مدل برنامه‌ریزی توزیع فرآورده‌های نفتی با لحاظ محدودیت‌های ناوگان و زیرساخت‌های حمل‌ونقل در ایران

امیرحسین علافی‌پور [۱]، محمد تمنایی*[۲]، وحید ناصرزعیم [۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۲] استادیار گروه مهندسی برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، دانشکده مهندسی حمل‌ونقل، دانشگاه صنعتی اصفهان

[۳] ریاست اداره حمل‌ونقل زمینی شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی ایران

نوع مقاله: **ترویجی**

دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۷

چکیده

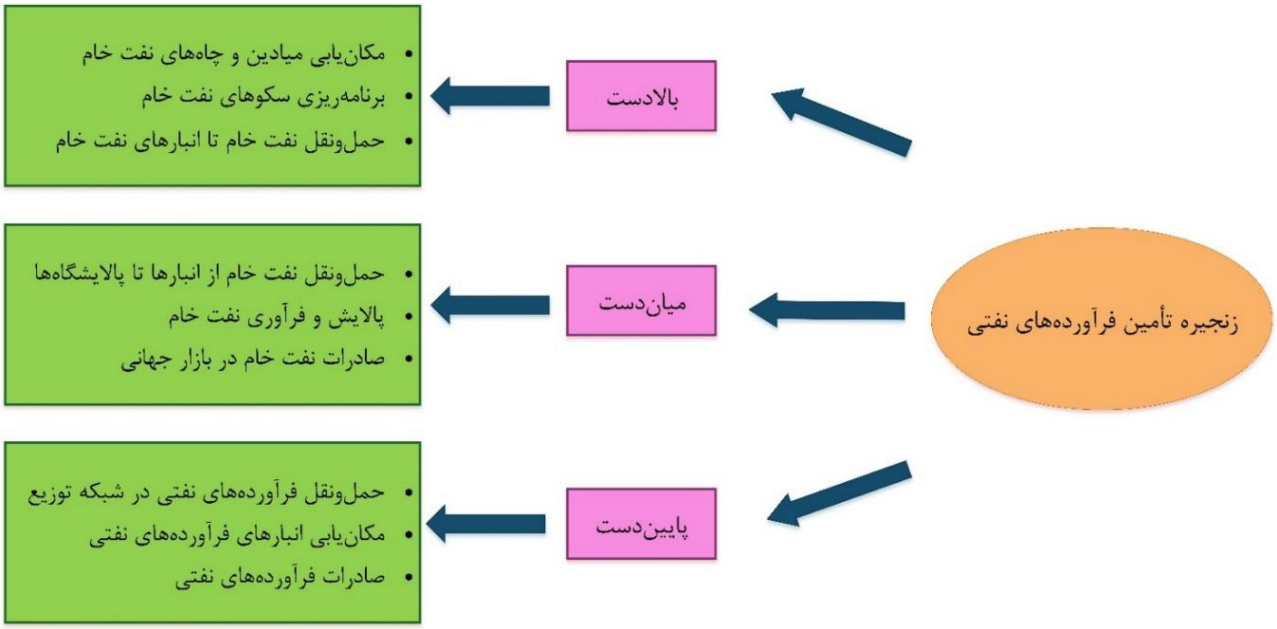
پالایشگاه‌ها، انبارها و نقاط تقاضا، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده شبکه توزیع فرآورده‌های نفتی هستند. پراکندگی نامتوازن اجزای تشکیل‌دهنده شبکه توزیع، افزایش تقاضا در سال‌های اخیر و تفاوت زیرساخت گونه‌های مختلف حمل‌ونقل بین اجزای تشکیل‌دهنده شبکه، توزیع بهینه فرآورده‌ها را می‌طلبد. در پژوهش حاضر، حمل‌ونقل بهینه‌ی فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه‌ها تا شبکه انبارها و از انبارها تا نقاط تقاضا، با استفاده از گونه‌های خط لوله، جاده و ریل، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته است. یک مدل بهینه‌سازی ریاضی LP با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل در شبکه تأمین فرآورده‌های نفتی، با رویکرد برآورد تقاضای مصرف‌کنندگان در یک افق زمانی مشخص ارائه شده است. برای حل مسئله، یک شبکه‌ی واقعی در نرم‌افزار بهینه‌سازی GAMS پیاده‌سازی شده و با استفاده از حل‌کننده‌ی CPLEX اجرا شده است. جهت ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی، سه سناریو مبتنی بر افزایش ظرفیت انبارها، افزایش تولیدات پالایشگاه‌ها و افزایش موجودی اولیه انبارها تعریف گردید. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی آن است که پیاده‌سازی هر یک از سناریوها سبب افزایش بهره‌وری گونه‌ی خط لوله و کاهش مجموع هزینه‌ها می‌گردد. بااین‌حال، در سناریوی افزایش تولیدات میزان کاهش هزینه‌ها بیشتر از سایر سناریوها است. هم‌چنین در سناریوی متناظر با افزایش تولیدات پالایشگاه‌ها، درصد حمل هر یک از فرآورده‌ها با خط لوله بیشتر از سایر سناریوها است. نتایج حاصله می‌تواند به عنوان ابزاری جهت برنامه‌ریزی یکپارچه و تضمین برآورده شدن تقاضای مصرف‌کنندگان، مورد استفاده مدیران در حوزه توزیع فرآورده‌های نفتی قرار گیرد.

کلمات کلیدی: زنجیره تأمین، بهینه‌سازی، فرآورده‌های نفتی، حمل‌ونقل

* m.tamannaei@iut.ac.ir

مقدمه

زنجیره تأمین[1] عبارت است از شبکه‌ای از تأمین‌کنندگان، واحدهای تولیدی، انبارها و کانال‌های توزیع که به‌صورت سازمان‌یافته مواد خام را تهیه نموده، سپس به محصولات نهایی تبدیل کرده و درنهایت محصولات نهایی را بین مشتریان توزیع می‌نمایند [۱]. فرآورده‌های نفتی نیز مانند سایر محصولات، بایستی پس از طی کردن فرآیندهای زنجیره تأمین خود به دست مشتریان برسند. فعالیت‌های زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی شامل استخراج نفت خام، فروش و صادرات آن، انتقال آن به پالایشگاه‌ها، فرآوری و تبدیل نفت خام به فرآورده‌های نفتی، توزیع فرآورده‌های نفتی در شبکه انبارها و ارسال آن‌ها به بازارهای مصرف است [۲]. زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی به سه قسمت بالادست[2]، میان‌دست[3] و پایین‌دست[4] طبقه‌بندی می‌شود [۳]. فعالیت‌های قسمت بالادست شامل مکان‌یابی میدان‌های نفتی، حفاری میدان‌های نفتی کشف شده و میزان بهره‌برداری از آن‌ها، برنامه‌ریزی سکوهای نفت خام و حمل‌ونقل آن‌ها از میدان‌های نفتی تا انبارهای نفت خام است [۳]. فعالیت‌های قسمت میان‌دست شامل فروش نفت خام در بازار جهانی، حمل‌ونقل نفت خام از انبارها تا پالایشگاه‌ها، پالایش آن و بهینه‌سازی فرآیندهای انجام شده در پالایشگاه‌ها است [۳]. درنهایت، فعالیت‌های عمده در قسمت پایین‌دست شامل توزیع فرآورده‌های نفتی مانند بنزین، نفت سفید، نفت گاز و نفت کوره، از پالایشگاه‌ها تا انبارها و از انبارها تا نقاط تقاضا، صادرات فرآورده‌های نفتی و ذخیره‌سازی آن‌ها است [۳]. در پژوهش حاضر، حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی در قسمت پایین‌دست شبکه توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس ادبیات موضوع ذکر شده، شکل ۱ به‌صورت شماتیک فعالیت‌های انجام شده در زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فعالیت‌های زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی

1- Supply chain
2- Upstream
3- Midstream
4- Downstream

جهت برنامه‌ریزی توزیع فرآورده‌های نفتی در زنجیره‌ی تأمین مذکور، بایستی از یک ابزار مناسب استفاده نمود. حوزه تحقیق در عملیات[۵] ابزارهای قدرتمند و کارآمدی را جهت برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای توزیع مناسب فرآورده‌های نفتی فراهم می‌کند [۴]. توزیع فرآورده‌های نفتی اگر به‌صورت بهینه اتخاذ نشود، می‌تواند باعث هدر رفتن منابع عظیم اقتصادی گردد و به دنبال آن تبعات اجتماعی و امنیتی را در پی خواهد داشت؛ بنابراین، انتظار می‌رود که استفاده مناسب از ابزارهای تحقیق در عملیات، از بروز عواقب ذکر شده فوق، جلوگیری کند. این ابزارها شامل بهینه‌سازی، نظریه بازی، نظریه گراف، نظریه صف، شبیه‌سازی و آنالیزهای تصمیم‌گیری است [۴]. در پژوهش حاضر با استفاده از ابزار بهینه‌سازی، یک مدل ریاضی LP جهت حمل‌ونقل بهینه فرآورده‌های نفتی در بخش پایین‌دست زنجیره‌ی تأمین ارائه شده است. هدف پیگیری شده در این مدل، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌ها از پالایشگاه‌ها تا شبکه انبارها و از انبارها تا نقاط تقاضا و مصرف‌کنندگان است.

مروری بر ادبیات

مطالعات و مقالات مرتبط با زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی را می‌توان به شکل‌های مختلف طبقه‌بندی کرد؛ ازجمله می‌توان به طبقه‌بندی بر اساس سطوح برنامه‌ریزی اشاره نمود. طبقه‌بندی بر مبنای سطوح برنامه‌ریزی شامل سه سطح استراتژیک[۶]، تاکتیکال[۷] و عملیاتی[۸] است. در سطح استراتژیک تأسیس و ساخت اجزای مختلف زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی شامل پالایشگاه‌ها، انبارها یا همان مراکز توزیع و خطوط لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد [۵]. در سطح تاکتیکال میزان استخراج نفت خام، حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی و انتخاب گونه‌ها تعیین می‌گردد [۵]. درنهایت در سطح عملیاتی، بهینه‌سازی تولیدات فرآورده‌ها در پالایشگاه‌ها، برنامه زمان‌بندی خط لوله و ناوگان جاده‌ای، تعیین تقاضا و مسیریابی گونه‌ها مشخص می‌شود [۵]. برخی از مسائل هم می‌توانند در دو یا هر سه سطح مورد بررسی قرار گیرند و سطوح مختلف بر یکدیگر تأثیر بگذارند.

مطالعات در سطح استراتژیک

مطالعات بسیاری در رابطه با ساخت و گسترش پالایشگاه‌ها، انبارها و خطوط لوله انجام گرفته است که ازجمله آن‌ها می‌توان به پژوهش اَلقحطانی و اِلکامل [۶] اشاره کرد. در این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی جهت کاهش هزینه‌های تولیدات محصولات در پالایشگاه‌ها ارائه شده است. برمبنای تابع هدف این مدل، ظرفیت واحدهای تولیدی فرآورده‌ها در پالایشگاه‌ها، گسترش یافته است. محدودیت‌هایی ازجمله ظرفیت تولید پالایشگاه‌ها، کیفیت محصولات تولیدی، تعادل جریان و برآورد تقاضا در نظر گرفته شده است. در این پژوهش هزینه‌های استخراج نفت خام نیز لحاظ شده است. از دیگر مطالعات در حوزه استراتژیک می‌توان به پژوهش فرناندز [۷] اشاره نمود. در این پژوهش مکان‌یابی انبارها، ساخت لینک برای گونه‌های مختلف و حمل‌ونقل فرآورده‌های تولیدی موردتوجه قرار گرفته است. هدف از این مقاله بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش فرآورده‌های نفتی است و محدودیت‌هایی از قبیل تعادل جریان، ظرفیت مخازن، برآورد تقاضا و عدم ساختن بیش از یک انبار و لینک در نظر گرفته شده است. کاظمی و همکاران [۲] در پژوهش خود به بررسی سطح پایین‌دست زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی پرداختند. در این پژوهش یک مدل

5- Operational research
6- Strategic level
7- Tactical level
8- Operational level

بهینه‌سازی ریاضی دو سطحی، جهت مکان‌یابی مراکز توزیع یا همان انبارها و نحوه توزیع تقاضای نواحی مختلف ارائه شده است. در سطح استراتژیک این مسئله، مکان احداث انبارها، تحت تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌های احداث آن‌ها و محدودیت‌هایی ازجمله ظرفیت انبارها و بودجه ساخت آن‌ها، تعیین می‌گردد. در پژوهشی دیگر مرادی‌نسب [۳] یک مدل بهینه‌سازی ریاضی در دو سطح استراتژیک و تاکتیکال با تابع هدف بیشینه‌سازی سود در ساخت و گسترش انبارها و خطوط لوله و توزیع فرآورده‌های نفتی ارائه نموده است. انتخاب برای ساختن انبارها و خطوط لوله و یا گسترش ظرفیت آن‌ها، تحت سناریوهای موجود، بر اساس محدودیت‌هایی ازجمله بودجه، ظرفیت انبارها و ظرفیت خطوط لوله در سطح استراتژیک تعیین می‌شود. پژوهش وانگ و همکاران [۸] در دو سطح استراتژیک و تاکتیکال برنامه‌ریزی شده است. در سطح استراتژیک به تأثیر ساخت یک خط لوله جدید بر کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل پرداخته شده است. تابع هدف در این سطح کمینه‌سازی هزینه‌های ساخت خطوط لوله است. محدودیت‌های در نظر گرفته شده در این سطح شامل الزام اتصال فقط دو انبار به یکدیگر و محدودیت بودجه هستند.

مطالعات در سطح تاکتیکال

ازجمله پژوهش‌هایی که در سطح تاکتیکال انجام شده است می‌توان به مطالعه اِسکودرو [۹] اشاره نمود. این پژوهش در دو سطح تاکتیکال و عملیاتی انجام شده است. در سطح تاکتیکال، تابع هدف ارائه شده در مدل بهینه‌سازی ریاضی، شامل کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی بین انبارهای مختلف، هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌ها بین انبارها و نقاط تقاضا و هزینه‌های نگهداری محصولات در انبارها است. همچنین محدودیت‌هایی ازجمله تعادل جریان، ظرفیت خط لوله و ظرفیت و موجودی انبارها نیز لحاظ شده است. مدل ذکر شده در این مقاله به‌صورت عدم قطعیت[9] نیز بیان شده است. غایثان و همکاران [۵] نیز مطالعه‌ای در سطح تاکتیکال زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی داشته اند. مدل ارائه شده در این پژوهش دارای دو تابع هدف است. تابع هدف اول برمبنای کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل نفت و گاز خام، فرآورده‌های نفتی و گازی و استخراج آن‌ها از چاه‌های نفت و گاز است. تابع هدف دوم متناظر با بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش نفت و گاز خام و فرآورده‌های آن‌ها است. در تابع هدف کمینه‌سازی هزینه‌ها، جریمه‌ای برای کمبود و یا اضافه محصولات، برای نقاط تقاضا در نظر گرفته شده است و محدودیت‌هایی همچون موجودی انبارها، ظرفیت مخازن، برآورد تقاضا و سطح سرویس پالایشگاه‌ها اعمال شده‌اند.

مدل ارائه شده در پژوهش کاظمی و همکاران [۲]، معطوف به برنامه‌ریزی در سطوح استراتژیک و تاکتیکال است. در سطح تاکتیکال، کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه تا انبارها و از انبارها تا نقاط تقاضا انجام شده است. محدودیت‌های در نظر گرفته شده برای این مدل عبارت‌اند از: ظرفیت انبارها، تولیدات پالایشگاه‌ها، تعادل جریان و سهم حمل‌ونقل فرآورده‌ها برای هر یک از گونه‌های تعریف شده. از دیگر مطالعات انجام شده در حوزه تاکتیکال می‌توان به پژوهش میرحسنی [۱۰] اشاره نمود. در این مطالعه، هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی از پالایشگاه‌ها به انبارها و سپس به نقاط تقاضا توسط چهار گونه خط لوله، جاده‌ای، ریلی و دریایی کمینه شده است. در تابع هدف، هزینه‌های نگهداری محصولات در انبارها و جریمه برای کمبود یا اضافه محصولات در نقاط تقاضا دیده شده است. محدودیت‌هایی همچون تعادل جریان در نقاط مختلف، برآورد تقاضا، موجودی انبارها و قدرت تخلیه و بارگیری گونه‌های مختلف در این پژوهش لحاظ گردیده است.

9- Uncertainty

در پژوهش مرادی‌نسب [۳]، در سطح تاکتیکال، توزیع و حمل‌ونقل فرآورده‌ها از نقاط تأمین تا نقاط تقاضا مورد بررسی قرار گرفته است. تابع هدف در این پژوهش، بیشینه‌سازی سود در حمل و نقل و فروش فرآورده‌ها است. محدودیت‌های موجود در این مقاله شامل ظرفیت انبارها، ظرفیت گونه‌های حمل و نقل، تعادل جریان و برآورد تقاضا هستند. سیِر [۱۱] نیز پژوهشی در سطح تاکتیکال انجام داده است که مرتبط با کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌ها از نقاط تأمین تا نقاط تقاضا با در نظر گرفتن گونه‌های مختلف حمل‌ونقل است. در پژوهش وِرما و همکاران [۱۲]، مدلی با دو تابع هدف، جهت کمینه نمودن هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی و کاهش ریسک‌پذیری، با استفاده از سیستم ریلی و جاده‌ای ارائه شده است و محدودیت‌هایی همچون ظرفیت ناوگان ریلی، برآورد تقاضا و زمان حمل فرآورده‌ها لحاظ گردیده است. وانگ و همکاران [۸]، در پژوهش خود در سطح تاکتیکال به توزیع بهینه‌ی فرآورده‌های نفتی پرداخته‌اند. تابع هدف در سطح تاکتیکال کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل است. محدودیت‌هایی همچون ظرفیت گونه‌های حمل‌ونقل، ظرفیت انبارها و تعادل فرآورده‌ها در هر انبار در نظر گرفته شده است.

مطالعات در سطح عملیاتی

مطالعه اِسکودرو [۹] ازجمله پژوهش‌هایی است که علاوه بر سطح تاکتیکال، به برنامه‌ریزی در سطح عملیاتی نیز پرداخته است. در این مقاله، علاوه بر کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل، موضوع زمان‌بندی ارسال و دریافت فرآورده‌ها و نیز میزان تأخیری که در ارسال و دریافت فرآورده می‌تواند رخ دهد، درنظر گرفته شده است.

از دیگر مقالاتی که در سطح عملیاتی انجام شده است، می‌توان به کیم و همکاران [۱۳] اشاره نمود. این پژوهش در سطح پایین‌دست زنجیره تأمین فرآورده‌های نفتی صورت گرفته است. تابع هدف در این مقاله برمبنای بیشینه‌سازی سود حاصل از فروش فرآورده‌های نفتی است. محدودیت‌های موجود در این پژوهش به‌گونه‌ای هستند که تولیدات برخی از فرآورده‌ها مانند بنزین با کیفیت بالا، در پالایشگاه‌ها به حداکثر میزان خود رسیده است.

نوآوری

با بررسی مطالعات پیشین در حوزه‌ی پایین‌دست زنجیره‌ی تأمین فرآورده‌های نفتی، مشخص گردید که در تعداد محدودی از آن‌ها، گونه‌های مختلف حمل‌ونقل جهت توزیع فرآورده‌ها لحاظ گردیده‌اند. به‌علاوه، بر اساس بهترین دانش ما، در مطالعات پیشین، تحویل روزانه‌ی تقاضای مصرف‌کنندگان همراه با لحاظ زمان حمل فرآورده‌ها بین قسمت‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین، تضمین نشده است. در پژوهش حاضر، یک مدل بهینه‌سازی ریاضی، باهدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌ها در حوزه‌ی پایین‌دست زنجیره‌ی تأمین فرآورده‌های نفتی، توسعه داده شده است. نوآوری‌های مدل پیشنهادی عبارت‌اند از:

- تضمین تحویل روزانه‌ی تقاضای مصرف‌کنندگان با لحاظ زمان حمل فرآورده‌ها در بخش‌های مختلف زنجیره‌ی تأمین
- به‌کارگیری گونه‌های مختلف حمل‌ونقل شامل خط لوله، جاده‌ای و ریلی و لحاظ ظرفیت شبکه‌ی خط لوله

فرضیات مسئله

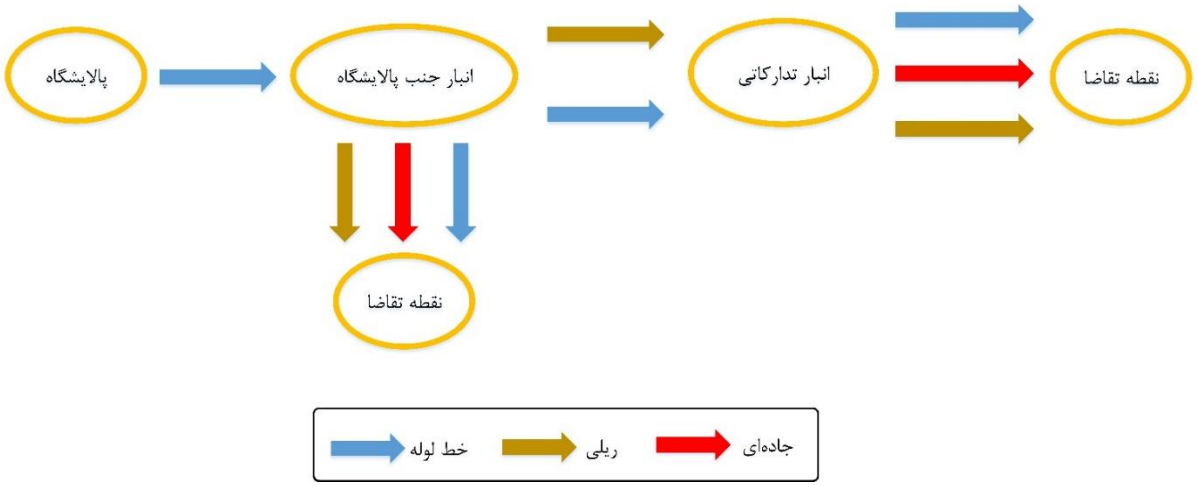
- سرعت حمل فرآورده‌ها در گونه‌ی خط لوله برابر ۶ کیلومتر بر ساعت، در گونه‌ی جاده‌ای به‌طور متوسط برابر ۹۰ کیلومتر بر ساعت و در گونه‌ی ریلی به‌طور متوسط برابر ۶۰ کیلومتر بر ساعت فرض گردیده است.
- زمان حمل فرآورده‌ها در گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای بین هر زوج مبدأ-مقصد برابر یک روز لحاظ شده است.

- پارامتر تقاضای روزانه به‌صورت قطعی[10] و یکنواخت[11] فرض شده است.
- در پژوهش حاضر، پارامترهای غیرقطعی[12] مرتبط با زنجیره‌ی تأمین فرآورده‌های نفتی (تغییر در ورودی نفت خام پالایشگاه‌ها، خرابی تأسیسات و ایستگاه‌های پمپاژ، خرابی خطوط لوله و...) به‌صورت قطعی لحاظ شده‌اند و فرض بر این است که تمامی تأسیسات در طول دوره‌ی برنامه‌ریزی در دسترس هستند.
- برخی از موانع عملیاتی ذخیره‌سازی فرآورده‌ها مانند زمان ته‌نشینی فرآورده‌ها در انبارها و زمان تعمیر و نگهداری انبارها در پارامترهای زمان حمل فرآورده‌ها لحاظ شده است.
- برخی از موانع عملیاتی انتقال فرآورده‌ها مانند زمان بارگیری و تخلیه‌ی فرآورده‌ها و زمان تشکیل و تفکیک واگن‌های ریلی در پارامترهای زمان حمل فرآورده‌ها لحاظ شده است.

تعریف مسئله

اجزای تشکیل دهنده شبکه توزیع فرآورده‌های نفتی عبارت‌اند از: پالایشگاه‌ها، انبارهای جنب پالایشگاه، انبارهای تدارکاتی و نقاط تقاضا شامل شهرها، صنایع و نیروگاه‌ها. نفت خام پس از استخراج از چاه‌های نفت، توسط خطوط لوله از انبارهای نفت خام به پالایشگاه‌ها منتقل می‌گردد و پس از فرآوری در پالایشگاه‌ها، به محصولاتی هم چون بنزین، نفت سفید، نفت گاز، نفت کوره، سوخت جت، گاز مایع و روان‌کننده‌ها تبدیل می‌شود. این فرآورده‌ها پس از تولید در پالایشگاه‌ها به انبارهای جنب پالایشگاه منتقل و در مخازن مربوط به هر فرآورده ذخیره می‌گردند. در مرحله بعد، فرآورده‌ها از انبارهای جنب پالایشگاه به انبارهای تدارکاتی ارسال می‌شوند. در آخرین قسمت از شبکه توزیع، فرآورده‌ها از انبارهای مختلف بر اساس کوتاه‌ترین فاصله به نقاط تقاضا ارسال می‌شوند. گونه‌های حمل‌ونقل خط لوله، جاده و سیستم ریلی وظیفه ارسال فرآورده‌ها را در بین قسمت‌های مختلف شبکه توزیع بر عهده دارند. در بین گونه‌های حمل‌ونقل، خط لوله کم‌هزینه‌ترین گونه محسوب می‌شود و امنیت بسیار بالا و خطرات زیست‌محیطی بسیار اندکی دارد [۱۴]. همچنین خط لوله قابلیت بالایی در حمل حجم انبوهی از فرآورده‌ها را دارد. این در حالی است که خوردگی خط لوله در اثر حرکت فرآورده‌ها یکی از علل آسیب، خرابی و معایب خطوط لوله است [۱۵]. در پژوهش حاضر فرض بر این است که با ارسال مواد مخصوص به‌عنوان رابط[13]، خوردگی خطوط لوله ناچیز است. در مقابل، سیستم جاده‌ای بیشترین هزینه حمل‌ونقل را در بین گونه‌ها دارد، ولی دسترسی و انعطاف‌پذیری بالا در سیستم جاده‌ای یک مزیت نسبت به سایر گونه‌ها محسوب می‌شود [۱۴]. شکل ۲ شبکه توزیع فرآورده‌های نفتی را نشان می‌دهد.

10- Certain
11- Uniform
12- Uncertain
13- Interface



شکل ۲. شبکه توزیع فرآورده‌های نفتی

ارتباط بین اجزای شبکه توزیع، توسط زیرساخت گونه‌های حمل‌ونقل و امکان‌پذیری انتقال فرآورده‌ها بین اجزای شبکه، تعیین می‌شود. به‌طور مثال می‌توان به عدم ارسال یک فرآورده با یک گونه‌ی حمل‌ونقل مشخص به دلیل ماهیت فرآورده اشاره نمود. در پژوهش حاضر، ارتباطات و امکان‌پذیری ارسال فرآورده‌ها در بین اجزای شبکه توزیع، توسط پارامتر باینری امکان‌پذیری لحاظ شده است. مدل ارائه شده برای هر افق برنامه‌ریزی به‌طور مجزا اجرا شده و متغیرهای تصمیم برای دوره‌های هر افق برنامه‌ریزی شده به دست می‌آید. به‌طور مثال اگر افق برنامه‌ریزی یک ماه باشد، متغیرهای تصمیم به ازای روزهای ماه حاصل می‌گردد.

انتقال فرآورده‌ها از انبارها تا نقاط تقاضا عمدتاً توسط نفت‌کش‌ها در سیستم جاده‌ای صورت می‌گیرد. نفت‌کش‌ها در سیستم جاده‌ای به دو دسته نفت‌کش‌های درون‌شهری و نفت‌کش‌های برون‌شهری طبقه‌بندی می‌شوند. نفت‌کش‌های درون‌شهری وظیفه تأمین تقاضای نقاطی که در محدوده شهرها و حومه هستند را برعهده دارند و معمولاً محدوده‌ای به شعاع ۲۰ الی ۶۰ کیلومتر از هر انبار را تحت پوشش قرار می‌دهند. ظرفیت این نفت‌کش‌ها در حدود ۸ تا ۲۸ هزار لیتر است [۴]. عملیات انتقال فرآورده‌ها در محدوده خارج از شهرها و خطوط ترانزیت توسط نفت‌کش‌های برون‌شهری صورت می‌گیرد. ظرفیت این نفت‌کش‌ها در محدوده‌ی ۱۶ تا ۳۵ هزار لیتر است[۴]. ارسال فرآورده‌ها توسط نفت‌کش‌های برون‌شهری به ارسال‌های مستقیم معروف است و از انبارهای جنب پالایشگاه صورت می‌گیرد. در ارسال‌های مستقیم، فاصله حمل طولانی سبب افزایش هزینه‌ها خواهد شد.

مدل ریاضی

در جدول مجموعه‌ها و اندیس‌ها، در جدول پارامترهای ریاضی و در **جدول** متغیرهای تصمیم مدل ذکر شده‌اند.

جدول ۱. مجموعه‌ها و اندیس‌های مدل ریاضی

S	مجموعه پالایشگاه‌ها
I	مجموعه انبارها
K	مجموعه نقاط تقاضا
M	مجموعه گونه‌های حمل‌ونقل

P	مجموعه فرآورده‌های تولید شده
s	اندیس پالایشگاه‌ها $(s \in S)$
$i.j$	اندیس انبارها $(i.j \in I)$
k	اندیس نقاط تقاضا $(k \in K)$
m	اندیس گونه‌های حمل‌ونقل $(m \in M)$
p	اندیس فرآورده‌ها $(p \in P)$
t	اندیس دوره‌های افق برنامه‌ریزی شده $(t \in \{1. \dots . T\})$

جدول ۲. پارامترهای مدل ریاضی

A_{si}^{mp}	اگر امکان حمل فرآورده p وسط گونه m از پالایشگاه s به انبار i وجود داشته باشد برابر ۱ است و در غیر این صورت برابر ۰ است.
B_{ij}^{mp}	اگر امکان حمل فرآورده p توسط گونه m از انبار i به انبار j وجود داشته باشد برابر ۱ است و در غیر این صورت برابر ۰ است.
C_{ik}^{mp}	اگر امکان حمل فرآورده p توسط گونه m از انبار i به نقطه تقاضا k وجود داشته باشد برابر ۱ است و در غیر این صورت برابر ۰ است.
CSI_{si}^{mp}	هزینه حمل‌ونقل فرآورده p از پالایشگاه s به انبار i توسط گونه m
CIJ_{ij}^{mp}	هزینه حمل‌ونقل فرآورده p از انبار i به انبار j توسط گونه m
CIK_{ik}^{mp}	هزینه حمل‌ونقل فرآورده p از انبار i به نقطه تقاضا k توسط گونه m
LSI_{si}^{mp}	زمان حمل برای انتقال فرآورده p از پالایشگاه s به انبار iتوسط گونه m
LIJ_{ij}^{mp}	زمان حمل برای انتقال فرآورده p از انبار i به انبار j توسط گونه m
LIK_{ik}^{mp}	زمان حمل برای انتقال فرآورده p از انبار i به نقطه تقاضا k توسط گونه m
PR_{sp}^{t}	میزان تولیدات فرآورده p در پالایشگاه s در دوره tام
CP_{i}^{p}	ظرفیت مجاز انبار iبرای فرآورده p
$DM_{k}^{p.t}$	تقاضای، نقطه تقاضای k برای فرآورده p در دوره tام
Cap_{i}^{j}	ظرفیت دوره‌ای نازک‌ترین خط لوله موجود بین انبار i و انبار j
IN_{i}^{p}	موجودی انبار i برای فرآورده p در ابتدای افق برنامه‌ریزی شده
T	تعداد دوره‌های افق برنامه‌ریزی شده
M	عدد مثبت بسیار بزرگ $(۱۰^{۱۵})$

جدول ۳. متغیرهای تصمیم مدل ریاضی

XSI_{sit}^{mp}	میزان محصول p که توسط گونه m در دوره tام از پالایشگاه s به انبار i ارسال می‌شود.
XIJ_{ijt}^{mp}	میزان محصول p که توسط گونه m در دوره tام از انبار i به انبار j ارسال می‌شود.
XIK_{ikt}^{mp}	میزان محصول p که توسط گونه m در دوره tام از انبار i به نقطه تقاضا k ارسال می‌شود.
Inv_{ip}^{t}	سطح موجودی انبار i برای محصول pدر دوره tام

تابع **هدف**

$$Z1 = \sum_{s\in S}\sum_{i\in I}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P}\left(CSI_{si}^{mp}\sum_{t\in\{1.....T\}}XSI_{sit}^{mp}\right) \quad (۱)$$

$$Z2 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in I}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P}\left(CIJ_{ij}^{mp}\sum_{t\in\{1.....T\}}XIJ_{ijt}^{mp}\right) \quad (۲)$$

$$Z3 = \sum_{i\in I}\sum_{k\in K}\sum_{m\in M}\sum_{p\in P}\left(CIK_{ik}^{mp}\sum_{t\in\{1.....T\}}XIK_{ikt}^{mp}\right) \quad (۳)$$

$$Minimize\ Z = Z1 + Z2 + Z3 \quad (۴)$$

در مسئله تخصیص فرآورده‌های نفتی، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی در شبکه توزیع بیان شده است. هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌ها شامل سه بخش است. بخش اول شامل هزینه‌های انتقال فرآورده‌ها از پالایشگاه‌ها به انبارهای جنب پالایشگاه است که معادله ۱ آن را تضمین می‌کند. بخش دوم شامل هزینه‌های حمل‌ونقل فرآورده‌ها از انبارهای جنب پالایشگاه به انبارهای تدارکاتی است که معادله ۲ آن را نشان می‌دهد و درنهایت بخش سوم هزینه‌های انتقال فرآورده‌ها از انبارهای تدارکاتی به نقاط تقاضا را شامل می‌شود که معادله ۳ آن را ضمانت می‌کند. معادله ۴ جهت کمینه‌سازی هزینه‌های کل حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی ارائه شده است.

محدودیت‌ها

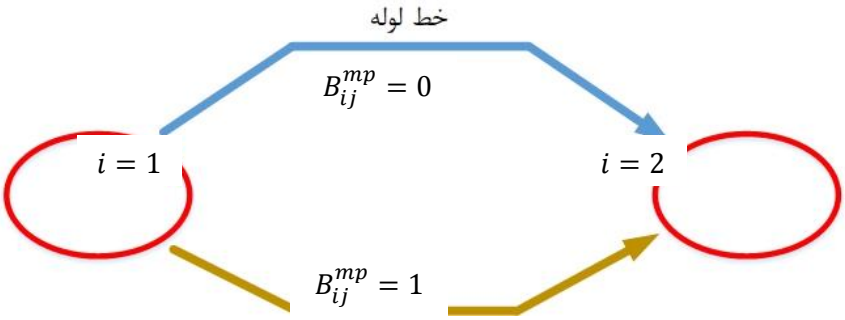
دسته محدودیت‌های امکان‌پذیری

$$XSI_{sit}^{mp} \le M \times A_{si}^{mp} \qquad \forall\, s\in S\,.\ i\in I\,.\ m\in M\,.\ p\in P\,.\ t\in\{1.\dots.T\} \quad (۵)$$

$$XIJ_{ijt}^{mp} \le M \times B_{ij}^{mp} \qquad \forall\, i.j\in I\,.\ m\in M\,.\ p\in P\,.\ t\in\{1.\dots.T\}\ \wedge i\neq j \quad (۶)$$

$$XIK_{ikt}^{mp} \le M \times C_{ik}^{mp} \qquad \forall\, i\in I\,.\ k\in K\,.\ m\in M\,.\ p\in P\,.\ t\in\{1.\dots.T\} \quad (۷)$$

محدودیت ۵ تضمین می‌کند که فرآورده‌های تولید شده در پالایشگاه‌ها تنها در انبارهای جنب پالایشگاه دریافت می‌شوند. اگر پارامتر A_{si}^{mp} برابر یک باشد امکان حمل فرآورده p از پالایشگاه s به انبار i توسط گونه حمل‌ونقل m وجود دارد و اگر برابر صفر باشد این امکان وجود ندارد. محدودیت ۶ امکان حمل فرآورده‌ها بین انبارهای مختلف را توسط پارامتر B_{ij}^{mp} تنظیم می‌کند. اگر این پارامتر برابر یک باشد به این معنی است که امکان حمل فرآورده pاز انبار i به انبار j توسط گونه حمل‌ونقل mوجود دارد و اگر برابر صفر باشد این امکان وجود ندارد. محدودیت ۷ امکان انتقال فرآورده‌ها بین انبارها و نقاط تقاضا را توسط پارامتر C_{ik}^{mp} تضمین می‌کند. درصورتی‌که این پارامتر برابر یک باشد امکان حمل فرآورده pاز انبار i به نقطه تقاضا k توسط گونه حمل‌ونقل m وجود دارد و اگر برابر صفر باشد این امکان وجود ندارد. به‌طور مثال در شکل ۳ فرض بر این است که فرآورده نفت کوره، بایستی از انبار $(i = 1)$ به انبار $(i = 2)$ منتقل شود و زیرساخت برای گونه‌های خط لوله و ریل بین این دو انبار وجود دارد. بر این اساس، امکان حمل فرآورده نفت کوره با خط لوله به دلیل رسوب فرآورده، وجود ندارد، بنابراین پارامتر امکان‌پذیری B_{ij}^{mp} برای خط لوله برابر صفر $(B_{ij}^{mp} = 0)$ و به دلیل آن‌که امکان حمل نفت کوره با سیستم ریلی وجود دارد، پارامتر امکان‌پذیری B_{ij}^{mp} برای سیستم ریلی برابر یک $(B_{ij}^{mp} = 1)$ است.



شکل ۳. امکان‌پذیری حمل‌ونقل فرآورده‌ها

دسته محدودیت تولیدات پالایشگاه‌ها

$$\sum_{i\in I}\sum_{m\in M} XSI_{sit}^{mp} = PR_{sp}^{t} \quad \forall\, s \in S\,.\; p \in P\,.\; t \in \{1.\ldots.T\} \qquad (۸)$$

میزان فرآورده‌ای که در هر دوره از پالایشگاه به انبار جنب پالایشگاه منتقل می‌شود برابراست با میزان تولیدات پالایشگاه در همان دوره که معادله ۸ آن را ضمانت می‌کند.

دسته محدودیت‌های موجودی انبارها

$$Inv_{ip}^{t} = Inv_{ip}^{t-1} + \sum_{s\in S}\sum_{m\in M} XSI_{si\left(t-LSI_{si}^{mp}\right)}^{mp} + \sum_{j\in I}\sum_{m\in M} XIJ_{ji\left(t-LIJ_{ji}^{mp}\right)}^{mp}$$

$$- \sum_{j\in I}\sum_{m\in M} XIJ_{ijt}^{mp} - \sum_{k\in K}\sum_{m\in M} XIK_{ikt}^{mp} \qquad (۹)$$

$$\forall\, i \in I\,.p \in P\,.t \in \{1.\ldots.T\}.\ \wedge t \geq LT_{si}^{mp}\ .\ t \geq LT_{ji}^{mp}$$

$$Inv_{ip}^{t-1} = IN_{i}^{p} \quad if\ t =$$

$$Inv_{ip}^{t} \le CP_{i}^{p} \quad \forall i \in I \,.\, p \in P \,.\, t \in \{1. \ldots . T\} \qquad (۱۰)$$

در پژوهش حاضر، موجودی انبارها به‌صورت دوره‌ای و در انتهای هر دوره در نظر گرفته شده است. موجودی هر انبار بسته به میزان ورودی و خروجی آن در هر دوره متفاوت است. ورودی‌های یک انبار در دوره t عبارت است از: میزان فرآورده‌هایی که از یک پالایشگاه (XSI_{sit}^{mp}) و یا سایر انبارها (XIJ_{jit}^{mp}) در دوره‌های قبل از t ارسال شده است، و در دوره t در انبار موردنظر دریافت می‌گردد. خروجی‌های یک انبار در دوره t شامل میزان فرآورده‌هایی است که به سمت یک انبار (XIJ_{ijt}^{mp}) و یا یک نقطه تقاضا (XIK_{ikt}^{mp}) ارسال می‌شود.

موجودی هر انبار در انتهای دوره t برابراست با موجودی آن انبار در انتهای دوره $t-1$ به‌اضافه مجموع فرآورده‌هایی که در دوره t، از یک پالایشگاه و یا سایر انبارها، به انبار موردنظر اضافه شده‌اند، منهای مجموع فرآورده‌هایی که در دوره t، به سایر انبارها و یا نقاط تقاضا ارسال شده‌اند. معادله ۹ موجودی هر انبار را در انتهای هر دوره محاسبه می‌کند. محدودیت ۱۰ تضمین می‌کند که موجودی انبار i برای محصول p در انتهای دوره t از ظرفیت آن انبار برای محصول p کمتر باشد.

دسته محدودیت برآورد تقاضا

$$\sum_{i \in I} \sum_{m \in M} XIK_{ikt'}^{mp} = DM_{k}^{p.t} \quad \forall k \in K \,.\, p \in P \,.\, t.t' \in \{1. \ldots . T\} \;\wedge t' \le LIK_{ik}^{mp} \qquad (۱۱)$$

معادله ۱۱ تضمین می‌کند که تقاضای هر نقطه‌ی تقاضا به ازای هر دوره، از طریق مجموع فرآورده‌هایی که از انبارهای مختلف در طول افق برنامه‌ریزی شده ارسال می‌شود، تأمین می‌گردد.

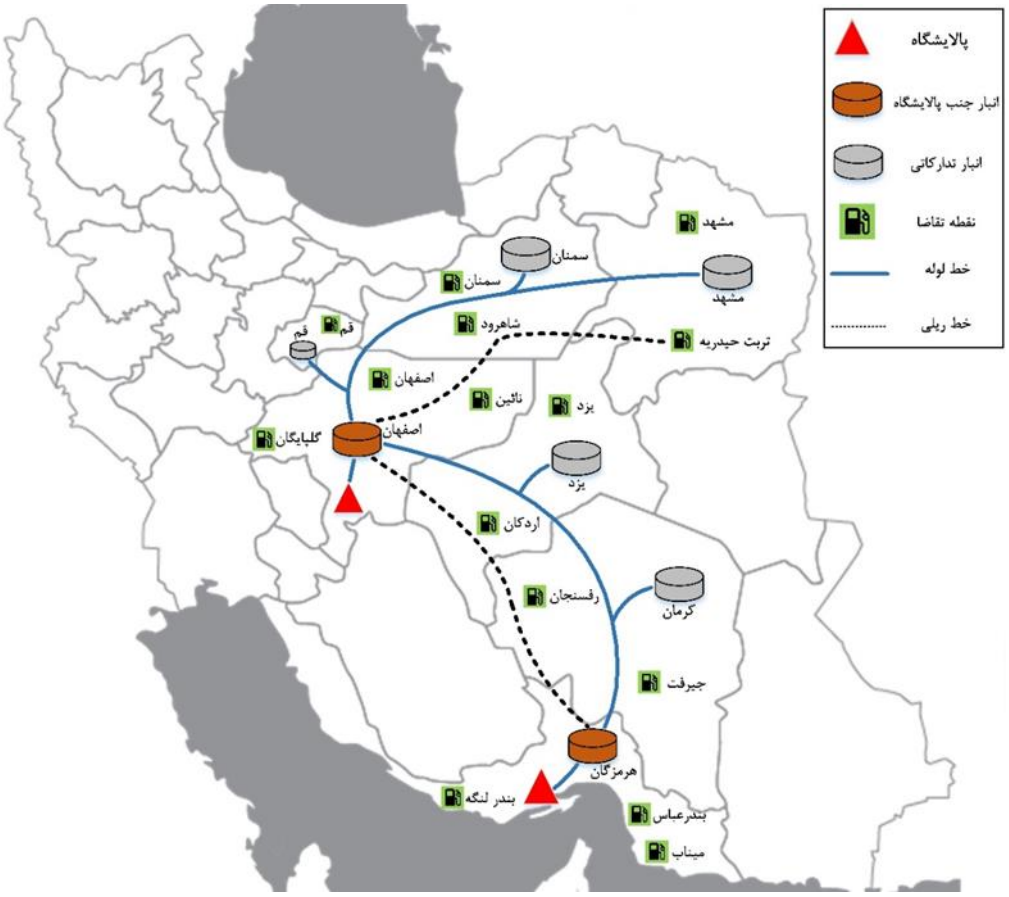
دسته محدودیت ظرفیت خط لوله

$$\sum_{p \in P} XIJ_{ijt}^{mp} \le Cap_{i}^{j} \quad \forall i.j \in I \,.\, t \in \{1. \ldots . T\} \,.\, m \in M \,.\, \wedge m = 1 \qquad (۱۲)$$

محدودیت ۱۲ تضمین می‌کند که مجموع فرآورده‌هایی که در دوره t توسط خط لوله از انبار i به انبار j منتقل می‌شوند، بایستی از ظرفیت دوره‌ای خط لوله موجود در بین آن دو انبار کمتر باشند.

مثال عددی

در شکل ۴ بخشی از شبکه توزیع فرآورده‌های نفتی کشور ایران جهت تحلیل و بررسی مدل ارائه شده، در نظر گرفته شده است. در این شبکه، دو پالایشگاه بندرعباس و اصفهان، دو انبار جنب پالایشگاه بندرعباس و منتظری اصفهان، پنج انبار تدارکاتی شامل انبارهای کرمان، یزد، قم، سمنان و مشهد و ۱۵ نقطه تقاضا لحاظ شده است. چهار گونه‌ی حمل‌ونقل خط لوله، نفت‌کش‌های برون‌شهری، نفت‌کش‌های درون‌شهری و سیستم ریلی وظیفه‌ی حمل سه فرآورده‌ی بنزین، نفت گاز و نفت سفید را در بین اجزای شبکه‌ی تأمین بر عهده دارند. افق برنامه‌ریزی شده، یک ماه و دوره‌ها به‌صورت روزانه در نظر گرفته شده است. نتایج مدل تحت سه سناریوی مختلف افزایش ظرفیت، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. سناریوی برتر باهدف کمترین هزینه نسبت به سایر سناریوها انتخاب گردیده است. در جدول ۳، جدول ۴، جدول ۵ و جدول ۶ پارامترهای ورودی مسئله بیان می‌شوند. پارامترهای ورودی بر اساس آمارنامه‌ی شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی تنظیم شده‌اند.



شکل ۴. بخشی از شبکه‌ی توزیع فرآورده‌های نفتی کشور

جدول ۴. تولیدات پالایشگاه‌ها

پالایشگاه	میزان تولیدات (میلیون لیتر در ماه)		
	بنزین	نفت گاز	نفت سفید
بندرعباس	۲۲۳	۱۶۸	۹
اصفهان	۱۸۰	۲۶۱	۶/۷۵

جدول ۵. ظرفیت خطوط لوله

خط لوله	ظرفیت (میلیون لیتر در روز)
بندرعباس به کرمان	۳/۵
بندرعباس به یزد	۳/۵
بندرعباس به اصفهان	۳/۵
اصفهان به قم	۴
اصفهان به سمنان	۴
اصفهان به مشهد	۴

جدول ۶. ظرفیت انبارها

انبار	ظرفیت مجاز انبارها (میلیون لیتر)		
	بنزین	نفت گاز	نفت سفید
هرمزگان	۳۷	۸	۱/۷
کرمان	۴/۸	۲/۲	۰/۹
یزد	۳	۳	۰/۳
اصفهان	۲۲	۱۴	۰/۹
قم	۲	۱/۵	۰/۳۷
سمنان	۰/۵	۱/۱	۰/۱۵
مشهد	۴	۳/۵	۱

جدول ۷. تقاضای مصرف‌کنندگان برای افق برنامه‌ریزی شده

نقطه تقاضا	تقاضا (هزار لیتر در ماه)		
	بنزین	نفت گاز	نفت سفید
بندرلنگه	۸۵۴۶	۱۰۳۸۱	۲۳۳
میناب	۹۱۰۰	۱۱۸۴۵	۳۶۱
بندرعباس	۳۷۳۶۳	۶۹۸۰۹	۷۰۷
جیرفت	۱۰۵۰۶	۷۳۵۶	۱۵۹۴
رفسنجان	۱۳۵۶۲	۱۷۱۴۵	۱۳۴
یزد	۲۵۶۰۸	۳۳۷۵۶	۱۳۰
اردکان	۵۸۳۱	۱۲۸۷۸	۲۶۴
اصفهان	۹۱۲۳۷	۶۴۷۷۳	۸۰۹
گلپایگان	۳۷۲۴	۳۹۷۱	۲۳۹
نائین	۲۹۴۲	۱۹۱۶۴	۹۴۱
قم	۴۰۳۳۲	۵۷۷۵۷	۵۶۸
سمنان	۸۰۱۳	۱۶۷۳۳	۲۷۷
شاهرود	۸۰۱۰	۱۶۱۶۲	۹۳۹
مشهد	۹۷۱۵۱	۶۱۴۲۳	۴۸۲۷
تربت‌حیدریه	۹۸۲۹	۱۲۲۱۴	۳۲۹۴

تحلیل نتایج

جهت تحلیل نتایج، علاوه بر سناریوی پایه، سه سناریوی دیگر تعریف شده است که در جدول ذکر شده‌اند.

جدول ۸. تعریف سناریوها

سناریوی پایه	وضع موجود
سناریوی ۱	افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت انبارها به ازای هر فرآورده
سناریوی ۲	افزایش ۲۰ درصدی تولیدات پالایشگاه‌ها
سناریوی ۳	افزایش ۲۰ درصدی موجودی انبارها در ابتدای افق برنامه‌ریزی شده

فرآورده‌های نفتی پس از انتقال به انبارها، بایستی مدت‌زمان مشخصی را جهت رسوب‌گذاری و ته‌نشینی در انبارها سپری کنند. رسوب‌گذاری در انبارها طی دوره‌های متوالی سبب کاهش ظرفیت مجاز انبارها می‌شود. در سناریوی اول افزایش ۲۰ درصدی ظرفیت انبارها با انجام لایروبی و شست‌وشوی به‌موقع انبارها حاصل می‌گردد. در سناریوی دوم افزایش تولیدات پالایشگاه‌ها به میزان ۲۰ درصد از طریق افزایش ورودی نفت خام به پالایشگاه‌ها، انجام می‌شود. در سناریوی سوم موجودی اولیه‌ی انبارها در ابتدای افق برنامه‌ریزی شده، به میزان ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

جهت انتخاب سناریوی برتر از شاخص‌های زیر استفاده شده است:

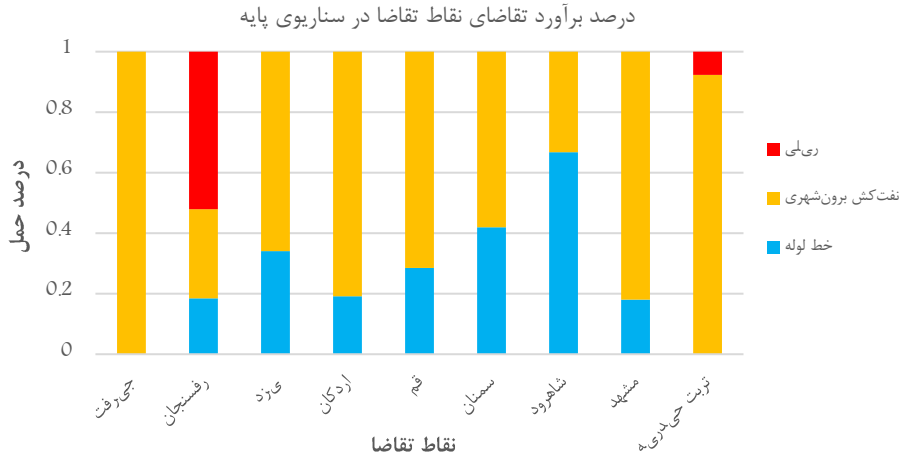
۱. درصد کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوی پایه در افق برنامه‌ریزی شده
۲. درصد برآورد تقاضای هر نقطه تقاضا برای تمامی فرآورده‌ها با استفاده از گونه‌های مختلف حمل‌ونقل
۳. درصد حمل هر فرآورده توسط گونه‌های مختلف حمل‌ونقل

در جدول شاخص درصد کاهش هزینه‌ها در هر سناریو نسبت به سناریوی پایه تعیین شده است.

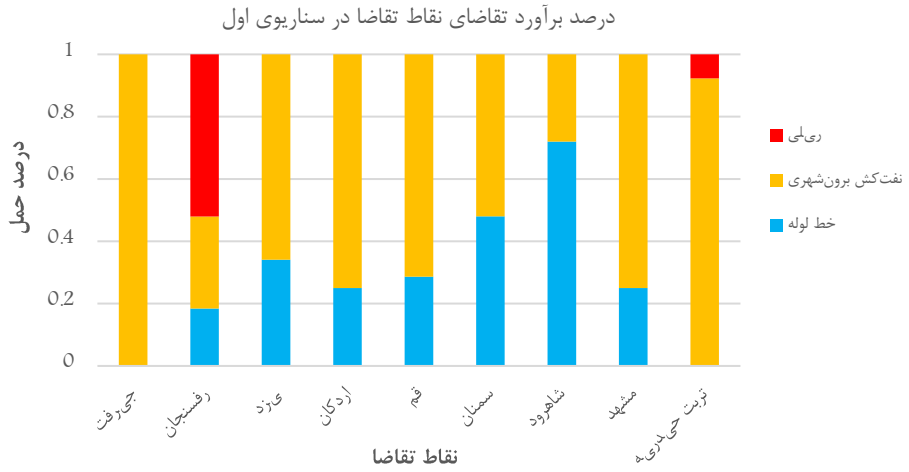
جدول ۹. درصد کاهش هزینه‌ها در سناریوهای مختلف

سناریو	هزینه‌های ماهانه حمل‌ونقل (تومان)	درصد کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوی پایه	کاهش هزینه‌های سالانه نسبت به سناریو پایه (تومان)
پایه	۴۱۰،۲۵۰،۹۳۰،۸۵۰	---	---
اول	۳۹۵،۷۵۰،۲۶۱،۶۹۷	۳/۵۳	۱۰۰،۷۴۰،۰۰۰،۰۰۰
دوم	۳۴۵،۶۴۹،۱۰۰،۹۷۳	۱۵/۷۴	۷۰۰،۷۵۰،۰۰۰،۰۰۰
سوم	۳۹۰،۵۴۹،۷۷۹،۰۱۹	۴/۸۰	۲۰۰،۳۶۰،۰۰۰،۰۰۰

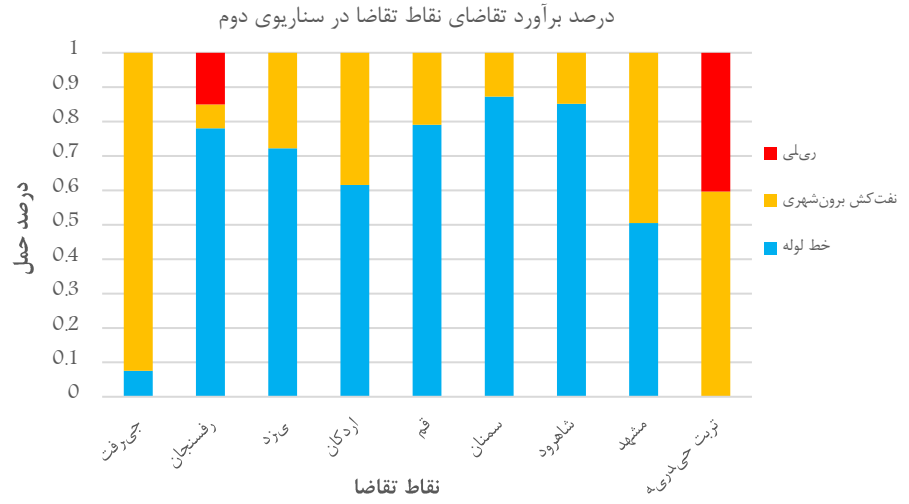
بر اساس شاخص فوق، درصد کاهش هزینه‌ها در سناریوی دوم بیشتر از سایر سناریوها است. پس از سناریوی دوم، به ترتیب در سناریوهای سوم و اول هزینه‌ها به میزان ۵/۰۴ و ۳/۵۳ درصد نسبت به سناریوی پایه کاهش یافته است. در نمودار ۱، نمودار ، نمودار و نمودار ، شاخص درصد برآورد تقاضای هر نقطه تقاضا برای تمامی فرآورده‌ها، توسط گونه‌های خط لوله، نفت‌کش‌های برون‌شهری و سیستم ریلی برای هر سناریو به‌طور مجزا نشان داده شده است. تقاضای نقاطی که در مجاورت انبارهای جنب پالایشگاه هستند، از طریق نفت‌کش‌های درون‌شهری برآورده می‌شود. به همین جهت از محاسبه شاخص درصد برآورد تقاضا برای چنین نقاطی صرف‌نظر شده است.



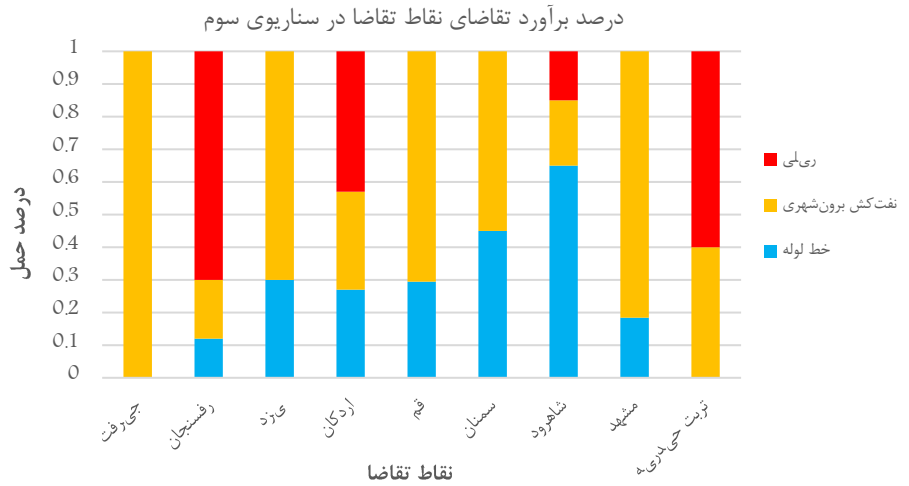
نمودار ۱. درصد برآورد تقاضای نقاط تقاضا با گونه‌های مختلف در سناریوی پایه



نمودار ۲. درصد برآورد تقاضای نقاط تقاضا با گونه‌های مختلف در سناریوی اول



نمودار ۳. درصد برآورد تقاضای نقاط تقاضا با گونه‌های مختلف در سناریوی دوم



نمودار ۴. درصد برآورد تقاضای نقاط تقاضا با گونه‌های مختلف در سناریوی سوم

به‌واسطه‌ی پر شدن انبارهای تدارکاتی در سناریوی پایه و بیشتر بودن تقاضا نسبت به موجودی انبارها، درصدی از تقاضا توسط ارسال‌های مستقیم از انبارهای جنب پالایشگاه برآورده می‌گردد. در سناریوی اول، به دلیل افزایش ظرفیت انبارها، قابلیت ذخیره‌سازی فرآورده‌ها در آن‌ها بیشتر می‌شود. درنتیجه در طول ماه، فرآورده‌ی بیشتری توسط خط لوله به انبارهایی که فاصله آن‌ها از انبارهای جنب پالایشگاه بیشتر است، ارسال خواهد شد تا از برآورده شدن تقاضا توسط ارسال‌های مستقیم جلوگیری شود. به همین دلیل، درصد برآورد تقاضا با استفاده از خط لوله برای نقاط اردکان، سمنان، شاهرود و مشهد در سناریوی اول نسبت به سناریوی پایه افزایش یافته و هزینه‌های حمل‌ونقل نسبت به سناریوی پایه کمتر شده است.

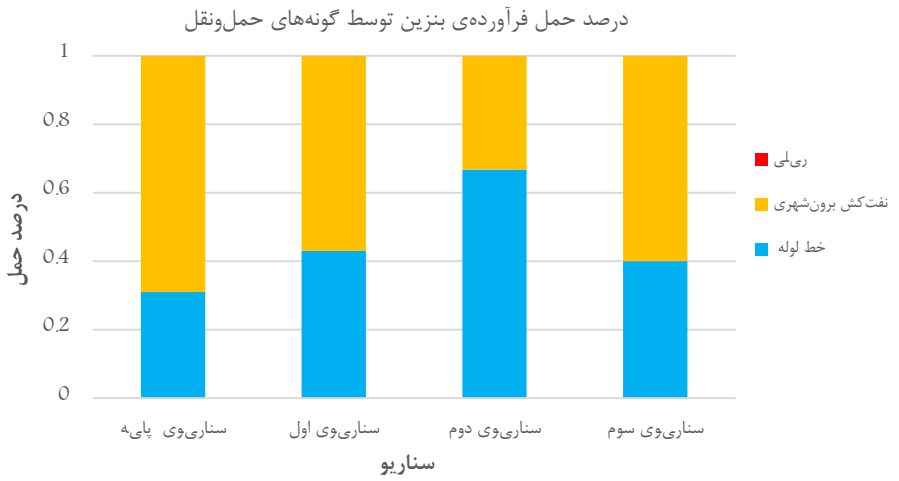
در شبکه موجود، تولیدات بنزین و نفت سفید در پالایشگاه بندرعباس بیشتر از پالایشگاه اصفهان است. از طرفی، زمان حمل طولانی خط لوله برای انبارهایی که فاصله‌ی آن‌ها از انبار بندرعباس زیاد است، سبب شده تا تقاضای نقاط تقاضا در روزهای آخر ماه توسط ارسال‌های مستقیم از انبار بندرعباس برآورده شود. در سناریوی دوم، با افزایش ظرفیت تولیدات پالایشگاه‌ها، تقاضای نقاط قم، سمنان، شاهرود و مشهد به‌جای ارسال‌های مستقیم از انبار بندرعباس عمدتاً توسط خط لوله از انبار اصفهان برآورده می‌شود که سبب کاهش چشمگیر هزینه‌ها در سناریوی دوم نسبت به سناریوی پایه شده است.

در سناریوی سوم، افزایش موجودی انبارها در ابتدای افق برنامه‌ریزی باعث می‌شود تا تقاضای نقاط در روزهای ابتدایی ماه توسط نفت‌کش‌های درون‌شهری از انبارهای تدارکاتی و سیستم ریلی برآورده گردد و درصد استفاده از ارسال‌های مستقیم کاهش یابد. افزایش موجودی انبارها در ابتدای هر ماه با برنامه‌ریزی مناسب در ماه‌های قبل، حاصل می‌گردد. جهت مقایسه‌ی سناریوها بر اساس شاخص دوم، در جدول ۱۰ از متوسط درصد استفاده از خط لوله جهت برآورد تقاضای نقاط استفاده شده است. بر اساس جدول ۱۰ در تمامی سناریوها میزان استفاده از خط لوله نسبت به سناریوی پایه افزایش یافته است. در سناریوی سوم باوجود کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوی اول درصد استفاده از خط لوله جهت برآورد تقاضا کاهش یافته است. کاهش شدید در استفاده از ارسال‌های مستقیم و استفاده از نفت‌کش‌های درون‌شهری و سیستم ریلی در سناریوی سوم به دلیل افزایش موجودی انبارها در ابتدای افق برنامه‌ریزی، سبب کاهش درصد استفاده از خط لوله نسبت به سناریوی اول شده است.

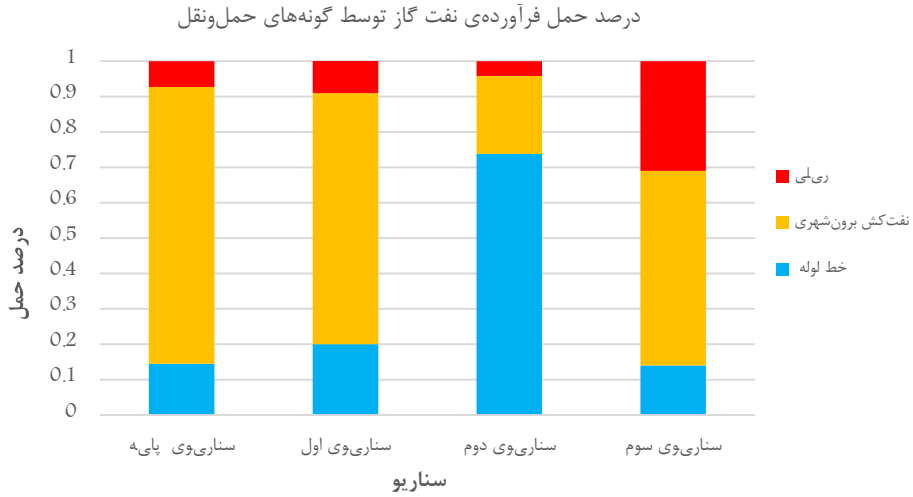
جدول ۱۰. متوسط درصد استفاده از خط لوله جهت برآورد تقاضا در سناریوهای مختلف

سناریو	متوسط درصد استفاده از خط لوله جهت برآورد تقاضا
سناریوی پایه	۰/۲۰
سناریوی ۱	۰/۲۷
سناریوی ۲	۰/۵۷
سناریوی ۳	۰/۲۵

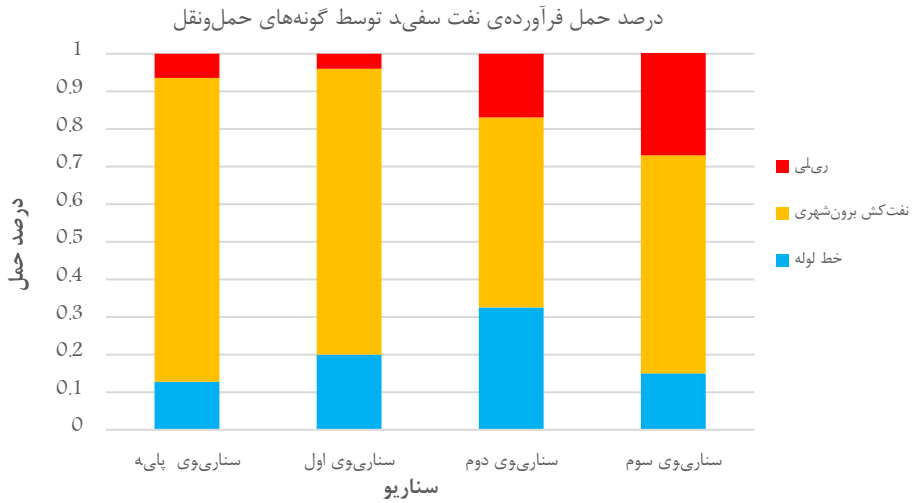
در نمودار ۵، نمودار ۶ و نمودار ۷ شاخص درصد حمل هر فرآورده توسط گونه‌های خط لوله، نفت‌کش‌های برون‌شهری و سیستم ریلی در هر سناریو نشان داده شده است.



نمودار ۵. درصد حمل فرآورده‌ی بنزین توسط گونه‌های حمل‌ونقل



نمودار ۶. درصد حمل فرآورده‌ی نفت گاز توسط گونه‌های حمل‌ونقل



نمودار ۷. درصد حمل فرآورده‌ی نفت سفید توسط گونه‌های حمل‌ونقل

جهت مقایسه‌ی سناریوها بر اساس شاخص سوم، درصد حمل هر فرآورده با خط لوله در سناریوهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول نشان داده شده است. در سناریوی دوم، درصد حمل هر فرآورده با خط لوله بیشتر از سایر سناریوها است. در سناریوی سوم، باوجود کاهش هزینه‌ها نسبت به سناریوی اول، درصد حمل فرآورده‌های بنزین، نفت گاز و نفت سفید با خط لوله کمتر از سناریوی اول است؛ که دلیل آن افزایش استفاده از نفت‌کش‌های درون‌شهری و سیستم ریلی در روزهای ابتدایی ماه به علت افزایش موجودی انبارها در سناریوی سوم است.

جدول ۱۱. درصد حمل هر فرآورده با خط لوله در سناریوهای مختلف

سناریو	درصد حمل هر فرآورده با خط لوله		
	بنزین	نفت گاز	نفت سفید
سناریوی پایه	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۱۲
سناریوی ۱	۰/۴۳	۰/۲	۰/۲
سناریوی ۲	۰/۶۶	۰/۷۳	۰/۳۲
سناریوی ۳	۰/۴	۰/۱۴	۰/۱۵

با توجه به شاخص‌های محاسبه‌شده، میزان کاهش هزینه‌ها در سناریوی دوم بیشتر از سایر سناریوها است؛ پس‌ازآن به ترتیب در سناریوهای سوم و اول میزان کاهش هزینه‌ها بیشتر از سناریوی پایه است. در شاخص‌های دوم و سوم به ترتیب میزان استفاده از خط لوله جهت برآورد تقاضا و حمل هر فرآورده مورد بررسی قرار گرفته که در سناریوی دوم، میزان استفاده از خط لوله در شاخص‌های دوم و سوم بیشتر از سایر سناریوها است. میزان استفاده از خط لوله بر اساس شاخص‌های محاسبه شده به ترتیب در سناریوهای اول و سوم بیشتر از سناریوی پایه است. ترجیح سناریوها با توجه به شاخص‌های محاسبه شده در جدول نشان داده شده است.

جدول ۱۲. ترجیح سناریوها با توجه به شاخص‌های ارائه‌شده

سناریو	شاخص		
	شاخص ۱	شاخص ۲	شاخص ۳
سناریوی ۱	✓	✓✓	✓✓
سناریوی ۲	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
سناریوی ۳	✓✓	✓	✓

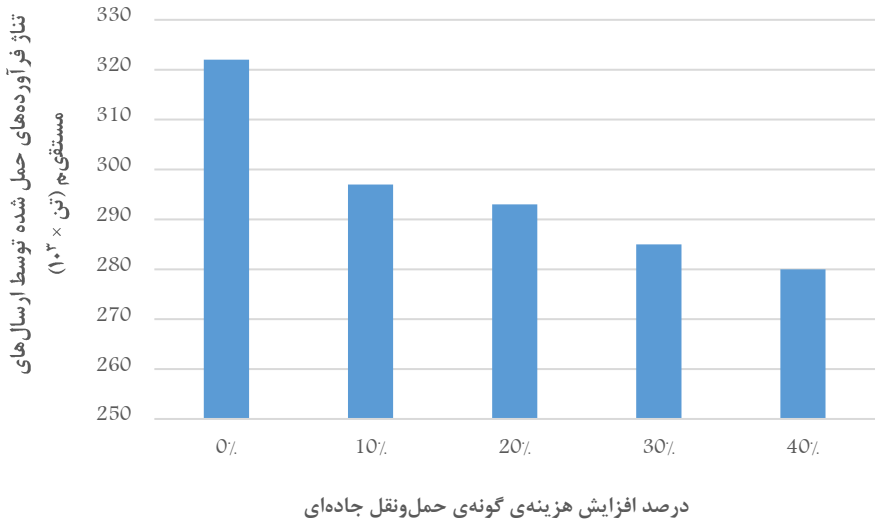
جهت بررسی حساسیت مدل ریاضی پیشنهادی، تغییر در پارامتر هزینه‌ی گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است.

جدول ۱۲ میزان تغییر در هزینه‌ی گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای و درصد افزایش مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل نشان داده شده است. هم‌چنین مطابق نمودار با افزایش هزینه‌ی گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای، تناژ فرآورده‌های حمل شده

توسط ارسال‌های مستقیم کاهش یافته است. بیشترین حالت کاهش تناژ فرآورده‌های حمل شده توسط ارسال‌های مستقیم متناظر با افزایش ٪۴۰ هزینه‌ی حمل‌ونقل گونه‌ی جاده‌ای است.

جدول ۱۳. تغییر در هزینه‌ی گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای

درصد افزایش هزینه‌ی حمل‌ونقل گونه‌ی جاده‌ای	درصد افزایش مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل
٪۰	٪۰
٪۱۰	٪۷/۸
٪۲۰	٪۱۶/۳
٪۳۰	٪۲۵/۶
٪۴۰	٪۳۵



نمودار ۸. تناژ فرآورده‌های حمل شده توسط ارسال‌های مستقیم با افزایش درصد هزینه‌ی گونه‌ی جاده‌ای

نتیجه‌گیری

یکی از عوامل بسیار مهم در افزایش هزینه‌های توزیع فرآورده‌های نفتی، حمل آن‌ها با استفاده از ارسال‌های مستقیم از انبارهای جنب پالایشگاه است. بهینه‌سازی فرآیندهای توزیع می‌تواند منجر به کاهش استفاده از نفت‌کش‌های برون‌شهری و کاهش تبعات ناشی از آن مانند کاهش هزینه‌های سالانه‌ی حمل‌ونقل، مصرف سوخت و آلایندگی هوا گردد. در این راستا در پژوهش حاضر بهینه‌سازی حمل‌ونقل فرآورده‌های نفتی با لحاظ چهار گونه‌ی خط لوله، نفت‌کش‌های برون‌شهری، نفت‌کش‌های درون‌شهری و سیستم ریلی و نیز سه فرآورده‌ی بنزین، نفت گاز و نفت سفید انجام شده است.

در بخش تحلیل نتایج سه سناریو مبتنی بر افزایش ظرفیت انبارها، افزایش موجودی اولیه انبارها و افزایش تولیدات پالایشگاه‌ها تعریف گردید. نتایج حاصله نشان‌دهنده‌ی آن است که پیاده‌سازی سناریوهای مذکور می‌تواند موجب افزایش میزان استفاده از خط لوله و نیز کاهش درصد استفاده از نفت‌کش‌های برون‌شهری گردد. کاهش مجموع

هزینه‌های حمل‌ونقل و افزایش بهره‌وری شبکه‌ی خط لوله در سناریوی افزایش تولیدات پالایشگاه‌ها بیشتر از سایر سناریوها است. افزایش میزان استفاده از خطوط لوله، به سبب ایمنی بالاتر، هزینه‌های پایین حمل‌ونقل نسبت به سایر گونه‌ها، خطرات زیست‌محیطی اندک و توانایی در حمل حجم انبوه فرآورده‌ها، در درازمدت سبب کاهش هزینه‌های شرکت ملی پخش فرآورده‌های نفتی می‌گردد. هم‌چنین افزایش هزینه‌ی گونه‌ی حمل‌ونقل جاده‌ای باعث کاهش تناژ فرآورده‌های حمل شده توسط ارسال‌های مستقیم در گونه‌ی جاده‌ای شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیران صنعت توزیع فرآورده‌های نفتی در جهت اتخاذ سیاست‌های یکپارچه کمک نماید.

منابع

[1] Mentzer, J.T., et al., Defining supply chain management. Journal of Business logistics, 2001. 22(2): pp. 1-25.

[2] Kazemi, Y. and J. Szmerekovsky, Modeling downstream petroleum supply chain: The importance of multi-mode transportation to strategic planning. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2015. 83: pp. 111-125.

[3] Nasab, N.M. and M. Amin-Naseri, Designing an integrated model for a multi-period, multi-echelon and multi-product petroleum supply chain. Energy, 2016. 114: pp. 708-733.

[۴] ایران، ش.م.پ.ف.ه.ن.، تحلیل، طراحی و پیاده‌سازی نظام برنامه‌ریزی توزیع فرآورده‌های نفتی. ۱۳۸۶.

[5] Ghaithan, A.M., A. Attia, and S.O. Duffuaa, Multi-objective optimization model for a downstream oil and gas supply chain. Applied Mathematical Modelling, 2017. 52: pp. 689-708.

[6] Al-Qahtani, K. and A. Elkamel, Multisite facility network integration design and coordination: An application to the refining industry. Computers & Chemical Engineering, 2008. 32(10): pp. 2189-2202.

[7] Fernandes, L.J., S .Relvas, and A.P. Barbosa-Póvoa, Strategic network design of downstream petroleum supply chains: single versus multi-entity participation. Chemical engineering research and design, 2013. 91(8): pp. 1557-1587.

[8] Wang, B., et al., Optimisation of a downstream oil supply chain with new pipeline route planning. Chemical Engineering Research and Design, 2019. 145: pp. 300-313.

[9] Escudero, L.F., F.J. Quintana, and J. Salmerón, CORO, a modeling and an algorithmic framework for oil supply, transformation and distribution optimization under uncertainty. European Journal of Operational Research, 1999. 114(3): pp. 638-656.

[10] MirHassani, S., An operational planning model for petroleum products logistics under uncertainty. Applied Mathematics and Computation, 2008. 196(2): pp. 744-751.

[11] Sear, T., Logistics planning in the downstream oil industry. Journal of the Operational Research Society, 1993. 44(1): pp. 9-17.

[12] Verma, M., V. Verter, and N. Zufferey, A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2012. 48(1): pp. 132-149.

[13] Kim, Y., et al., An integrated model of supply network and production planning for multiple fuel products of multi-site refineries. Computers & Chemical Engineering, 2008. 32(11): pp. 2529-2535.

[14] Strogen, B., et al., Environmental, public health, and safety assessment of fuel pipelines and other freight transportation modes. Applied energy, 2016. 171: pp. 266-276.

[15] Cosham, A. and P. Hopkins. The assessment of corrosion in pipelines–Guidance in the pipeline defect assessment manual (PDAM). in Pipeline pigging and integrity management conference, Amsterdam, The Netherlands. 2004.