه‌ها به نیروگاه‌ها توسط خط لوله‌اند؛ این عبارات تضمین می‌کنند که در صورت انتقال یک محصول از طریق خط لوله، محدودیت حداقل حجم قابل انتقال از آن محصول رعایت شود. محدودیت ۴۴ تضمین می‌کند که مجموع حجم کلیه‌ی فراورده‌هایی که در یک روز از یک پالایشگاه به یک نیروگاه از طریق خط لوله منتقل می‌شود از ظرفیت روزانه‌ی آن خط لوله بیشتر نباشد. محدودیت ۴۵ تضمین می‌کند که مجموع حجمی که در یک روز از یک محصول توسط کامیون‌ها از انبارهای اصلی و پالایشگاه‌ها به یک جایگاه سوخت حمل می‌شود از تقاضای روزانه آن جایگاه برای آن محصول کم‌تر نباشد. محدودیت ۴۶ برآورده‌کردن تقاضای نیروگاه‌ها را تضمین می‌کند؛ این عبارت بیان می‌کند که مجموع حجمی که از یک محصول توسط کامیون‌ها از انبارهای اصلی و پالایشگاه‌ها به یک نیروگاه حمل می‌شود و حجمی که توسط خط لوله از پالایشگاه‌ها انتقال می‌یابد از تقاضای روزانه آن نیروگاه برای آن محصول کم‌تر نباشد. محدودیت‌های

۴۷ تا ۵۴ بیان می‌دارند که هر کامیون در هر روز چه نوع محصولی را حمل می‌کند؛ چنانچه یک کامیون یک نوع محصول را از یک مبدأ به یک مقصد حمل کند، آن کامیون در طول مدت حمل‌ونقل به آن محصول تخصیص می‌یابد. محدودیت ۵۵ بیان می‌کند که هر کامیون در هر روز فقط می‌تواند حاوی یک نوع فراورده باشد. محدودیت‌های ۵۶ و ۵۷ بیان می‌کنند که چنانچه یک کامیون در یک روز فراورده‌یی را بارگیری کند مخزن کامیون حداقل تا زمانی که فراورده دیگری را بارگیری نکند حاوی همان نوع فراورده خواهد بود. محدودیت ۵۸ بیان می‌کند که چنانچه محصولی که یک کامیون حمل می‌کند تغییر کند، آن کامیون نیاز به شست‌وشو دارد. محدودیت ۵۹ تضمین می‌کند که کل حجم هر محصول که در طول افق زمانی برنامه‌ریزی به شبکه وارد می‌شود از حداکثر حجم مجاز آن محصول بیشتر نباشد. و بالاخره محدودیت نوع متغیرها را نشان می‌دهد.

$$\sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{p\in P} y_{ijkptv} \le ۱ \qquad \forall j,t,v \tag{۳}$$

$$y_{ijkptv} \le t - d^{ik}_{ijkp} - v + ۲ \qquad \forall i,j,k,p,t,v \tag{۴}$$

$$y_{ijkptv} \le q_{jv} \qquad \forall i,j,k,p,t,v \tag{۵}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{ik}_{ijkp}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - y_{ijkptv}\right) \qquad \forall i,j,k,p,t \tag{۶}$$

$$y_{ijkptv} \le a^{ik}_{ikol} r_{jo} \qquad \forall i,j,k,p,t,v,o,l = v,...,v+d^{ik}_{ijkp}-۱ \tag{۷}$$

$$\sum_{j\in J} y_{ijkptv} r_{jo} Cap_o \le Q_{ipv} \qquad \forall i,k,p,t,v,o \tag{۸}$$

$$Q_{ipv} \le S_{ip} \qquad \forall i,p,v \tag{۹}$$

$$\begin{aligned} Q_{ipv} =& Q_{ip(v-۱)} - \sum_{j\in J} y_{ijkptv} r_{jo} Cap_o \\ &+ \sum_{j\in J} x_{fjip\left(v-d^{fi}_{fjip}-۱\right)} r_{jo} Cap_o \\ &+ \sum_{j\in J} s_{ejip\left(v-d^{ei}_{ejip}-۱\right)} r_{jo} Cap_o \qquad \forall i,k,p,t,v,f,e,o \end{aligned} \tag{۱۰}$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{i\in I}\sum_{p\in P} x_{fjipv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۱۱}$$

$$x_{fjipv} \le q_{jv} \qquad \forall f,j,i,p,v \tag{۱۲}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{fi}_{fjip}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - x_{fjipv}\right) \qquad \forall f,j,i,p,v \tag{۱۳}$$

$$x_{fjipv} \le a^{fi}_{fiol} r_{jo} \qquad \forall f,j,i,p,v,o,l = v,...,v+d^{fi}_{fjip}-۱ \tag{۱۴}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{j\in J} x_{fjipv} r_{jo} Cap_o + \sum_{j\in J} z_{fjgpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{j\in J} w_{fjhpv} r_{jo} Cap_o \\ &\qquad \le Q'_{fpv} \qquad \forall f,i,p,v,g,h,o \end{aligned} \tag{۱۵}$$

$$\begin{aligned} Q'_{fpv} =& Q'_{fp(v-۱)} - \sum_{j\in J} x_{fjipv} r_{jo} Cap_o - \sum_{j\in J} w_{fjhpv} r_{jo} Cap_o \\ &- \sum_{j\in J} z_{fjgpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{j\in J} b_{ejfp\left(v-d^{ef}_{ejfp}-۱\right)} r_{jo} Cap_o \end{aligned}$$

$$\forall f,i,p,v,h,g,e,o \tag{۱۶}$$

$$Q'_{fpv} \le S'_{fp} \qquad \forall f,p,v \tag{۱۷}$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{h\in H}\sum_{p\in P} w_{fjhpv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۱۸}$$

$$w_{fjhpv} \le q_{jv} \qquad \forall f,j,h,p,v \tag{۱۹}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{fh}_{fjhp}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - w_{fjhpv}\right) \qquad \forall f,j,h,p,v \tag{۲۰}$$

$$w_{fjhpv} \le a^{fh}_{fhol} r_{jo} \qquad \forall f,j,h,p,v,o,l = v,...,v+۲d^{fh}_{fjhp}-۱ \tag{۲۱}$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{g\in G}\sum_{p\in P} z_{fjgpv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۲۲}$$

$$z_{fjgpv} \le q_{jv} \qquad \forall f,j,g,p,v \tag{۲۳}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{fg}_{fjgp}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - z_{fjgpv}\right) \qquad \forall f,j,g,p,v \tag{۲۴}$$

$$z_{fjgpv} \le a^{fg}_{fgol} r_{jo} \qquad \forall f,j,g,p,v,o,l = v,...,v+۲d^{fg}_{fjgp}-۱ \tag{۲۵}$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{i\in I}\sum_{p\in P} s_{ejipv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۲۶}$$

$$s_{ejipv} \le q_{jv} \qquad \forall e,j,i,p,v \tag{۲۷}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{ei}_{ejip}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - s_{ejipv}\right) \qquad \forall e,j,i,p,v \tag{۲۸}$$

$$s_{ejipv} \le a^{ei}_{eiol} r_{jo} \qquad \forall e,j,i,p,v,o,l = v,...,v+۲d^{ei}_{ejip}-۱ \tag{۲۹}$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{g\in G}\sum_{p\in P} n_{ejgpv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۳۰}$$

$$n_{ejgpv} \le q_{jv} \qquad \forall e,j,g,p,v \tag{۳۱}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{eg}_{ejgp}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - n_{ejgpv}\right) \qquad \forall e,j,g,p,v \tag{۳۲}$$

$$n_{ejgpv} \le a^{eg}_{egol} r_{jo} \qquad \forall e,j,g,p,v,o,l = v,...,v+۲d^{eg}_{ejgp}-۱ \tag{۳۳}$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{f\in F}\sum_{p\in P} b_{ejfpv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۳۴}$$

$$b_{ejfpv} \le q_{jv} \qquad \forall e,j,f,p,v \tag{۳۵}$$

$$\sum_{u=v+۱}^{v+۲d^{ef}_{ejfp}-۱} q_{ju} \le M\left(۱ - b_{ejfpv}\right) \qquad \forall e,j,f,p,v \tag{۳۶}$$

$$b_{ejfpv} \le a^{ef}_{efol} r_{jo} \qquad \forall e,j,f,p,v,o,l = v,...,v+۲d^{ef}_{ejfp}-۱ \tag{۳۷}$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{h\in H}\sum_{p\in P} m_{ejhpv} \le ۱ \qquad \forall j,v \tag{۳۸}$$

$$m_{ejhpv} \le q_{jv} \qquad \forall e,j,h,p,v \tag{۳۹}$$

$$\sum_{u=v+1}^{v+2d^{eh}_{ejhp}-1} q_{ju} \le M\,(1 - m_{ejhpv}) \qquad \forall e,j,h,p,v \qquad (40)$$

$$m_{ejhpv} \le a^{eh}_{ehol} r_{jo} \qquad \forall e,j,h,p,v,o,l = v,\ldots,v+2d^{eh}_{ejhp}-1 \qquad (41)$$

$$PIPE_{ehpv} \ge MV_p R_{ehpv} \qquad \forall e,h,p,v \qquad (42)$$

$$R_{ehpv} M \ge PIPE_{ehpv} \qquad \forall e,h,p,v \qquad (43)$$

$$\sum_{p\in P} PIPE_{ehpv} \le Cap'_{eh} \qquad \forall e,h,v \qquad (44)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{j\in J} z_{fjgpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J} n_{ejgpv} r_{jo} Cap_o \ge D^G_{gpv} \qquad \forall g,p,v,o \qquad (45)$$

$$\sum_{f\in F}\sum_{j\in J} w_{fjhpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J} m_{ejhpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E} PIPE_{ehpv} \ge D^H_{hpv} \qquad \forall h,p,v,o \qquad (46)$$

$$use_{jpv} \ge y_{ijkptv} \qquad \forall i,j,k,p,t,v \qquad (47)$$

$$use_{jpv} \ge x_{fjipv} \qquad \forall f,j,i,p,v \qquad (48)$$

$$use_{jpv} \ge w_{fjhpv} \qquad \forall f,j,h,p,v \qquad (49)$$

$$use_{jpv} \ge z_{fjgpv} \qquad \forall f,j,g,p,v \qquad (50)$$

$$use_{jpv} \ge s_{ejipv} \qquad \forall e,j,i,p,v \qquad (51)$$

$$use_{jpv} \ge b_{ejfpv} \qquad \forall e,j,f,p,v \qquad (52)$$

$$use_{jpv} \ge m_{ejhpv} \qquad \forall e,j,h,p,v \qquad (53)$$

$$use_{jpv} \ge n_{ejgpv} \qquad \forall e,j,g,p,v \qquad (54)$$

$$\sum_{p\in P} use_{jpv} = 1 \qquad \forall j,v \qquad (55)$$

$$use_{jpv} \ge use_{jp(v-1)} - My_{ijkptv} - Mx_{fjipv} - Mw_{fjhpv} - Mz_{fjgpv} - Ms_{ejipv} - Mb_{ejfpv} - Mm_{ejhpv} - Mn_{ejgpv} \qquad \forall i,j,k,p,t,v,f,h,g,e \qquad (56)$$

$$use_{jpv} \le use_{jp(v-1)} + My_{ijkptv} + Mx_{fjipv} + Mw_{fjhpv} + Mz_{fjgpv} + Ms_{ejipv} + Mb_{ejfpv} + Mm_{ejhpv} + Mn_{ejgpv} \qquad \forall i,j,k,p,t,v,f,h,g,e \qquad (57)$$

$$use_{jpv} - use_{jp(v-1)} \le Clean_{jv} \qquad \forall j,p,v \qquad (58)$$

$$\sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{v\in T} m_{ejhpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{v\in T} n_{ejgpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{v\in T} b_{ejfpv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{j\in J}\sum_{v\in T} s_{ejipv} r_{jo} Cap_o + \sum_{e\in E}\sum_{h\in H}\sum_{v\in T} PIPE_{ehpv} \le POMPS_p \qquad \forall h,p,g,f,i,o \qquad (59)$$

$$y_{ijkptv}, x_{fjipv}, w_{fjhpv}, z_{fjgpv}, s_{ejipv}, b_{ejfpv}, m_{ejhpv}, n_{ejgpv}, use_{jpv}, R_{ehpv}, q_{jv}, Clean_{jv} = 0 \text{ or } 1 \qquad (60)$$

۳. روش حل

مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل یکی از مسائل پیچیده در مدیریت زنجیره‌ی تأمین است. این مسائل در زمره‌ی مسائل غیر چندجمله‌یی معین سخت (NP-Hard) قرار دارند. مدل برنامه‌ریزی ارائه شده در این پژوهش، به دلیل در نظرگرفتن مفروضات متنوع، از پیچیدگی مضاعفی نیز برخوردار است. از این رو، حل دقیق مسائل با ابعاد دنیای واقعی در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. با توجه به این که مسئله‌ی مورد بررسی دارای دو تابع هدف است، حل آن باید توسط الگوریتم‌هایی صورت گیرد که از قابلیت حل مسائل با اهداف چندگانه برخوردارند. لذا روش مورد استفاده در نوشتار حاضر، روش فرااِبتکاری NSGAII است. در ادامه، اصول پیاده‌سازی این روش برای مدل ارائه شده تشریح شده است.

۱.۳. نمایش جواب و شدنی بودن

نخستین مرحله در طراحی یک الگوریتم ژنتیک، تعیین نحوه‌ی نمایش جواب مسئله‌به‌صورت یک کروموزوم است. به‌منظور حل مسئله‌ی مورد نظر، یک ساختار سلسله‌مراتبی برای نحوه‌ی نمایش جواب مسئله‌در نظرگرفته شده است. ساختار ارائه شده ماتریسی است که دارای سه سطر است و تعداد ستون‌های آن برابر است با مجموع تعداد کل کامیون‌ها و تعداد خطوط لوله. هر ستون ماتریس نشان‌دهنده‌ی یک کامیون یا یک خط لوله است. در مسئله‌ی مورد نظر، به هر تقاضا یک عدد تعلق می‌گیرد که شماره آن تقاضا را بیان می‌کند. در بخش اول، سطر سوم کروموزوم، نوع فعالیت کروموزوم را تعیین می‌کند. با توجه به این که کامیون‌ها می‌توانند دو نقش متفاوت ایفا کنند، دو نوع فعالیت برای کامیون‌ها در نظرگرفته شده است: ۱. انتقال فراورده‌های نفتی برای پاسخ‌گویی به تقاضای مشتریان شامل نیروگاه‌ها، جایگاه‌های سوخت و مشتریان جزئی؛ ۲. انتقال فراورده‌های نفتی از پالایشگاه‌ها یا انبارهای اصلی به انبارهای میانی. چنانچه سطر سوم عدد ۱ را نشان دهد، سطر اول بیان‌گر شماره تقاضایی است که توسط آن کامیون ارسال می‌شود و سطر دوم نشان‌دهنده‌ی محل تأمین تقاضا (انبار میانی، انبار اصلی یا پالایشگاه) است. بخش دوم کروموزوم مربوط به انتقال فراورده‌های نفتی توسط خط لوله است. در این بخش، سطر سوم همواره عدد ۳ را اخذ می‌کند که موجب تمیز این بخش از بخش نخست کروموزوم می‌شود، سطر اول شماره تقاضا را نشان می‌دهد و سطر دوم بیان‌گر حجم محصول ارسالی توسط خط لوله است.

یکی از نکات حائز اهمیت در طراحی کروموزوم، موضوع شدنی بودن جواب حاصل از آن است. در مسئله‌ی حاضر، جواب‌های اولیه به‌گونه‌یی تولید می‌شوند که شدنی باشند و در مراحل مختلف الگوریتم نیز عملگرها به‌گونه‌یی تعریف می‌شوند که شدنی‌بودن جواب‌ها حفظ شود.

۲.۳. تولید جمعیت اولیه

فرایند شروع الگوریتم ارائه‌شده شامل تولید یک جمعیت اولیه از تعداد مشخصی از جواب‌هاست. در الگوریتم ارائه شده، افراد جمعیت اولیه به‌صورت تصادفی، و به‌گونه‌یی تولید می‌شوند که جواب‌های حاصل شدنی باشند.

در الگوریتم ارائه شده، علاوه بر تولید جواب‌های اولیه‌ی تصادفی به‌صورت شدنی از یک رویکرد ابتکاری نیز به‌منظور بهبود جواب‌ها استفاده می‌شود. در این رویکرد ابتدا تقاضاهای فوری شناسایی شده و تخصیص می‌یابد، و سپس سایر

تقاضاهای عادی، و نیز ارسال فراورده‌ها از انبارهای اصلی و پالایشگاه‌ها به انبارهای میانی در نظر گرفته می‌شوند.

۳.۳. محاسبه‌ی مقدار برازندگی

با توجه به این که مسئله‌ی مورد بررسی دارای دو هدف کمینه‌کردن کل هزینه‌ی حمل‌ونقل (شامل هزینه‌ی حمل‌ونقل توسط کامیون‌ها، هزینه‌ی حمل مواد توسط خط لوله و هزینه‌ی شست‌وشوی کامیون‌ها)، و بیشینه‌کردن سطح پوشش تقاضا در پنجره زمانی مربوطه است، برازندگی هریک از افراد جمعیت براساس این توابع هدف محاسبه می‌شود. در الگوریتم ارائه شده به جای بیشینه کردن سطح پوشش تقاضا از کمینه کردن نسبت تقاضاهای برآورده نشده (میزان عدم پوشش تقاضا) استفاده شده است.

۴.۳. تقاطع

عملگر تقاطع به‌منظور ایجاد تنوع در جمعیت و همچنین بهبود نقاط جست‌وجو انجام می‌شود و وظیفه‌اش هدایت الگوریتم برای جست‌وجوی تمام فضای شدنی است. در الگوریتم ارائه شده از عملگر تقاطع تک‌نقطه[1] در بخش مربوط به کامیون‌ها، و از تقاطع حسابی[2] در بخش مربوط به خطوط لوله استفاده شده است. در عملگر تقاطع تک‌نقطه، فرزند اول از ترکیب اطلاعات بخش نخست والد اول و بخش دوم والد دوم ایجاد می‌شود. به‌صورت مشابه، فرزند دوم از ترکیب بخش دوم والد اول و بخش نخست والد دوم به دست می‌آید. در عملگر تقاطع حسابی که معمولاً برای اعداد پیوسته به کار می‌رود، مقادیر ژن‌های متناظر در والدین با استفاده از توابع ساده ریاضی ترکیب شده و مقادیر ژن‌های فرزندان به دست می‌آید. با توجه به این که پس از اجرای عملگر تقاطع تک‌نقطه در بخش کامیون‌ها و عملگر تقاطع حسابی در بخش خطوط لوله شدنی نبودن فرزندان ممکن است، این عملگرها با انجام پاره‌یی تغییرات به‌گونه‌یی تعریف شده‌اند که شدنی بودن جواب‌ها حفظ شود.

۵.۳. جهش

در الگوریتم ارائه شده از یک عملگر جهش ابتکاری استفاده می‌شود و توسط آن مقادیر ژن‌ها به‌گونه‌یی تغییر می‌یابد که شدنی بودن جواب نیز حفظ شود. گام‌های عملگر جهش ارائه شده چنین است:

۱. مجموعه‌ی تقاضاهای فوری و مجموعه‌ی تقاضاهای برآورده نشده را تعیین کن.

۲. در طول کروموزوم به‌صورت تصادفی از میان ژن‌ها، ژنی را انتخاب کن که کامیون متناظرش به یک تقاضای فوری اختصاص نیافته است. اگر ژن انتخاب شده در بخش مربوط به کامیون‌ها قرار دارد به گام ۳ برو و اگر در بخش مربوط به خطوط لوله قرار دارد به گام ۴ برو.

۳. از میان مجموعه‌ی تقاضاهای برآورده نشده مجموعه‌ی تقاضاهای مناسب را به‌گونه‌یی انتخاب کن که حجم تقاضا متناسب با ظرفیت کامیون متناظر با ژن انتخابی باشد و مسیر مورد نظر برای کامیون در دسترس باشد. اگر مجموعه‌ی تقاضاهای مناسب تهی است، توقف کن. در غیر این صورت، یک تقاضا را به‌صورت تصادفی از میان مجموعه‌ی تقاضای مناسب انتخاب کن و به کامیون متناظر با ژن انتخابی تخصیص بده و توقف کن.

۴. حجم فراورده‌ی ارسالی از طریق خط لوله را به‌صورت تصادفی در بازه مجاز تعیین کن.

۴. مطالعه‌ی موردی، استان کردستان

مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی استان کردستان مسئله‌یی بسیار پیچیده با مؤلفه‌های زیاد است. در حال حاضر این برنامه‌ریزی براساس روش‌های سنتی صورت می‌گیرد. در این مسئله، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل چهار نوع فراورده شامل بنزین، نفت سفید، نفت گاز و نفت کوره مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس داده‌های جمع‌آوری شده، ۶۷ مشتری جزء، ۶۴ جایگاه سوخت و ۱ نیروگاه در شهر سنندج به‌عنوان مصرف‌کنندگان فراورده‌های نفتی استان کردستان در نظر گرفته می‌شود. مشتریان در ۱۰ شهر مختلف استان شامل سروآباد، دهگلان، دیواندره، قروه، کامیاران، مریوان، سقز، سنندج، بیجار و بانه واقع شده‌اند. چهار انبار میانی در استان کردستان قرار دارد که در شهرهای سقز، سنندج، بیجار و بانه واقع شده‌اند. مبادی تأمین فراورده‌های نفتی استان کردستان ۷ پالایشگاه و انبار اصلی است که در شهرهای اراک، ماهشهر، تبریز، کرمانشاه، همدان، میاندوآب و تهران قرار دارند.

میزان تقاضای مشتریان، هزینه‌ی حمل‌ونقل هر نوع فراورده توسط کامیون‌ها و نیز توسط خط لوله و هزینه‌ی شست‌وشوهای لازم، ظرفیت انبارهای میانی و فاصله‌ی بین شهرها براساس داده‌های واقعی برآورد شده‌اند. حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی در استان کردستان توسط سه نوع کامیون با ظرفیت‌های مختلف صورت می‌گیرد. در مجموع ۲۲۶ کامیون از انواع مختلف در دسترس‌است. علاوه بر این، یک خط لوله به‌منظور انتقال فراورده‌های نفتی به نیروگاه سنندج مورد استفاده قرار می‌گیرد.

الگوریتم ارائه شده در بخش ۳، برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی استان کردستان، توسط نرم‌افزار MATLAB و نسخه‌ی R۲۰۱۰a کدنویسی شده است و در سیستم رایانه‌ی همراه با مشخصات پردازشگر Core i۳ ۲٫۱۳ GHZ و حافظه جانبی ۳ GB اجرا شده است. نتایج حاصل از تنظیم پارامتر با استفاده از طرح عاملی کسری، پیش از اجرای الگوریتم، بدین قرار است: اندازه جمعیت ۱۰۰، نرخ تقاطع ۰٫۸، نرخ جهش ۰٫۲، پارامتر تقاطع حسابی ۰٫۱ و تعداد نسل‌ها ۱۰۰ است. زمان اجرای الگوریتم برای این مسئله ۳۴۹ ثانیه بوده است. با توجه به این که مسئله‌ی مورد بررسی یک مسئله‌ی بسیار پیچیده در ابعاد واقعی است، زمان اجرای الگوریتم یک زمان منطقی و قابل قبول است. خروجی به دست آمده از این الگوریتم شامل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل روزانه کامیون‌ها، نحوه‌ی تخصیص انواع مختلف کامیون‌ها به مشتریان، و میزان ارسال‌ها با در نظرگرفتن محدودیت‌های مختلف و متنوع است. با توجه به این که مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی یک مسئله‌ی دوهدفه است، جواب به دست آمده بیان‌گر مجموع هزینه‌ها و میزان عدم پوشش تقاضاست. معیارهای مختلفی برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های تکاملی چندهدفه وجود دارد. مهم‌ترین معیارهای ارزیابی به کار گرفته شده در این پژوهش عبارت‌اند از:[۵۳]

الف) **تعداد جواب پارتو:** این معیار ارائه‌دهنده‌ی تعداد جواب‌های پارتو به دست آمده از حل مسئله توسط الگوریتم‌های فرابتکاری چندهدفه است.

ب) **سنجش فاصله:** این معیار به‌منظور روشن ساختن میزان پراکندگی جواب‌ها در منحنی پارتو حاصله مورد استفاده قرار می‌گیرد، و با استفاده از معادلات ۶۱ تا ۶۳ محاسبه می‌شود:

$$S = [\frac{۱}{n-۱}\sum_{i=۱}^{n}(s_i - \bar{s})^۲]^{\frac{۱}{۲}} \qquad (۶۱)$$

$$s_i = \min_j(\sum_{k=1}^{m} \left| f_k^i - f_k^j \right|) \qquad j = 1,...,n \quad j \neq i \qquad (۶۲)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_i \qquad (۶۳)$$

در این معادلات $\bar{s}$ میانگین s_iها، n تعداد جواب‌های پارتو قرارگرفته در جبهه‌ی پارتو مورد نظر، و m تعداد توابع هدف است. به‌منظور محاسبه‌ی s_iها، نقاط همسایه‌ی مجاور مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از آن، مقدار S محاسبه می‌شود که نشان‌دهنده‌ی معیار فاصله است. مقدار این معیار هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، معیار فاصله جواب‌های بهتری را ارائه می‌دهد.

ج) **پراکندگی:** این معیار مجموع دامنه‌ی حاصل از تفریق بیشینه مقدار هر تابع هدف از مقدارکمینه‌ی آن را ارائه می‌کند. میزان بیشتر این معیار به‌وضوح جواب‌های پارتوی بهتری را نتیجه می‌دهد. معادله‌ی ۶۴ چگونگی محاسبه‌ی این معیار را نشان می‌دهد.

$$D = \sqrt[P]{\sum_{k=1}^{m} |f_k^{\max} - f_k^{\min}|^P} \qquad (۶۴)$$

در بیشتر موارد، مقدار P برابر با ۲ است. بدین طریق، رابطه‌ی اقلیدسی که واقع‌بینانه‌تر از معیارهای نظیر بیشینه مقدار و پله‌یی است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به ماهیت تصادفی الگوریتم‌های تکاملی، الگوریتم ارائه شده برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی فراورده‌های نفتی استان کردستان ۱۰ بار اجرا شد و نتایج به دست آمده ثبت شد. معیارهای ارزیابی برای هر یک از ۱۰ اجرا محاسبه شد. میانگین معیارهای ارزیابی محاسبه شده در جدول ۲ ارائه شده است.

در بهترین جواب به دست آمده از ۱۰ بار اجرای الگوریتم ارائه شده، تعداد ۱۰۰ جواب پارتو به دست آمد. در شکل ۲ مرز پارتو به دست آمده در بهترین جواب نمایش داده شده است.

چنان که مشاهده می‌شود، مرز به دست آمده یک مرز مقعر است و پیوستگی جواب‌های به دست آمده تشخیص مرز پارتو را امکان‌پذیر می‌سازد. در جدول ۳ خلاصه اطلاعات مربوط به مقادیر تابع هدف ارائه شده است.

براساس نتایج به دست آمده از جواب‌های پارتو، هزینه‌ی حمل‌ونقل در بازه [۱۲۳۶۵۲/۹, ۲۲۵۲۸۲/۹] و میزان عدم پوشش تقاضا در بازه [۰/۰۶۴, ۰/۱۶۴] قرار دارد. گستردگی بازه‌های به دست آمده بیانگر توانایی الگوریتم در یافتن مرز پارتو است. نتایج محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی در جدول ۴ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، الگوریتم ارائه شده از کارایی بالایی برخوردار است. تعداد بالای جواب‌های پارتو به دست آمده بیانگر قابلیت الگوریتم ارائه شده در یافتن جواب‌های پارتو است. مقدار معیار سنجش فاصله با در نظرگرفتن این نکته که اختلاف بیشینه و کمینه‌ی مقدار هزینه‌ها در جواب‌های پارتو زیاد است، نشان می‌دهد که جواب‌های حاصله به‌صورت نسبتاً هموار و یکنواخت در فضای

جدول ۲. معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده برای بهترین جواب به دست آمده.

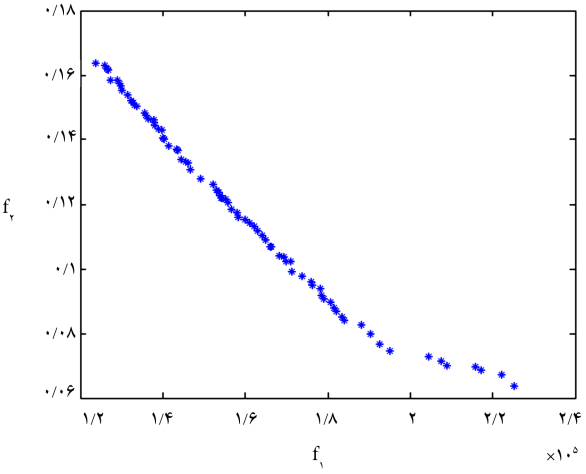
معیار	تعداد جواب‌های پارتو	سنجش فاصله	پراکندگی	زمان (ثانیه)
مقدار	۹۴/۳	۹۶۲/۴۹	۱۴۱۰۳۴/۳	۳۵۲/۶

جدول ۳. اطلاعات مربوط به مقادیر تابع هدف.

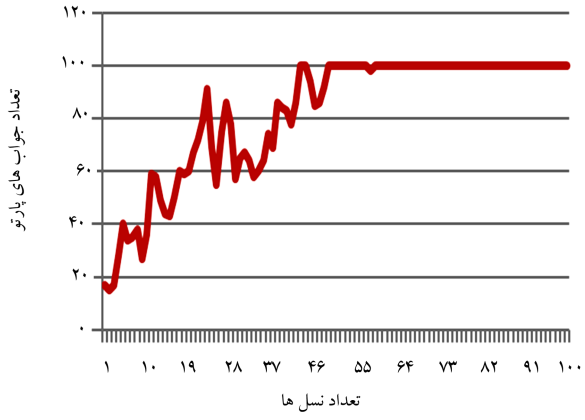
تابع هدف	هزینه‌های حمل‌ونقل	عدم پوشش تقاضا
میانگین	۱۵۹۷۱۱/۶	۰/۱۱۸
بیشینه	۲۲۵۲۸۲/۹	۰/۱۶۴
کمینه	۱۲۳۶۵۲/۹	۰/۰۶۴

جدول ۴. معیارهای ارزیابی کارایی الگوریتم ارائه شده.

معیار	تعداد جواب‌های پارتو	سنجش فاصله	پراکندگی	زمان (ثانیه)
مقدار	۱۰۰	۹۱۱/۷۴	۱۴۳۷۲۶/۵	۳۴۹



شکل ۲. مرز پارتو.



شکل ۳. تعداد جواب‌های غیر مغلوب به دست آمده در هر نسل.

جست‌وجو پراکنده شده‌اند. مقدار بسیار بالای معیار پراکندگی نشان‌دهنده‌ی پراکندگی مناسب و تنوع جواب‌های نامغلوب در مرز بهینه‌ی پارتو است.

به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم در طول فرایند تکامل، نمودار تعداد جواب‌های غیر مغلوب طی نسل‌ها رسم شده است (شکل ۳). شایان ذکر است که تعداد جواب‌های غیرمغلوب در هر نسل براساس جواب‌های حاصله در همان نسل محاسبه شده است. براساس مشاهدات شکل ۳، تعداد جواب‌های غیرمغلوب در نسل‌های پایانی با یکدیگر برابرند در حالی‌که کیفیت جواب‌ها در این نسل‌ها افزایش می‌یابد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

چنان که در بخش‌های قبلی ذکر شد، مسائل مربوط به توزیع و حمل فراورده‌های نفتی، نقش بسیار مهمی در اقتصاد کشور دارد اما اغلب تحقیقاتی که در این حوزه انجام شده‌اند در سطح بالادستی این زنجیره بوده و حمل‌ونقل توسط خط لوله را مد نظر قرار داده‌اند و از مفروضات ساده‌کننده در تعریف مسئله و حل آن استفاده کرده‌اند که منجر به جواب‌هایی متفاوت از دنیای واقعی شده و استفاده‌ی عملی از نتایج به‌دست آمده را با مشکل مواجه می‌کند. در مطالعه‌ی حاضر ضمن بررسی توزیع در سطح پایین‌دستی زنجیره‌ی تأمین فراورده‌های نفتی، سعی شده تا با اضافه کردن پنجره زمانی به مسئله‌ی مورد نظر، در نظرگرفتن چند کالای مختلف، درنظر گرفتن توزیع چندمرحله‌یی، استفاده از وسایل حمل جاده‌یی علاوه بر خط لوله به‌طور هم‌زمان و در نظرگرفتن تقاضا و عرضه به‌صورت فصلی، مسئله به دنیای واقعی نزدیک‌تر شده و قابلیت اتکا به جواب‌های به‌دست آمده در مسائل عملی افزایش یابد.

از این رو، ابتدا مدلی ریاضی که بتواند یک برنامه‌ی زمانی برای حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی شامل جدول زمان‌بندی حمل هریک از این فراورده‌ها ــ حاوی نوع، مقدار، وسیله‌ی حمل‌ونقل و مسیرهای حمل هریک از آن‌ها ــ در نظر بگیرد و هدف آن بیشینه‌کردن سطح پوشش تقاضا در پنجره زمانی مربوطه با کمینه‌کردن کل هزینه‌ی حمل‌ونقل فراورده‌ها باشد، ارائه شده است. مفروضات مدل ریاضی به‌گونه‌یی تعیین شده که حتی‌الامکان منطبق با شرایط دنیای واقعی باشد. با توجه به پیچیدگی بالای مسائل زمان‌بندی تحویل و توزیع، حل مسائل ابعاد بزرگ با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی در زمان معقول امکان‌پذیر نیست. از این رو، یک الگوریتم ژنتیک دوهدفه نیز به‌منظور حل مسئله در ابعاد بزرگ توسعه داده شده است. در الگوریتم ارائه شده از سازوکارهای ویژه شامل نحوه‌ی ایجاد جواب‌های اولیه و نحوه‌ی حفظ شدنی بودن جواب‌ها در هنگام اجرای عملگرها برای افزایش کارایی آن استفاده شده است. در انتها الگوریتم حل پیشنهادی برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی حمل ونقل در شبکه‌ی توزیع فراورده‌های نفتی استان کردستان مورد استفاده قرارگرفته است.

با توجه به مطالعات صورت گرفته در تحقیق حاضر، حوزه‌های زیر می‌توانند زمینه‌های جذابی برای انجام تحقیقات آتی قلمداد شوند:

- در نظرگرفتن مفروضات جدید در مسئله‌ی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی: در این پژوهش فرض شده است که هر کامیون تنها یک نوع فراورده را حمل می‌کند و تنها تقاضای یک مشتری را تحویل می‌دهد. در نظرگرفتن این مفروضات بدان علت بوده است که در کشور ایران و به‌طور ویژه در استان کردستان، از کامیون‌هایی که دارای چند مخزن باشند استفاده نمی‌شود. در نظرگرفتن مفروضاتی مانند چندمخزنی بودن کامیون‌ها، حمل چند نوع فراورده توسط یک کامیون به‌صورت هم‌زمان و برآورده‌کردن تقاضای چند مشتری در هر بار سفر توسط کامیون می‌تواند قابلیت مدل را در حل مسائل برنامه‌ریزی حمل‌ونقل فراورده‌های نفتی در سایر کشورها افزایش دهد.
- در نظرگرفتن سایر توابع هدف: در این تحقیق تابع هدف بیشینه‌کردن سطح پوشش تقاضا در پنجره زمانی مربوطه با کمینه‌کردن کل هزینه‌ی حمل‌ونقل فراورده‌ها مدنظر قرارگرفته شده است. در مسئله‌ی برنامه‌ریزی تحویل و توزیع فراورده‌های نفتی، سایر توابع هدف مانند اهداف زیست‌محیطی و پایداری شبکه را نیز می‌توان بررسی کرد.
- در نظرگرفتن عدم قطعیت در پارامترها: در تحقیق حاضر کلیه‌ی پارامترهای مسائل مختلف به‌صورت قطعی فرض شده‌است. توسعه‌ی مدل‌های احتمالی یا در نظرگرفتن پارامترهای مسئله به‌صورت اعداد فازی می‌تواند یکی از زمینه‌های جذاب برای تحقیقات آتی قلمداد شود.
- ارائه‌ی الگوریتم‌های حل فرا‌ابتکاری متفاوت: در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک دوهدفه برای حل مسئله‌ی پیشنهادی استفاده شده است. در ادامه این تحقیق می‌توان از روش‌های حل ابتکاری نظیر الگوریتم‌های مبتنی بر آزادسازی، و سایر روش‌های فرا‌ابتکاری چندهدفه مانند الگوریتم مورچگان، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و... استفاده کرد و نتایج حاصل از هرکدام از این الگوریتم‌ها را با یکدیگر مقایسه کرد.

پانوشت‌ها

1. single point crossover
2. arithmetic crossover

منابع (References)

1. An, H., Wilhelm, W.E. and Searcy, S.W. "Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review", *Biomass and Bioenergy*, **35**(9), pp. 3763-3774 (2011).
2. Federgruen, A. and Simchi-Levi, D. "Analysis of vehicle routing and inventory-routing problems", *Handbooks in Operations Research and Management Science*, **8**, pp. 297-373 (1995).
3. Rodrigue, J.-P., Comtois, C. and Slack, B., *The Geography of Transport Systems*, 3rd Edition, Routledge, 411 p. (2013).
4. Amiragov, K.A. and Nuriev, F.S. "Concerning certain algorithm for operative control of pumping in a multi-product pipeline", *Automation and Remote Control*, **8**, pp. 119-126 (1970).
5. Techo, R. and Holbrook, D.L. "Computer scheduling the world's biggest product pipeline", *Pipeline and Gas Journal*, **4**, pp. 27-34 (1974).
6. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Optimal scheduling of multiproduct pipeline systems using a non-discrete MILP formulation", *Computers & Chemical Engineering*, **28**(10), pp. 2053-2068 (2004).
7. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Multiperiod planning of multiproduct pipelines", *Computer Aided Chemical Engineering*, **20**, pp. 1453-1458 (2005).

8. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates", *Computers & Chemical Engineering*, **32**(4), pp. 728-753 (2008).
9. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Efficient tool for the scheduling of multiproduct pipelines and terminal operations", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **47**(24), pp. 9941-9956 (2008).
10. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Optimal scheduling of refined products pipelines with multiple sources", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **48**(14), pp. 6675-6689 (2009).
11. Cafaro, D.C. and Cerdá, J. "Short-term operational planning of multiple-source refined products pipelines", *Computer Aided Chemical Engineering*, **26**, pp. 429-433 (2009).
12. Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D., Fialho, J. and Pinheiro, A.S. "Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **45**(23), pp. 7841-7855 (2006)
13. Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. and Fialho, J. "Reactive scheduling framework for a multiproduct pipeline with inventory management", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **46**(17), pp. 5659-5672 (2007).
14. Relvas, S., Matos, H.A., Barbosa-Póvoa, A.P.F.D. and Fialho, J. "Oil products pipeline scheduling with tank farm inventory management", *Computer Aided Chemical Engineering*, **25**, pp. 277-282 (2008).
15. Magatão, L., Arruda, L.V.R. and Neves, F. "A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline", *Computers & Chemical Engineering*, **28**(1), pp. 171-185 (2004).
16. Rejowski, R. and Pinto, J.M. "Scheduling of a multiproduct pipeline system", *Computers & Chemical Engineering*, **27**(8), pp. 1229-1246 (2003).
17. Rejowski, R. and Pinto, J.M. "Efficient MILP formulations and valid cuts for multiproduct pipeline scheduling", *Computers & Chemical Engineering*, **28**(8), pp. 1511-1528 (2004).
18. Rejowski, R. and Pinto, J.M. "A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints", *Computers & Chemical Engineering*, **32**(4), pp. 1042-1066 (2008).
19. Neiro, S.M.S. and Pinto. J.M. "A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains", *Computers & Chemical Engineering*, **28**(6), pp. 871-896 (2004).
20. Brown, G.G. and Graves, G.W. "Real-time dispatch of petroleum tank trucks", *Management Science*, **27**(1), pp. 19-32 (1981).
21. Brown, G.G., Ellis, C.J., Graves, G.W. and Ronen, D. "Real-time, wide area dispatch of mobil tank trucks", *Interfaces*, **17**(1), pp. 107-120 (1987).
22. Franz, L.S. and Woodmansee, J. "Computer-aided truck dispatching under conditions of product price variance with limited supply", *Journal of Business Logistics*, **11**(1), pp. 127-139 (1990).
23. Ronen, D. "Dispatching petroleum products", *Operations Research*, **43**(3), pp. 379-387 (1995).
24. Bausch, D.O., Brown, G.G. and Ronen, D. "Consolidating and dispatching truck shipments of Mobil heavy petroleum products", *Interfaces*, **25**(2), pp. 1-17 (1995)
25. Nussbaum, M. and Sepulveda, M. "A fuel distribution knowledge-based decision support system", *Omega*, **25**(2), pp. 225-234 (1997).
26. Allah, D.T., Renaud, J. and Boctor, F.F. "Le problème d'approvisionnement des stations d'essence", *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **34**(1), pp. 11-33 (2000).
27. Ben Abdelaziz, F., Roucairol, C. and Bacha, C. "Deliveries of liquid fuels to SNDP gas stations using vehicles with multiple compartments", *Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on.*, IEEE, **1** (2002).
28. Maléпart, V., Boctor, F., Renaud, J. and Labilois, S. "Nouvelles approches pour l'approvisionnement des stations d'essence", Québec: Faculté des Sciences de L'administration de L'Université Laval, Direction de la Recherche (2000).
29. Avella, P., Boccia, M. and Sforza, A. "Solving a fuel delivery problem by heuristic and exact approaches", *European Journal of Operational Research*, **152**(1), pp. 170-179 (2004).
30. Fu, Z., Eglese, R. and Li. L.Y.O. "A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem", *Journal of the operational Research Society*, **56**(3), pp. 267-274 (2005).
31. Hamacher, H.W., Ruzika, S. and Tjandra, S.A. "Algorithms for time-dependent bicriteria shortest path problems", *Discrete Optimization*, **3**(3), pp. 238-254 (2006).
32. Shariat, A., Khodadadiyan, M. and Kalantari, N. "Routing hazardous materials in order to minimize risk in Urban transportation network", *The 2nd International Conference on Urban Disaster Reduction*, Taiwan (2007).
33. Cornillier, F., Boctor, F.F., Laporte, G. and Renaud, J. "An exact algorithm for the petrol station replenishment problem", *Journal of the Operational Research Society*, **59**(5), pp. 607-615 (2007).
34. Cornillier, F., Laporte, G., Boctor, F. and Renaud, J. "A heuristic for the multiperiod petrol station relpenishment problem" , *European Journal of Operational Research*, **191**(2), pp. 295-305 (2008).
35. Cornillier, F., Laporte, G., Boctor, F. and Renaud, J. "The petrol station replenishment problem with time windows", *Computers & Operations Research*, **36**(3), pp. 919-935 (2009).
36. Erkut, E. and Gzara, F. "Solving the hazmat transport network design problem", *Computers & Operations Research*, **35**(7), pp. 2234-2247 (2008).
37. Day, J.M., Wright, P.D., Schoenherr, T., Venkataramanan, M. and Gaudette, K. "Improving routing and scheduling decisions at a distributor of industrial gasses", *Omega*, **37**(1), pp. 227-237 (2009).

38. Pradhananga, R., Taniguchi, E. and Yamada, T. "Ant colony system based routing and scheduling for hazardous material transportation", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, **2**(3), pp. 6097-6108 (2010).

39. Androutsopoulos, K.N. and Zografos, K.G. "Solving the bicriterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **18**(5), pp. 713-726 (2010).

40. Chajakis, E.D. and Guignard, M. "Scheduling deliveries in vehicles with multiple compartments", *Journal of Global Optimization*, **26**(1), pp. 43-78 (2003).

41. Uzar, M.F. and Çatay, B. "Distribution planning of bulk lubricants at BP Turkey", *Omega*, **40**(6), p. 870-881 (2012).

42. Sasikumar, M., Prakash, P.R., Patil, Sh.M. and Ramani, S. "PIPES: A heuristic search model for pipeline schedule generation", *Knowledge-Based Systems*, **10**(3), pp. 169-175 (1997).

43. Magatao, L., Arruda, L.V.R. and Neves, F. "A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline", *Computer Aided Chemical Engineering*, **10**, pp. 715-720 (2002).

44. Milidiú, R.L., Pessoa, A.A. and Laber, E.S. "Pipeline transportation of petroleum products with no due dates", *Proceeding LATIN '02 Proceedings of the 5th Latin American Symposium on Theoretical Informatics*, pp. 248-262 (2002).

45. Reddy, P.Ch.P., Karimi, I.A. and Srinivasan, R. "A new continuous-time formulation for scheduling crude oil operations", *Chemical Engineering Science*, **59**(6), pp. 1325-1341 (2004).

46. Zhang, B.J. and Hua, B. "Effective MILP model for oil refinery-wide production planning and better energy utilization", *Journal of Cleaner Production*, **15**(5), pp. 439-448 (2007).

47. MirHassani, S.A. and Ghorbanalizadeh, M. "The multiproduct pipeline scheduling system", *Computers & Mathematics with Applications*, **56**(4), pp. 891-897 (2008).

48. Herrán, A., De la Cruz, J.M. and De Andrés, B. "A mathematical model for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system", *Computers & Chemical Engineering*, **34**(3), pp. 401-413 (2010).

49. MirHassani, S.A. and Jahromi, H.F. "Scheduling multiproduct tree-structure pipelines", *Computers & Chemical Engineering*, **35**(1), pp. 165-176 (2011).

50. Herrán, A., de la Cruz, J.M. and de Andrés, B. "Global search metaheuristics for planning transportation of multiple petroleum products in a multi-pipeline system", *Computers & Chemical Engineering*, **37**, pp. 248-261 (2012).

51. de Souza Filho, E.M., Bahiense, L. and Ferreira Filho, V.J.M. "Scheduling a multi-product pipeline network", *Computers & Chemical Engineering*, **53**, pp. 55-69 (2013).

52. Lopes, T.M.T., Ciré, A.A., de Souza, C.C. and Moura, A.V. "A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem", *Constraints*, **15**(2), pp. 151-189 (2010).

53. Knowles, J. and Corne, D. "On metrics for comparing nondominated sets", *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on.*, IEEE, **1**, pp. 711-716 (2002).